

С.М. Аполлонский

ЗАЩИТА ТЕХНОСФЕРЫ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ И ИЗЛУЧЕНИЙ

В ТРЕХ ТОМАХ

Том 2
Защитные материалы
от физических полей и излучений

Монография

RU
science
RU-SCIENCE.COM

Москва
2016

УДК 504.75

ББК 20.1

A76

Аполлонский С.М.

A76

Защита техносферы от воздействия физических полей и излучений. В 3 т. Т. 2. Защитные материалы от физических полей и излучений : монография / С.М. Аполлонский. — М. : РУСАЙНС, 2016. — 342 с.

ISBN 978-5-4365-0769-9

DOI 10.15216/978-5-4365-0769-9

Монография предназначена для научных и инженерно-технических работников, занимающихся проблемами безопасности технических средств и человека при воздействии физических полей и излучений; для магистров, аспирантов и научных работников, специализирующихся в области электромагнитной безопасности технических средств и биообъектов, а также для студентов технических учебных заведений, изучающих влияние на биосферу физических полей и излучений, включающих неионизирующие электромагнитные излучения, ионизирующие излучения и виброакустические воздействия. Рассмотренные вопросы могут оказаться полезными для медицинских работников, сталкивающихся с рассмотренными проблемами в практической деятельности.

The book is intended for scientific and technical workers, dealing with the safety of technical facilities and on exposure to the physical fields and radiation; for graduate, post-graduate students and researchers specializing in the field of electromagnetic safety of technical devices and biological objects, as well as for students of technical schools, studying the impact on the biosphere of physical fields and radiation, including non-ionizing electromagnetic radiation, ionizing radiation, and vibro-acoustic effects. The above questions can be useful for health professionals faced with addressing the problem in practice.

УДК 504.75

ББК 20.1

ISBN 978-5-4365-0769-9

© Аполлонский С.М., 2016

© ООО «РУСАЙНС», 2016

ПРЕДИСЛОВИЕ

Жизнедеятельность человека в окружающем его пространстве в значительной мере зависит от уровня суммарных физических полей и излучений, созданных как естественными условиями существования Вселенной и Земли, так и искусственными условиями, возникшими благодаря практической деятельности человечества. В ряде случаев суммарные воздействия физических полей и излучений на человека и разнообразные технические средства (ТС) могут превышать те предельно допустимые уровни, которые регламентированы нормативно-правовыми документами. Для снижения соответствующих воздействий до нормативного уровня приходится прибегать к созданию экранирующих устройств, использующих различные защитные материалы.

Во втором томе монографии рассмотрены современные материалы, которые используются при создании экранирующих устройств и систем, предназначенных для снижения уровня физических полей и излучений, воздействующих на человека и ТС.

В первом разделе (главы 1-5) рассмотрены материалы, которые используются для снижения уровня неионизирующих излучений. Среди основных требований, предъявляемых к ним можно назвать:

- Прочность, совместимость и электромагнитная стойкость экранирующих материалов: дефекты кристаллической решетки, жаропрочность и деформация металлов, совместимость защитных материалов, электромагнитная стойкость конструкционных материалов.

- Коррозия экранирующих материалов, используемых для защиты от всех видов излучений: классификация коррозионных процессов, двойной электрический слой, кинетика катодных процессов, кинетика анодных процессов, местная коррозия, влияние различных факторов на коррозию материалов, влияние облучения на коррозионные процессы.

- Стойкость защитных материалов от совместного действия как ионизирующих, так и неионизирующих излучений.

Во втором разделе (главы 6-9) рассмотрены материалы, рекомендуемые к использованию для снижения уровня ионизирующих излучений.

В третьем разделе (главы 10-11) рассмотрены материалы, используемые для снижения уровня виброакустических колебаний.

В главе 12 рассмотрены особенности защиты от сочетанного влияния физических полей и излучений.

РАЗДЕЛ I. МАТЕРИАЛЫ ЗАЩИТЫ ОТ НЕИОНИЗИРУЮЩИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ И ИЗЛУЧЕНИЙ

ВВЕДЕНИЕ

Современная жизнь ни в бытовой, ни в производственной сферах в настоящее время не мыслится и практически невозможна без использования электричества – этого самого гибкого и удобного источника энергии и средства обработки и передачи информации. Наши жилища и промышленные площади буквально напичканы всевозможным электрооборудованием, а стены, потолки и даже полы зданий нашпигованы устройствами для потребления, передачи и управления поступлением электроэнергии. Плотный контакт человека с действующими электротехническими устройствами начался уже более 100 лет тому назад и уже сравнительно давно человек осознал на собственной печальной практике, что к электричеству необходимо относиться в высшей степени осторожно. Правда, вначале человек понял опасность непосредственного контакта с электричеством. Здесь подразумевается искусственно созданное электричество, а не естественное в виде молний, опасность которой человек познал одновременно с познанием других грозных явлений природы. А вот опасность невидимого и неосязаемого косвенного воздействия электричества человечество почувствовало сравнительно недавно, хотя сам факт наличия электрических и магнитных полей (ЭП и МП), создаваемых действующими электрическими источниками известен давно, особенно специалистам в области электротехники.

В первую очередь, конечно, появились данные о нежелательном влиянии электромагнитных полей (ЭМП) на чувствительные к ним технические устройства и даже появилось особое направление радиотехники - «Электромагнитная совместимость» (ЭМС), которое занялось изучением возможности эксплуатации радиотехнических устройств в условиях их взаимного влияния, т. е. возможность сосуществования в системах «прибор-прибор».

Однако, постепенно, по мере накопления соответствующей информации, возникла проблема о возможности безопасного функционирования систем «прибор-человек», т. е. из сугубо технической области проблема ЭМС переместилась в области биофизики, радиобиологии, санитарии, гигиены и здравоохранения. И если сначала интерес представлял диапазон высоких и сверхвысоких частот (ВЧ и СВЧ), где эффект воздействия на человеческий организм при значительной интен-

сивности излучения проявлялся сравнительно быстро, то постепенно санитарно-гигиенические службы вынуждены были обратить внимание на особенности жизни и трудовой деятельности человека при длительном и практически непрерывном воздействии низких уровней ЭП и МП, создаваемых самым распространенными источниками (бытовым и офисным электрооборудованием), питаемыми от электросети промышленной частоты. Оказалось, что давно привычное и благоприятное нам соседство на деле таит в себе не менее опасные последствия, чем кратковременные воздействия ЭМП высоких частот и интенсивностей.

Отрицательное действие на биологические объекты, и в частности человека, низких уровней низкочастотных ЭМП, в том числе и промышленных, отмечено многими авторами фундаментальных научных исследований. В работах отмечалось, что большинство населения фактически живет в ЭМП сложной структуры (широкий частотный диапазон, конфигурация). По интенсивности ЭМП промышленных электроэнергетических объектов многократно превосходит интенсивность естественного ЭМП, а по своим характеристикам существенно от него отличается.

Электромагнитная среда обитания фактически может быть рассмотрена как источник помех в отношении жизнедеятельности человека и биосистемы.

В этой связи возникают проблемы биоэлектромагнитной совместимости, как весьма сложная система взаимодействия живой природы и технических средств, источников ЭМП.

Значительное количество публикаций посвящено представлению результатов научных исследований в области воздействия на биологические организмы малоинтенсивных ЭП и МП низких частот и, в частности, источником которых являются электротехнические устройства, питаемые от сети промышленной частоты.

Справедливости ради следует отметить, что и средства массовой информации делают свой вклад в просвещение населения о существовании низкочастотных ЭМП в быту и на производстве и их возможном влиянии на здоровье, однако делают это в присущем современным СМИ сенсационном и резко устрашающем стиле. Конечно, такая трактовка положения с электромагнитным фоном – гипербола, но публицисты в чем-то и правы – современная электротехника не может предложить пользователю электроприборами ничего существенного для защиты от ЭП и МП низких частот, кроме давно известного экранирования. При этом хорошо известно, что экранироваться можно от ЭП, а от низкочастотного МП - практически невозможно. Но может быть путь

поиска средств или методов защиты не очень перспективен? Так, для примера, производители компьютерной техники, для которых проблема воздействия на пользователя широкого спектра ЭМП была проблемой сдерживающей развитие и распространение этой современной техники, пошли по другому пути – не предлагать пользователю защищаться, а разрабатывать и производить технику, не имеющую опасных уровней экологически и гигиенически вредных полей и излучений. И такой путь показал свою перспективность. Компьютерная техника последних десятилетий в основной своей номенклатуре соответствует санитарно-гигиеническим требованиям, т. е. в этом смысле она вполне безопасна, а пользователь не обременен необходимостью беспокоиться о защите. Это свидетельствует о том, что при желании, целеустремленности и правильно выбранном пути серьезная для компьютерной техники проблема может быть решена.

А вот более чем столетняя проблема ЭП, МП и ЭМП промышленных частот (50 Гц, 60 Гц, 400 Гц), хотя изучается фундаментально, но технически значимых или оригинальных решений не находит.

Конечно, сама мысль о том, чтобы создать, скажем, проводник, по которому течет переменный ток, имеющий высокий потенциал относительно земли и при этом не создающий вокруг себя МП и ЭП, кажется противоречащей основам электрофизики, а значит и неосуществимой. Однако, если иметь дело не с обособленными проводниками, а с их совокупностью, то дело может выглядеть иначе, о чем свидетельствует опыт разработчиков компьютерной техники.

Кроме того, опыт работы специалистов в области безопасности жизнедеятельности по аттестации и доработке рабочих мест показал, что в ряде случаев причиной наличия высоких уровней ЭП и МП промышленных частот являются устоявшиеся навыки и принципы монтажа электросетей и некоторых видов электрооборудования, которые не противоречат правилам «контактной» электробезопасности, но создают условия для появления «полевой» электроопасности.

В разделе рассмотрены материалы, с помощью которых можно существенно снизить интенсивности ЭП и МП, и даны практические рекомендации, выполнение которых позволяет простыми средствами улучшить электромагнитную обстановку в жилых и производственных помещениях и на рабочих местах; обеспечить защиту человека от воздействия экологически вредных низкочастотных полей, неизбежно проникающих во все сферы жизнедеятельности и быта при использовании сетевой электроэнергии. Этим автор стремится восполнить не-

достаток практических сведений по данному вопросу в существующих нормативных документах.

Экранирование остаётся одним из основных средств обеспечения ЭМС при конструировании радиоэлектронной аппаратуры. В зависимости от конструкции и материала, из-которого выполнен экран, он по-разному ослабляет магнитную и электрическую составляющие по-мехонесущих ЭМП в заданном диапазоне частот.

При выборе материалов экрана следует исходить из учета ряда факторов. Должны быть приняты во внимание вопросы экономики, технологии обработки, требования по стабильности и факторы, относящиеся к особенностям функциональных материалов. Многие из этих факторов являются универсальными и относятся ко всем рассматриваемым материалам. Так, например, всегда желательно, чтобы стоимость была как можно ниже, а свойства материалов оставались, после обработки и в процессе эксплуатации, стабильными и не возникало физических и химических изменений.

Противоречивость требований к материалам компонентов экрана приводит к тому, что приходится идти на компромисс, чтобы обеспечить согласование состава и технологии изготовления. Так, например, стремление достигнуть максимального повышения электропроводимости путем внесения, по возможности, минимальных изменений в состав композиции экрана может привести к ухудшению физических параметров, к повышению стоимости, что значительно усложняет процесс изготовления. Разработчик экранов из полимерных материалов должен быть готов к тому, что всегда может возникнуть необходимость компромиссных решений для конкретного случая их применения.

Для материалов, используемых в качестве подложек, наибольший интерес представляют следующие свойства: удельное сопротивление, диэлектрическая постоянная, термостойкость, прочность, характеристики поверхности, химическая активность, теплопроводность.

В ряде случаев, важным фактором является устойчивость материала экрана против воздействия припоя. Ряд трудностей вызывает растворимость металлов в жидком припое.

Образование поверхностных загрязнений частиц также сказывается на адгезионных свойствах композиции. Сам механизм адгезии исследован недостаточно. В большинстве случаев о влиянии многих материалов и технологических процессов на адгезию можно только догадываться.

Закон распределения размеров и форма частиц оказывают сильное влияние на многие физические и электрические свойства. Многие металлы или сплавы не могут применяться только из-за того, что изготовление из них порошков обходится очень дорого.

Из рассмотрения химических взаимодействий, которые могут иметь место при изготовлении экранов, становятся понятными требования совместимости функциональных материалов с технологическими процессами.

Важной характеристикой любых экранирующих материалов является стабильность их параметров при хранении и эксплуатации.

Разработано много различных методов испытания параметров материалов и среди них испытания под воздействием повышенных температур в различных климатических условиях, включая высокую влажность. Все эти явления обусловлены теми же физико-химическими реакциями, которые имеют место в технологическом процессе.

При измерении эффективности экранирующих материалов основные трудности возникают при отделении действительных свойств материалов от влияния внешних второстепенных факторов измерений таких, как тип измерительных антенн, ориентация внешних ЭМП помех, распределение полей в измерителях, резонансные эффекты и другие явления, которые не всегда поддаются расчету и учёту при измерениях. Для конкретного экранирующего материала незначительные изменения этих факторов приводит к большому разбросу измеренных значений.

Основной задачей монографии является ознакомление читателей с различными видами материалов, которые рекомендуются к использованию для снижения уровней неионизирующих полей и излучений во всём диапазоне частот их существования.

ГЛАВА 1. ЗАЩИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К НИМ ТРЕБОВАНИЯ

1.1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ЗАЩИТНОЙ СРЕДЫ

1.1.1. МАКРОСКОПИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СРЕДЫ

ЭМП можно рассматривать как особое свойство материи. Оно характеризуется четырьмя векторными величинами: \vec{E} - напряженностью ЭП; \vec{D} - электрической индукцией; \vec{H} - напряженностью МП; \vec{B} - магнитной индукцией. Определить ЭМП в некоторой области пространства – значит указать эти векторы в любой ее точке. Таким образом, ЭМП предстает как совокупность ЭП (\vec{E} , \vec{D}) и МП (\vec{H} , \vec{B}), находящихся во взаимной зависимости. Деление ЭМП на эти две составляющие относительно, оно зависит от условий наблюдения и возможно только при макроскопическом рассмотрении явлений.

Связь векторов ЭМП в некоторой материальной среде характеризуется уравнениями

$$\vec{B} = \mu \vec{H}, \quad \vec{D} = \varepsilon \vec{E}, \quad \vec{\delta} = \gamma \vec{E}, \quad (1.1)$$

где μ - магнитная проницаемость, ε - диэлектрическая проницаемость, γ - удельная проводимость.

Параметры μ , ε , γ (материальные параметры) среды, выражающие макроскопические электромагнитные свойства среды, устанавливаются экспериментально.

Свойства вакуума характеризуются постоянными $\varepsilon_0 \cdot \mu_0$
($\varepsilon_0 = (1/4\pi) \cdot 10^{-9}$ Ф/м, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м). Часто, для удобства характеризовать среды по сравнению с вакуумом, вводят относительные проницаемости

$$\mu_r = \mu / \mu_0, \quad \varepsilon_r = \varepsilon / \varepsilon_0. \quad (1.2)$$

Макроскопические параметры μ , ε , γ в большинстве случаев можно считать независящими от векторов ЭМП. Соответственно этому

употребляется выражение «линейные среды». Однако существуют и часто имеют важное техническое значение среды, отличающиеся заметной зависимостью макроскопических параметров от векторов поля. Такие среды называют «нелинейными». Различают диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики – вещества, магнитная проницаемость которых отличается от магнитной проницаемости вакуума. Кроме того, у ферромагнетиков магнитная проницаемость сильно зависит от МП. Им аналогичны сегнетоэлектрики, обладающие сходной зависимостью диэлектрической проницаемости от ЭП. Нелинейность ряда сред проявляется в сильных полях [1.1, 1.2].

Диамагнетики. К диамагнетикам относятся вещества, у которых магнитный момент атома \vec{p}_{mA} или молекулы в отсутствие внешнего магнитного поля равен нулю.

$$\vec{p}_{mA} = 0 \quad (1.3)$$

Магнитные моменты электронов в таких атомах в отсутствие внешнего магнитного поля взаимно скомпенсированы. Это характерно для атомов и молекул с полностью заполненными электронными оболочками, например для атомов инертных газов, молекул водорода, азота. При внесении такого вещества в магнитное поле его атомы и молекулы, согласно теореме Лармора, приобретают наведенные магнитные моменты, направленные для всех атомов и молекул одинаково против поля. Таким образом, вещество приобретает незначительную намагниченность, направленную против поля, вследствие чего диамагнетик выталкивается из неоднородного магнитного поля в направлении уменьшения напряженности поля. Для диамагнетиков χ отрицательна и очень мала, порядка $\sim 10^{-6}$. Магнитная восприимчивость $\mu_r = (1 + \chi)$ соответственно больше нуля и меньше единицы.

Для диамагнитных веществ существует линейная зависимость намагниченности от величины напряженности внешнего поля:

$$\vec{J} = \chi \vec{H} \quad (2.5)$$

Таким образом, диамагнитные вещества намагничиваются во внешнем магнитном поле в направлении, противоположном направлению вектора магнитной индукции. Это свойство называется диамагнетизмом (диамагнитным эффектом). Характерно то, что диамагнетизм не зависит от температуры. Данное свойство присуще не только диамагнетикам, но и всем без исключения веществам, однако у пара- и

ферромагнетиков диамагнетизм незаметен из-за наличия у них более сильных эффектов.

Парамагнетики. К парамагнетикам относятся вещества, у которых магнитный момент атомов \vec{p}_{mA} или молекул отличен от нуля в отсутствие внешнего магнитного поля:

$$\vec{p}_{mA} \neq 0$$

Поэтому парамагнетики при внесении их во внешнее МП намагничиваются в направлении поля. В отсутствие внешнего МП парамагнетик не намагничен, так как из-за теплового движения все магнитные моменты атомов ориентированы беспорядочно, и поэтому намагниченность равна нулю. При внесении парамагнетика во внешнее МП устанавливается преимущественная ориентация магнитных моментов атомов по полю. Полной ориентации препятствует тепловое движение атомов, которое стремится разбросать моменты. В результате такой преимущественной ориентации парамагнетик намагничивается, создавая собственное магнитное поле, которое, накладываясь на внешнее поле, усиливает его. Этот эффект называется парамагнитным эффектом или парамагнетизмом.

У парамагнетиков также наблюдаются Ларморова прецессия и диамагнитный эффект, как и во всех веществах. Но диамагнитный эффект слабее парамагнитного и подавляется им, оставаясь незаметным.

Для парамагнетиков χ тоже невелика, но положительна, порядка $\sim 10^{-5} \div 10^{-4}$, а значит, μ_r немногим больше единицы.

Так же, как и для диамагнетиков, зависимость магнитной восприимчивости парамагнетиков от внешнего поля линейная. Преимущественная ориентация магнитных моментов по полю зависит от температуры. С ростом температуры усиливается тепловое движение атомов, следовательно, ориентация в одном направлении становится затруднена и намагниченность уменьшается.

Ферромагнетики. Вещества, образующие третью группу и называемые ферромагнетиками, представляют наибольший интерес для науки и техники. Явление ферромагнетизма известно человечеству уже более трех тысячелетий, а первые упоминания о ферромагнитных материалах встречаются в древних китайских рукописях, относящихся к 1110 г. до нашей эры. Ферромагнетики – твердые кристаллические ве-

щества, обладающие самопроизвольной (спонтанной) намагниченностью в отсутствие внешнего МП. Атомы (молекулы) таких веществ обладают отличным от нуля магнитным моментом. В отсутствие внешнего поля магнитные моменты в пределах больших областей ориентированы одинаково (подробнее об этом будет сказано далее). В отличие от слабомагнитных диа- и парамагнетиков ферромагнетики - это сильномагнитные вещества. Их внутреннее магнитное поле может в сотни и тысячи раз превосходить внешнее. Для ферромагнетиков χ и μ_r положительны и могут достигать очень больших значений, порядка $\sim 10^3 \div 10^5$. Только ферромагнетики могут быть постоянными магнитами.

Для ферромагнетиков \vec{J} зависит от \vec{H} нелинейно ($\vec{J} = F(\vec{H})$). Предположим, что при $\vec{H} = 0$ начальный магнитный момент ферромагнетика также был равен нулю. Вместе с ростом напряженности поля начинается резкое нелинейное нарастание намагниченности \vec{J} , при напряженностях порядка нескольких сотен А/м \vec{J} достигает насыщения и не изменяется с дальнейшим увеличением \vec{H} рис. 1.1.

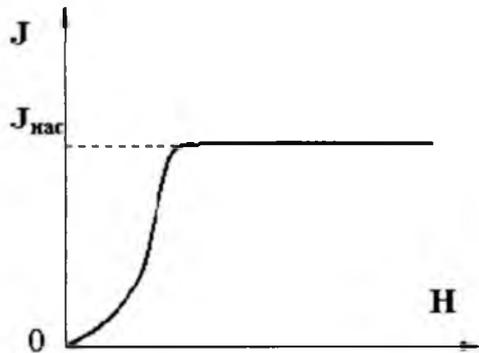


Рис. 1.1. Основная кривая намагничивания

Функция $\vec{J} = F(\vec{H})$ называется основной или нулевой кривой намагничивания, так как первоначально намагниченность была нуле-

вой. Такая зависимость впервые была получена и исследована русским ученым А. Г. Столетовым (1872 г.) в его докторской диссертации [1.3].

Если мы изобразим основную кривую намагничивания в координатах (\vec{B}, \vec{H}) (рис. 2.2, кривая 0-1), то получим несколько другую картину: так как $\vec{B} = (\vec{H} + \vec{J})\mu_0$, то при достижении значения $\vec{J}_{нас}$ магнитная индукция \vec{B} продолжает расти вместе с ростом \vec{H} линейно:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + const, \quad const = \mu_0 \vec{J}_{нас}, \quad (1.6)$$

Для ферромагнетиков характерно явление гистерезиса (от греч. hysteresis – отставание, запаздывание).

Доведем намагниченность тела до насыщения, повышая напряженность внешнего поля (рис. 1.2, точка 1), а затем будем уменьшать

\vec{H} . При этом зависимость $\vec{B}(\vec{H})$ следует не первоначальной кривой 0-1, а новой кривой 1-2. При уменьшении напряженности до нуля намагниченность вещества и магнитная индукция исчезнут. При

$\vec{H} = 0$ магнитная индукция имеет ненулевое значение $\vec{B}_{ост}$, которое называется остаточной индукцией. Намагниченность $\vec{J}_{ост}$, соответствующая

$\vec{B}_{ост}$, называется остаточной намагниченностью, а ферро-

магнетик приобретает свойства постоянного магнита. $\vec{B}_{ост}$ и $\vec{J}_{ост}$

обращаются в нуль лишь под действием поля, противоположного по

направлению первоначальному. Значение напряженности поля \vec{H}_c ,

при котором остаточные намагниченность и индукция обращаются в нуль, называется коэрцитивной силой (от лат. coercitio - удержание).

Продолжая действовать на ферромагнетик переменным магнитным полем, получим кривую 1-2-3-4-1, называемую петлей гистерезиса. В

данном случае реакция тела (\vec{B} или \vec{J}) как бы отстает от вызывающих ее причин (\vec{H}).

Существование остаточной намагниченности делает возможным изготовление постоянных магнитов, потому что ферромагнетики с

$\vec{B}_{ост} \neq 0$ обладают постоянным магнитным моментом и создают в окружающем их пространстве постоянное магнитное поле. Такой магнит тем лучше сохраняет свои свойства, чем больше коэрцитивная сила материала, из которого он изготовлен. Магнитные материалы принято делить по величине \vec{H}_c на магнитно-мягкие (т. е. с малой \vec{H}_c порядка 10^{-2} А/м и соответственно с узкой петлей гистерезиса) и магнитно-жесткие ($\vec{H}_c \sim 10^5$ А/м и широкая петля гистерезиса). Магнитно-мягкие материалы используются при экранировании ЭМП, при изготовлении трансформаторов, сердечники которых постоянно перемагничиваются переменным током. Если сердечник трансформатора будет обладать большим гистерезисом, он будет нагреваться при перемагничивании, на что будет напрасно расходоваться энергия. Поэтому для трансформаторов требуются по возможности безгистерезисные материалы. К ферромагнетикам с узкой петлей гистерезиса относятся сплавы железа с никелем или железа с никелем и молибденом (пермаллой и супермаллой).

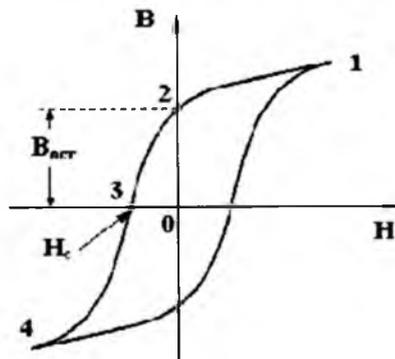


Рис. 1.2. Петля гистерезиса ферромагнетика

Магнитно-жесткие материалы (к ним относятся углеродистые, вольфрамовые, хромовые и алюминиево-никелевые стали) служат для изготовления постоянных магнитов. Остаточная постоянная намагниченность будет существовать бесконечно долго, если не подвергать ферромагнетик действию сильных магнитных полей, высоких температур и деформации. Вся информация, записанная на магнитных лентах –

от музыкальных до видеопрограмм, – сохраняется благодаря этому физическому явлению.

Существенной особенностью ферромагнетиков являются огромные величины магнитной проницаемости и магнитной восприимчивости. Например, для железа $\mu_{r \max} \approx 5000$, для пермаллоя – 100000, для супермаллоя – 900000 [1.4]. Для ферромагнетиков величины магнитной восприимчивости и магнитной проницаемости являются функциями напряженности магнитного поля \vec{H} (рис. 1.3). С ростом напряженности поля значение μ_r сначала быстро возрастает до $\mu_{r \max}$, а затем уменьшается, приближаясь к значению $\mu_r = 1$ в очень сильных полях. Поэтому, хотя формула $\vec{B} = \mu_r \mu_0 \vec{H}$ остается справедливой и для ферромагнитных веществ, линейная зависимость между \vec{B} и \vec{H} нарушается.

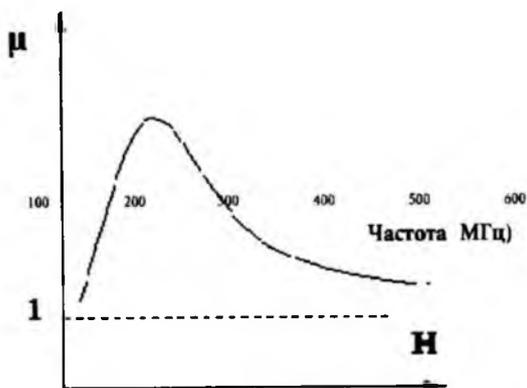


Рис. 1.3. Зависимость магнитной проницаемости ферромагнетика от напряженности магнитного поля

В середине XIX в. было открыто два магнитомеханических эффекта, свойственных ферромагнетикам. Первый из них – это магнитострикция – изменение формы и размеров тела при его намагничивании. Магнитострикция была обнаружена Джоулем в 1842 г. [1.5]. Явление магнитострикции используется в такой специфической области техники, как подводная сигнализация и определение глубин морей при конструкции приборов, называемых эхолотами.

Второй магнитомеханический эффект – это эффект Виллари – изменение и даже исчезновение остаточной намагниченности тела при его сотрясении или деформации (открыт Э.Виллари в 1865 г.). Именно из-за этого постоянные магниты следует предохранять от ударов.

Аналогично деформации на ферромагнетики действует нагревание. С повышением температуры остаточная намагниченность начинает уменьшаться, вначале слабо, а затем, при достижении некоторой достаточно высокой температуры, характерной для каждого ферромагнетика, происходит резкий спад намагниченности до нуля. Тело при этом становится парамагнетиком. Температура, при которой происходит такое изменение свойств, называется точкой Кюри, в честь открывшего ее П. Кюри. Для железа точка Кюри равняется 770 °С, для кобальта – 1130 °С, для никеля – 358 °С, для гадолиния – 16 °С. Этот переход не сопровождается выделением или поглощением тепла и является фазовым переходом II рода. Все эти явления находят свое объяснение при рассмотрении структуры ферромагнетиков.

Сегнетоэлектрики. Сегнетоэлектрики - это диэлектрики, обладающие в определенном интервале температур спонтанной (самопроизвольной) поляризованностью, т. е. поляризованностью в отсутствие внешнего электрического поля. К сегнетоэлектрикам относятся, например, детально изученные И. В. Курчатовым (1903-1960) и П. П. Кобеко (1897-1954) сегнетова соль $NaKC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$ (от нее и получили свое название сегнетоэлектрики) и титанат бария $BaTiO_3$ [11.6].

При отсутствии внешнего электрического поля сегнетоэлектрик представляет собой как бы мозаику из доменов - областей с различными направлениями поляризованности. Это схематически показано на

примере титаната бария (рис. 1.3), где стрелки и знаки (\cdot) , \oplus указывают направление вектора \vec{P} . Так как в смежных доменах эти направления различны, то в целом дипольный момент диэлектрика равен нулю. При внесении сегнетоэлектрика во внешнее поле происходит переориентация дипольных моментов доменов по полю, а возникшее при этом суммарное электрическое поле доменов будет поддерживать их некоторую ориентацию и после прекращения действия внешнего поля. Поэтому сегнетоэлектрики имеют аномально большие значения ди-

электрической проницаемости (для сегнетовой соли, например, $\epsilon_{r \max} = 10^4$).

Сегнетоэлектрические свойства сильно зависят от температуры. Для каждого сегнетоэлектрика имеется определенная температура (точка Кюри), выше которой его необычные свойства исчезают и он становится обычным диэлектриком. Как правило, сегнетоэлектрики имеют только одну точку Кюри; исключения составляют лишь сегнетова соль (-18 и +24°C) и изоморфные с нею соединения. В сегнетоэлектриках вблизи точки Кюри наблюдается также резкое возрастание теплоемкости вещества. Превращение сегнетоэлектриков в обычный диэлектрик, происходящее в точке Кюри, сопровождается фазовым переходом II рода.

Диэлектрическая проницаемость ϵ_r (а следовательно, и диэлектрическая восприимчивость среды χ^e) сегнетоэлектриков зависит от напряженности \vec{E} поля в веществе, а для других диэлектриков эти величины являются характеристиками вещества.

Для сегнетоэлектриков формула $\vec{P} = \chi^e \epsilon_0 \vec{E}$ не соблюдается; для них связь между векторами поляризованности (\vec{P}) и напряженности (\vec{E}) нелинейная и зависит от значений \vec{E} в предшествующие моменты времени. В сегнетоэлектриках наблюдается явление диэлектрического гистерезиса («запаздывания»). Как видно из рис. 1.4, с увеличением напряженности \vec{E} внешнего электрического поля поляризованность \vec{P} растет, достигая насыщения (кривая 1). Уменьшение \vec{P} с уменьшением \vec{E} происходит по кривой 2, и при $\vec{E} = 0$ сегнетоэлектрик сохраняет остаточную поляризованность \vec{P}_0 , т. е. сегнетоэлектрик остается поляризованным в отсутствие внешнего электрического поля. Чтобы уничтожить остаточную поляризованность, надо приложить электрическое поле обратного направления ($-\vec{E}_c$). Величина \vec{E}_c называется коэрцитивной силой (от лат. coercitio - удерживание). Если

далее \vec{E} изменять, то \vec{P} изменяется по кривой 3 петли гистерезиса [1.7].

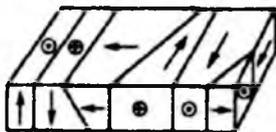


Рис. 1

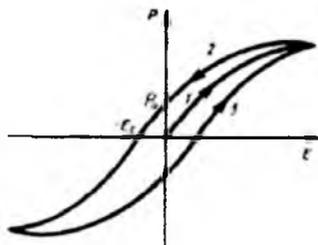


Рис. 2

Рис. 1.4. Кривая гистерезиса сегнетоэлектриков $P = F(E)$

Интенсивному изучению сегнетоэлектриков послужило открытие академиком Б. М. Вулом (1903-1985) аномальных диэлектрических свойств титаната бария. Титанат бария из-за его химической устойчивости и высокой механической прочности, а также из-за сохранения сегнетоэлектрических свойств в широком температурном интервале нашел большое научно-техническое применение (например, в качестве генератора и приемника ультразвуковых волн). В настоящее время известно более сотни сегнетоэлектриков, не считая их твердых растворов. Сегнетоэлектрики широко применяются также в качестве защит-

ных материалов, обладающих большими значениями ϵ_r [1.8].

За исключением специальных случаев, относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0$, где ϵ_0 - диэлектрическая проницаемость воздуха, большинства употребительных материалов больше единицы (см. табл. 1.1).

Относительная магнитная проницаемость чаще всего незначительно отличается от единицы. Вещество называется парамагнетиком, если $\mu_r > 1$, и диамагнетиком в случае $\mu_r < 1$. У ферромагнетиков магнитная проницаемость $\mu_r \gg 1$ (см. табл. 1.2).

Таблица 1.1

Относительная диэлектрическая проницаемость ряда
защитных материалов, ϵ_r

Воздух 0 °С	1,0006
Вода дистиллированная	81,1
Спирт этиловый	25,8
Кварц плавленный	3,8
Стекло	3 – 10
Титанит бария (BaTiO_3)	$\approx 10^4$
Стеатит	6,25
Слюда	5 – 6
Парафин	2,2
Тефлон	2,1

В зависимости от величины электропроводности вещества делят на проводники и диэлектрики (изоляторы). Промежуточную область составляют полупроводники.

Во многих задачах теории ЭМП реальный проводник или диэлектрик с успехом заменяют идеализированным. При этом используются понятия идеального проводника ($\gamma \rightarrow \infty$) и идеального диэлектрика ($\gamma \rightarrow 0$).

В задачах теории поля, как правило, имеют дело с так называемыми изотропными средами, материальные свойства которых одинаковы для полей любых направлений. Согласно уравнениям (2.1), векторы \vec{B} и \vec{H} , \vec{D} и \vec{E} , а также $\vec{\delta}$ и \vec{E} в этих средах параллельны. Заменяв одно из соотношений, например, для магнитной индукции в системе координат x, y, z тремя скалярными

$$B_x = \mu H_x, \quad B_y = \mu H_y, \quad B_z = \mu H_z, \quad (1.7)$$

видим, что функционально связаны только одноименные проекции участвующих векторов (\vec{B} и \vec{H}).

Таблица 1.2

Относительная магнитная проницаемость ряда
защитных материалов, μ_r

Материал	Начальная μ_r	Максимальная μ_r	Индукция B (у колена кривой намагничивания)
Чугун	-	600	
Мягкая магнитная сталь	200	5500	2,15
Электротехническая сталь	400	7500	2,15
65% пермаллой	1500	400000	1,35
Суперпермаллой	100000	800000	0,75
Пермендюр	1100	4000	2,45
Перминвар	850	4000	1,25
Феррит	2500	8000	0,24
Оксифер-200	200	350	0,33

Однако существуют среды, проявляющие разные свойства в зависимости от направления поля. Они называются анизотропными. В случае общей анизотропии в МП (анизотропный ферромагнетик) вместо (1.7) будем иметь [1.2]

$$\begin{aligned}
 B_x &= \mu_{xx}H_x + \mu_{xy}H_y + \mu_{xz}H_z, \\
 B_y &= \mu_{yx}H_x + \mu_{yy}H_y + \mu_{yz}H_z, \\
 B_z &= \mu_{zx}H_x + \mu_{zy}H_y + \mu_{zz}H_z.
 \end{aligned}
 \tag{1.8}$$

Каждая проекция вектора \vec{B} здесь зависит от трех проекций \vec{H} , а векторы \vec{B} и \vec{H} уже не параллельны.

Всю совокупность действий, производимых над проекциями вектора \vec{H} для получения вектора \vec{B} , условно обозначают оператором [1.9]

$$\vec{\mu} = \begin{pmatrix} \mu_{xx} & \mu_{xy} & \mu_{xz} \\ \mu_{yx} & \mu_{yy} & \mu_{yz} \\ \mu_{zx} & \mu_{zy} & \mu_{zz} \end{pmatrix}, \quad (1.9)$$

в результате чего форма уравнения (1.3) сохраняется:

$$\vec{B} = \vec{\mu} \vec{H}. \quad (1.10)$$

Оператор $\vec{\mu}$ называется тензором магнитной проницаемости, а коэффициенты при проекциях \vec{H} - его компонентами.

Совершенно аналогично описывается анизотропия диэлектрических свойств и проводимости.

Различают понятия: поверхностная анизотропия и пространственная. Для технических приложений имеет большое значение двухмерная и трехмерная анизотропии.

Таблица 1.3

Удельные проводимости ряда проводников и диэлектриков,
См/м при 20°C [1.10]

Проводники		Диэлектрики	
Вещество	Уд. проводимость, γ	Вещество	Уд. проводимость, γ
Серебро	$6,14 \cdot 10^7$	Кварц плавильный	$2 \cdot 10^{-17}$
Медь (фольговая)	$5,15 \cdot 10^7$	Парафин	$10^{-14} \div 10^{-16}$
Алюминий	$3,54 \cdot 10^7$	Мрамор	$10^{-7} \div 10^{-9}$
Железо	$1,0 \cdot 10^7$	Стекло обычное	10^{-12}
Олово	$0,869 \cdot 10^7$	Сера	10^{-15}
Свинец	$0,48 \cdot 10^7$	Дерево парафин	$10^{-8} \div 10^{-11}$

Анизотропные материалы находят применение в электротехнических устройствах, особенно в тех, которые функционируют при высоких частотах. А поэтому представляется важным уметь рассчитывать ЭП, МП и ЭМП в анизотропных средах.

Отметим еще одно понятие - неоднородная среда. Параметры μ, ϵ, γ такой среды меняются от точки к точке и могут быть представлены в функции пространственных координат. Возможны скачкообразные нарушения однородности, происходящие на границе физического тела.

В учебных задачах, как правило, рассматриваются линейные и изотропные среды.

Ниже в табл. 1.3 приведены удельные проводимости ряда употребительных проводников и диэлектриков.

1.1.2. СВЯЗЬ ВЕКТОРОВ ПОЛЯ В ПОЛЯРИЗУЕМЫХ СРЕДАХ

Общие взаимосвязи. В общем случае вместо уравнений (1.1) связи между \vec{D} и \vec{E} , \vec{B} и \vec{H} выражаются равенствами [1.2]

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}, \quad \vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{M}, \quad (1.11)$$

в которые входят векторы электрической поляризации и намагниченности (или магнитной поляризации) \vec{P} и \vec{M} , равные соответственно электрическому и магнитному моментам единицы объема. Именно эти векторы характеризуют влияние среды на ЭМП. В частном случае они могут даже не зависеть от векторов \vec{E} и \vec{H} . В том случае, когда \vec{P} и \vec{M} пропорциональны соответственно векторам \vec{E} и \vec{H} , имеет смысл введение постоянных ϵ и μ и применение уравнений $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$, $\vec{B} = \mu \vec{H}$. В ферромагнитных материалах и сегнетоэлектриках \vec{P} и \vec{M} зависят от \vec{E} и \vec{H} сложным образом и в общем случае неоднозначны. Зависимости $\vec{P} = \vec{P}(\vec{E})$, $\vec{M} = \vec{M}(\vec{H})$ в большинстве случаев могут быть заданы только графически.

В изотропной среде вектор \vec{M} совпадает по направлению с векторами \vec{H} и \vec{B} , а вектор \vec{P} - с \vec{D} и \vec{E} . Можно обозначить

$$\vec{M} = \mu_0 \chi^m \vec{H},$$

$$\vec{P} = \varepsilon_0 \chi^e \vec{E}, \quad (1.12)$$

где коэффициент χ^m называется магнитной восприимчивостью среды.

Сравнивая формулы (1.11)-(1.12) с ранее записанными выражениями относительных проницаемостей (1.2), находим, что

$$\varepsilon_r = 1 + \chi^e / \varepsilon_0, \quad (1.13)$$

Аналогичную модель, которую называют магнитостатической, можно построить для ферромагнитной среды. Из тех же уравнений (1.11)-(1.12) и (1.2) находим

$$\mu_r = 1 + \chi^m / \mu_0. \quad (1.14)$$

В анизотропной среде векторы \vec{B} , \vec{H} и \vec{M} , как и векторы \vec{D} , \vec{E} и \vec{P} , не совпадают по направлению, однако формулы (1.12) сохраняются, если ввести тензоры восприимчивостей. Они записываются аналогично тензорам проницаемостей (см. (1.9)). Для тензора магнитной восприимчивости, например, можно записать:

$$\vec{\chi}^m = \frac{1}{\mu_0} \begin{pmatrix} \mu_{xx} - \mu_0 & \mu_{xy} & \mu_{xz} \\ \mu_{yx} & \mu_{yy} - \mu_0 & \mu_{yz} \\ \mu_{zx} & \mu_{zy} & \mu_{zz} - \mu_0 \end{pmatrix}. \quad (1.15)$$

1.1.3. РАЗГРАНИЧЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ ПО ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ

Используемые при электромагнитной защите материалы значительно отличаются по своим свойствам в зависимости от области применения. Рассмотрим это на примере материалов, обладающих различными электропроводностями (для более широкого ознакомления со свойствами материалов можно воспользоваться любой из книг, посвященной электротехническим материалам) [1.1-1.5].

Уделим особое внимание материалам (средам), занимающим по электропроводности промежуточное положение. К их числу, например, относятся: земля (сухая - $10^{-4} \div 10^{-5}$ См/м, влажная - $10^{-2} \div 10^{-3}$

См/м), дистиллированная вода - $2 \cdot 10^{-4}$ См/м, морская вода - $3 \div 5$ См/м. Перечисленные вещества (а с ними и ряд других) в одних полях ведут себя как проводники, а в других – как диэлектрики. Чтобы найти меру оценки этому явлению, надо сначала понять сущность качественного различия между проводниками и диэлектриками. Сравним идеальный диэлектрик с идеальным проводником. В первом случае ($\gamma = 0$) в среде может существовать лишь ток смещения, ибо первый член выражения плотности полного тока

$$\vec{\delta} = \gamma \vec{E} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (1.16)$$

равен нулю. Во втором случае ($\gamma \rightarrow \infty$), наоборот, существует только ток проводимости (второй член по сравнению с первым – величина бесконечно малая). Очевидно, что реальная среда должна быть признана близкой к идеальному проводнику, если ток проводимости значительно преобладает над током смещения. Тогда это проводник. При обратном соотношении токов смещения и проводимости среда является диэлектриком.

Рассмотрим поведение таких материалов в гармонически меняющихся полях. Пусть напряженность ЭП подчинена закону

$$\vec{E} = \vec{E}_m(x, y, z) \cos \omega t \quad (1.17)$$

тогда плотности токов проводимости и смещения в произвольной точке $M(x, y, z)$ следующие:

$$\vec{\delta} = \gamma \vec{E}_m(x, y, z) \cos \omega t$$

и

$$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = -\omega \varepsilon \vec{E}_m(x, y, z) \sin \omega t$$

Отношение их амплитуд

$$\frac{\delta_m}{(\partial D / \partial t)_m} = \frac{\gamma}{\omega \varepsilon} \quad (1.18)$$

есть мера оценки свойств среды на частоте $f = \omega / 2\pi$. В соответствии со сказанным выше, среда характеризуется как диэлектрик, если

$$\frac{\gamma}{\omega \epsilon} \ll 1, \quad (1.19)$$

и как проводник, если

$$\frac{\gamma}{\omega \epsilon} \gg 1. \quad (1.20)$$

Видим, что деление сред на проводники и диэлектрики по их электропроводности относительно, так как критерий оценки включает еще и частоту. В том огромном диапазоне частот, которым располагает современная электротехника, свойства сред меняются весьма значительно. Можно сказать, что с ростом частоты вещества приобретают диэлектрические качества. При этом медь, алюминий и другие металлы остаются хорошими проводниками во всем диапазоне частот, доступном на практике. Однако такие среды, например, как сухая почва, будучи на низких частотах проводником, на сверхвысоких становится отчетливо выраженным диэлектриком. Отмеченный факт играет важную роль в распространении радиоволн над земной поверхностью.

1.2. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ЭКРАНИРУЮЩИМ МАТЕРИАЛАМ

1.2.1. СТОЙКОСТЬ ЭКРАНИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ К ВНЕШНИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ

В процессе эксплуатации экранирующие материалы подвергаются воздействиям окружающей среды. Вредное воздействие на них могут оказывать:

- *физические факторы*: температура, влажность, скорость движения воздуха, тепловое излучение; неионизирующие ЭМП и излучения; ионизирующие излучения; производственный шум, ультразвук, инфразвук; вибрация (локальная, общая); аэрозоли (пыли) преимущественно фиброгенного действия;

- *химические факторы*: химические вещества, смеси, в т. ч. некоторые вещества биологической природы, получаемые химическим синтезом и/или для контроля которых используют методы химического анализа;

- **биологические факторы:** микроорганизмы-продуценты, живые клетки и споры, содержащиеся в бактериальных препаратах.

Под влиянием отмеченных внешних воздействий защитные материалы могут изменять свои электромагнитные характеристики. Тем самым, снижается эффективность экранирования используемых при экранировании материалов.

Кроме того, при использовании незамкнутых или составных экранов, со временем может снижаться эффективность экранирования стыков, проёмов, щелей и других мест, через которые может пройти высокочастотное излучение.

Качественные уплотнения гарантируют непрерывность вихревых токов от ЭМП. Для изготовления уплотняющих элементов применяются высокотехнологичные материалы, которые обладают такими свойствами, как отличная проводимость, хорошая формуемость, устойчивость к воздействию МП и ЭП.

1.2.2. КОРРОЗИЯ ЭКРАНИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ

Экранирующие материалы можно, в первом приближении, разделить на отражающие (металлические и др.), поглощающие (композитные и т. д.) и вяжущие строительные материалы.

Отражающие (металлические) материалы. Химическое и электрическое воздействие окружающей среды на металлические конструкции и сооружения приводит к их разрушению, которое называется *коррозией*. Коррозия начинается с поверхности металла и распространяется вглубь, при этом металл теряет блеск, поверхность его становится неровной, изъеденной.

Различают следующие виды коррозии: почвенную (электрохимическую), межкристаллитную (механическую) и электро-коррозию (коррозию блуждающими токами).

Почвенной коррозией называется разрушение металлического экрана, вызванное электрохимическим процессом взаимодействия металла с окружающей его почвой. Основными причинами, вызывающими почвенную коррозию, являются: содержание в почве влаги, органических веществ, солей, кислот, щелочей, неоднородность материала экрана, неоднородность химического состава грунта, соприкасающегося с экраном, неравномерное проникание кислорода воздуха к экрану.

В результате на поверхности металла образуются гальванические пары, что сопровождается циркуляцией тока между металлом и окружающей средой. В местах выхода токов из экрана в грунт образуются анодные зоны, в которых и происходит его разрушение.

Межкристаллитная коррозия чаще всего возникает в оболочке кабеля вследствие его вибрации при транспортировке на значительные расстояния, прокладке кабеля вблизи железных дорог с большим грузовым движением, на мостах автомобильных и железных дорог, а также при подвеске на опорах воздушных линий. В свинцовой оболочке кабеля при межкристаллитной коррозии появляются мелкие трещины, которые, увеличиваясь за счет продуктов коррозии, приводят к дальнейшему разрушению металла и распаду некоторых участков оболочки.

Электрокоррозия - это процесс разрушения металлического экрана за счет блуждающих токов в земле. Источниками блуждающих токов могут быть рельсовые пути трамвая, электрифицированных железных дорог, метрополитена, установок дистанционного питания, использующих в качестве обратного провода землю. На электрифицированных железных дорогах и трамвайных сетях питающий ток, возвращаясь по рельсам к питающей подстанции, частично ответвляется в землю. Проходя по земле и встречая на своем пути, например, экранирующую оболочку кабеля, ток распространяется по этой оболочке, а затем сходит с оболочки в землю и к рельсу, чтобы возвратиться к другому полюсу генератора. Те участки кабеля, на которых блуждающие токи входят из земли в кабель, образуют катодную зону; участки кабеля, на которых блуждающие токи выходят из кабеля в землю, образуют анодную зону, в которой происходит разрушение оболочки кабеля.

Коррозия приводит к потере герметичности экранирующих оболочек, ухудшению электрических свойств материала, из которого они изготовлены. Разрушающее действие коррозии характеризуется следующими данными: 1 А блуждающего в земле тока приводит к потере в течение года 12 кг стали, 36 кг свинца, 100 кг алюминия. В зависимости от характера взаимодействия экрана и почвы, в которой он находится, а также от прохождения блуждающего тока вдоль экранированного источника ЭМП, образуются анодные, катодные или знакопеременные зоны. Анодной зоной называется участок экрана, на котором он имеет положительный электрический потенциал по отношению к окружающей среде. В этой зоне токи стекают с экрана, унося частицы

металла и разрушая его. Катодной зоной называется участок экрана, на котором он имеет отрицательный электрический потенциал по отношению к окружающей среде. В этой зоне ток втекает в экран, не создавая опасности ее разрушения. Знакопеременной зоной называется участок экрана, на котором имеет место чередование положительных и отрицательных потенциалов по отношению к земле. Скорость коррозии зависит от величины тока, протекающего между анодом и катодом, и природы процессов.

По характеру коррозионных разрушений различают сплошную, избирательную и межкристаллитную коррозию.

Сплошную коррозию подразделяют на равномерную и неравномерную. При равномерной коррозии разрушение металла протекает с одинаковой скоростью по всей поверхности. При неравномерной коррозии разрушение металла протекает с неодинаковой скоростью на различных участках его поверхности.

Избирательная коррозия охватывает отдельные участки поверхности металла. Её подразделяют на поверхностную, точечную, сквозную, и коррозию пятнами.

Межкристаллитная коррозия проявляется внутри металла, при этом разрушаются связи по границам кристаллов, составляющих металл.

Для предохранения металлов от коррозии применяют различные способы их защиты: герметизацию металлов от агрессивной среды, уменьшения загрязнённости окружающей среды, обеспечение нормальных температурно-влажностных условий, нанесение долговечных антикоррозионных покрытий. Обычно, с целью защиты металлов от коррозии, их покрывают лакокрасочными материалами (грунтовками, красками, эмалями, лаками), защищают коррозионностойкими тонкими металлическими покрытиями (цинковые и алюминиевые покрытия и др.) с помощью газо-термического напыления, плакированием. В ряде случаев металл от коррозии защищают легированием, то есть путём плавления его с другим металлом (хром, никель и др.) и неметаллом.

Поглощающие материалы. К поглощающим материалам относятся токопроводящие ленты, состоящие из алюминиевой или медно-никелевой фольги или токопроводящей полимерной ткани, фольга, сетки и др. В той или иной степени они содержат металлические включения, а значит, подвержены химическому и электрическому воздействию окружающей среды, т. е. одному из видов коррозии.

Вяжущие строительные материалы. Они также подвержены агрессивному воздействию внешних сред. К факторам коррозионного воздействия на строительные материалы можно отнести:

- для газовой среды – вид и концентрация газов, их растворимость в воде, влажность, температуру;
- для твердой (соли, аэрозоли, пыль, грунты) – дисперсность, растворимость в воде, гигроскопичность и т. п.;
- для жидкой – наличие и концентрация агрессивных агентов, температура, величина напора или скорость движения жидкости у поверхности конструкций.

Анализ явлений, лежащих в основе процессов разрушения строительных конструкций, показывает, что они протекают обычно под воздействием различных факторов, среди которых следует выделить: физические – перепады температур (попеременное замерзание и оттаивание), изменение фазового состава частей материала и среды (кристаллизация солей, испарение воды); химические – действие кислот, щелочей, солей, органических соединений; электрохимические – возникновение и работа микро- и макрогальванопар в токопроводящей среде; биологические – воздействие бактерий и микроорганизмов (особенно тех, которые в результате жизнедеятельности выделяют кислоты); физико-химические – явления усадки и набухания, возникновение вредных напряжений за счет капиллярных сил и осмотических явлений (например, при взаимодействии щелочей цемента с активным кремнеземом); механические – истирание, вибрация и т. п.

Из многовекового строительного опыта известно, что практически все материалы на основе неорганических вяжущих материалов корродируют, подвергаются гидролизу и вымыванию даже в чистой воде. Скорость коррозии зависит не только от свойств среды, но и от вещественного состава и структуры материала.

Сравнивая структуры естественных горных пород, затвердевших вяжущих и коагуляционных структур (типа высушенных глин), можно прийти к важному выводу о том, что во всех случаях прочность и долговечность материала определяются видом структуры (кристаллизационная или коагуляционная), количеством и видом контактов, а также суммарной плотностью упаковки частиц новообразований. Для цементного камня характерны необратимые кристаллизационные структуры. Контакты между отдельными их элементами состоят, в основном, из гидросиликатов кальция, в основе структуры которых лежат

неорганические полимерные анионы ($Si_{12}O_{31}$). Значительное количество затвердевшего цементного геля придает бетону характерные свойства, в сильной мере определяющие его долговечность.

При высыхании цементного геля происходит необратимое уменьшение его объема и гель частично теряет свои коллоидные свойства. Поскольку усадка цементного камня происходит неравномерно по всей массе (больше снаружи и меньше внутри), то возникают внутренние напряжения, уменьшающие когезионные и адгезионные силы сцепления.

Таким образом, в бетоне сразу же после изготовления начинают действовать две противоположно направленные тенденции связанные с нарушением равновесного состояния микроструктуры: первая – созидательного характера (продолжающиеся процессы гидратации и твердения), вторая – разрушительного.

Долговечность цементного камня и бетона определяется в конечном итоге степенью сохранности кристаллизационной структуры, находящейся в насыщенном растворе.

Более высокая стойкость полимеров (силикатов, алюмосиликатов) к растворению и действию всевозможных химических веществ в растворах и на воздухе объясняется тем, что с повышением молярной массы соединения уменьшается подвижность и реакционная способность их молекул; связи $Si \div O$; $Al \div O$ и $O \div H$, которые определяют прочность, являются окисленными и находятся в атмосферных условиях в устойчивом состоянии.

Физико-химический анализ материалов после многовекового твердения выявил в них известковые новообразования. При большом разнообразии рецептов долговечных известковых растворов состав продуктов их твердения весьма единообразен и характеризуется, в основном,

$CaCO_3$ и $MgCO_3$, которые образовались в результате взаимодействия окружающей средой. Эксперимент подтвердил также, что использование белковых добавок (яичного белка, творога и т. п.) не является критерием долговечности древних сооружений.

Поведение неорганических материалов в агрессивных средах зависит от вида содержащихся в них оксидов, количества отдельных минералов и от их химических свойств. При наличии в них нерастворимых силикатов и алюмосиликатов, содержащих в своей основе кремнезем, они являются кислотостойкими. Стойкими к щелочам породами оказываются те, в которых оксиды, отвечающие сильным основаниям,

соединены с оксидами, соответствующими слабым кислотам, например, карбонаты кальция и магния.

Стальная арматура в железобетоне находится в специфических условиях, характеризующихся щелочной средой с $\text{pH} = 12 \dots 13$, кроме того, защитный слой бетона служит значительным препятствием для диффузии агрессивных агентов. В связи с этим скорость коррозии арматуры в основном будет определяться скоростью понижения щелочности межфазовой поровой жидкости в контакте ее с арматурой и скоростью разрушения самого бетона за счет коррозионных процессов.

Существуют различные типы коррозионных процессов в бетоне. Кинетика процессов коррозии, прежде всего, связана с особенностями капиллярно-пористой структуры бетона, где происходит диффузия и химическая реакция. Характер процессов обусловлен фазовым составом бетона, ионным составом порового электролита и физико-химическими свойствами среды.

Следует отметить несколько разновидностей химической коррозии у бетона:

- **Коррозия выщелачивания** - растворение $\text{Ca}(\text{OH})$ и унос его вызывает нарушение структуры материала, уменьшение его плотности и прочности. В случае притока воды растворение $\text{Ca}(\text{OH})$ идет до конца и начинается гидролиз гидратированных новообразований в соответствии с их растворимостью. Если же вода неподвижна, то процесс растворения вскоре прекращается, т. к. вода быстро насыщается известью. Агрессивность воды зависит от растворенных в ней веществ.

- **Кислотная коррозия** - это процессы разрушения цементного камня под действием ионов H^+ сильных кислот, угольной кислоты H_2CO_3 , органических кислот, растворов солей. Отрицательное воздействие кислых вод на бетон нормальной плотности в безнапорных сооружениях становится заметным при $\text{pH} \leq 6.5$, а на особо плотный бетон – при $\text{pH} \leq 4.9 \dots 4$.

Защищать бетон от действия сильных кислот очень трудно. С этой целью его готовят на специальных кислотостойких цементах с использованием соответствующих наполнителей.

- **Сульфатная коррозия**. Различают три вида сульфатной коррозии:

а) сульфоалюминатная коррозия под действием ионов SO_4 при их концентрации от 250 до 1000 мг/л;

б) сульфоалюминатно-гипсовая коррозия под действием ионов SO_4 с концентрацией выше 1000 мг/л;

в) гипсовая под действием воды, содержащей большое количество сульфатов натрия или калия.

В кислой среде сульфатная коррозия протекает аналогично выше рассмотренной кислотной.

- Магнезиальная коррозия - возникает при действии на цементный камень растворимых солей магния.

- Химическая коррозия под действием органических веществ. Такие продукты, как нефть, нефтяные дистилляты, практически не разрушают затвердевший бетон, но отрицательно влияют на твердение свежешелочного бетона.

Продукты возгонки каменноугольных смол, содержащие фенолы, крезолы также агрессивно влияют на бетон и другие стройматериалы. Степень разрушения под действием масел зависит от их вязкости и усугубляется при их окислении. Не столько растворы глицерина, сколько растворы сахаров губительны для цементного бетона, т. к. и глицераты, и сахараты кальция хорошо растворяются в воде.

- Коррозия под действием газов. Степень агрессивности газовой среды определяется: видом и концентрацией газов, их растворимостью в воде, влажностью и температурой среды. Взаимодействие с газами может протекать как гетерогенная реакция.

- Коррозия, вызываемая щелочами. Этот тип разрушения протекает как бы в неагрессивной среде. Деструктивные процессы развиваются не только в наружных, но и во внутренних слоях бетона через некоторое время после возведения сооружения. Причина – щелочи, которые со временем начинают взаимодействовать с активным кремнеземом заполнителя. Активные разновидности кремнезема встречаются в гравии, гальке, сланцах, доломитизированных известняках. Разрушение начинается с расширения бетона, появляются трещины.

1.2.3. СТОЙКОСТЬ ЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ К ИОНИЗИРУЮЩИМ И НЕИОНИЗИРУЮЩИМ ИЗЛУЧЕНИЯМ

Под радиационной стойкостью понимают способность материалов сохранять исходный химический состав, структуру и свойства в процессе и (или) после воздействия ионизирующих излучений (ИИ).

Радиационная стойкость существенно зависит от вида радиации, величины и мощности поглощенной дозы, режима облучения (непрерывное или импульсное, кратковременное или длительное), условий эксплуатации материала (температура, высокое давление, механические нагрузки, магнитное или электрическое поле), размеров образца материала, его поверхности и др. факторов. На практике изменение свойств материала сопоставляется с величиной, характеризующей величину воздействующего излучения, например с потоком нейтронов или поглощенной дозой ИИ. Количественной характеристикой часто служит также максимальное (предельное) значение поглощенной дозы и (или) мощности поглощенной дозы излучения, при котором материал становится непригодным для конкретных условий применения или до заданной степени меняет значение какого-либо характерного параметра. Обычно проводят ускоренные радиационные испытания в лабораторных условиях, имитирующих эксплуатационные.

Возникающие в результате радиационно-индуцированных процессов ионы и свободные электроны могут участвовать в сложных цепях физико-химических превращений (образование новых молекул и свободных радикалов, изменение кристаллической структуры и др.), совокупно приводящих к изменению механических, электрических, оптических и других свойств материалов. Изменения в материалах могут быть обратимыми или необратимыми и произойти как непосредственно вслед за радиационным воздействием, так и в течение длительного времени после акта облучения.

В случае, когда защитные материалы находятся под прямым воздействием излучений (например, микроволны, лазер, ультрафиолетовые и рентгеновские лучи), чтобы избежать их быстрого разрушения, необходимо принять дополнительные меры защиты.

1.3. ОСОБЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ЭКРАНИРУЮЩИМ МАТЕРИАЛАМ

Экранирующие материалы весьма разнообразны и включают в себя металлы и сплавы, пластические массы с наполнителями, слоистые, тканевые и композиционные материалы. Во всех случаях базовым требованием является высокая проводимость, а для экранирования магнитных полей – высокая магнитная проницаемость.

Разработка новых материалов сводится к поиску технических решений, позволяющих обеспечить их высокие электрические показатели и хорошую технологичность.

В ряде случаев существенную роль играет масса экрана, что также привносит ряд специфических требований при выборе экранирующих материалов. В её основу положены методы придания проводящих свойств материалам, используемым для создания экранирующих оболочек для различных зон экранирования.

Требования рынка накладывают свои ограничения на выбор материалов. 31 июля 2006 г. вступила в силу Директива 2002/95/ЕС Европейского парламента, которая ограничивает применение ряда материалов для целей экранирования: свинца, ртути, кадмия, шестивалентного хрома, полибромистых дифенилов и полибромистых дифениловых эфиров – токсичных веществ, загрязняющих окружающую среду.

Поставщики электронной продукции работают над устранением названных веществ почти из всех новых изделий, разрабатываемых для продажи в Европе, и в то же время адаптируют свои технологические процессы к условиям бессвинцовой пайки. Эта директива получила название RoHS. Изделия, не соответствующие требованиям RoHS, не могут быть допущены на рынок в Европе.

Другие страны, включая Китай, Тайвань, Южную Корею и некоторые штаты США, создают свой, аналогичный RoHS, закон. Всё это означает, что соответствие правилам RoHS должно стать составной частью процесса разработки новых элементов электронной аппаратуры, его компонентов и узлов с проверкой требований RoHS на каждом его этапе: концепция, разработка, прототип, опытные образцы и серийное производство. Данные требования в полной мере относятся к процедуре выбора материалов для экранов, их составных частей и элементов, способствующих повышению эффективности экранирования.

Проектировщики должны создавать конструкции, которые снизят использование шести перечисленных выше вредных веществ. В ряде случаев конструкторам необходимо впервые учесть требования на токсичность как фактор, ограничивающий принятие проектных решений. Возможно, сегодня токсичность – наиболее важный параметр окружающей среды. Однако в ближайшие годы конструкторам придётся бороться также за эффективность использования энергии, пригодность к переработке для вторичного использования, снижение расхода материалов.

1.4. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В настоящее время ведутся обширные фундаментальные и прикладные исследования по созданию современных защитных материалов, способных тем или иным способом нейтрализовать электромагнитную среду, возникшую в результате практической деятельности человека. Среди основных направлений можно назвать следующие:

1. *Взаимодействие электромагнитных волн со сложными радиофизическими структурами и средами.* В ИТПЭ ОИВТ РАН [1.10] в течение многих лет развиваются методы расчета рассеяния на сложных объектах с учетом достижений как российской, так и зарубежных школ теории дифракции. Это связано с тем, что построение электродинамических моделей – один из основных подходов к исследованию электрофизических явлений в веществах как естественного, так и искусственного происхождения, а также характеристик и свойств конструкций на основе таких материалов. Особое место здесь занимают фундаментальные исследования, направленные на создание и изучение веществ и материалов с уникальными свойствами, которые не встречаются в природных веществах. \

Кроме того, в Институте проводятся исследования электродинамических свойств объёмных плазменных и плазменно-диэлектрических структур. В частности выполнены расчеты и измерения коэффициентов прохождения и отражения решеток из трубок с различными диаметрами и диэлектрическими проницаемостями в широком диапазоне СВЧ-частот как заполненных, так и не заполненных плазмой. Также выполнены расчеты и измерения однопозиционной эффективной поверхности рассеяния структур из тонких диэлектрических трубок, заполненных плазмой. Использовались либо прямые трубки, из которых были составлены плоские и цилиндрические решетки, либо дугообразные трубки, образующие полусферу. Результаты имеют прикладное значение для антенной техники, в частности, для создания управляемых электромагнитных экранов.

2. *Исследования магнитноактивных материалов* (материалы с колоссальным магнитным сопротивлением, сверхпроводники II рода). Изучение терромагнитных неустойчивостей в сверхпроводниках: скачки магнитного потока распространение нормальной зоны, дендритная неустойчивость и образование пространственных структур.

Электродинамика анизотропных высокотемпературных сверхпроводников: макротурбулентная неустойчивость, эффекты соизмеримости вихревой и кристаллической решеток, влияние поверхности, планарных и точечных дефектов на электродинамические свойства, сверхпроводники мезоскопических размеров. Внутренний эффект Джозефсона в слоистых высокотемпературных сверхпроводниках, плазменные моды, излучение «быстрых» вихрей в диапазоне ТГц – черенковское и переходное излучение, фотонные кристаллы в смешанном состоянии.

Электронные свойства магнитных оксидов: модель Кугеля-Хомского и фазовое расслоение, образование страйповых структур, гигантский изотоп-эффект в манганитах. Фазовая диаграмма материалов с колоссальным магнито-сопротивлением: исследования в рамках модели типа Кондо-решетки с примесями, двухзонная модель и перераспределение носителей тока между зонными и локализованными состояниями. Электронный транспорт в магнитных оксидах в состоянии фазового расслоения: сопротивление, магнитосопротивление, магнитная восприимчивость, спектр шума.

3. *Исследование процессов формирования метаматериалов и их взаимодействия с электромагнитными полями.* Проблема создания метаматериалов является ключевой при разработке новых многофункциональных и интеллектуальных материалов. Исследования по созданию новых метаматериалов с использованием вакуумного напыления металл-диэлектрических нанокompозитных систем, структурированных многослойных тонко-пленочных композитов. Создание экранирующих покрытий, работающих в оптическом, микроволновом и радио диапазонах. Разработка технологии напыления пленок железа с рекордно высокими, соответствующими лучшему мировому уровню, значениями высокочастотной магнитной проницаемости. Исследование влияния нано- и микро-структуры пленок, топологии композиционных структур и технологических параметров их формирования на частотные зависимости магнитной и диэлектрической проницаемостей. Будучи структурированы, эти пленки могут служить основой для создания многослойных материалов для микроволновых приложений с рекордными электрофизическими параметрами. Организация сборок композитных материалов с наполнением из тонких магнитных и диэлектрических пленок, демонстрирующих высокие свойства в микроволновом и радио диапазонах.

Разработка методов формирования упорядоченных и неупорядоченных систем на различных масштабах их линейных размеров - напо-

композитов, макроскопических сборок для фотонных кристаллов, макетов структур с отрицательными диэлектрической и/или магнитной проницаемостями и др. Экспериментальное и теоретическое исследование зонной структуры фотонных кристаллов, в том числе магнитно-фотонных и магнитостатических кристаллов. Разработка новых тонкопленочных систем на основе многослойных покрытий диэлектрик-структурированный металл-диэлектрик, получаемых методом послойного напыления прозрачных диэлектриков и металлов. Создание на этой основе многофункциональных покрытий, работающих в оптическом и радиодиапазонах. Разработка технологии производства многослойных энергосберегающих покрытий для остекления промышленных, жилых и административных зданий и транспортных средств.

4. Эффективные электродинамические параметры композитных материалов и неоднородных сред. Исследования проводятся по следующим направлениям:

- Разработка методов измерения диэлектрической и магнитной проницаемости материалов в СВЧ диапазоне;
- Исследования эффективных материальных параметров композитных и неоднородных материалов в СВЧ диапазоне;
- Разработка радиопоглощающих материалов и покрытий для СВЧ диапазона.

5. Исследования по выбору исходных компонентов и оптимизации рецептур и структур высокоэффективных многокомпонентных радиопоглощающих покрытий:

- Системы высокоэффективных радиопоглощающих эластомерных покрытий для модернизации эксплуатируемых в настоящее время и разрабатываемых объектов авиационной, морской, наземной и специальной техники.
- Системы радиопоглощающих покрытий на основе кремнийорганических эластомеров, работоспособные во всеклиматических условиях в интервале температур от -60 до $+200$ °С.
- Системы радиопоглощающих покрытий на основе полиуретановых эластомеров, работоспособные во все-климатических условиях в интервале температур от -60 до $+150$ °С.
- Системы радиопоглощающих покрытий на основе эпоксиуретановых эластомеров, перерабатываемые в условиях повышенной влажности и высокой (до 60 °С) температуры обрабатываемой поверхности и работоспособные в условиях тропического климата.

6. *Технология снижения радиолокационной заметности (СТЕЛС - технология)*. Хорошо известно, что важнейшие преимущества новых образцов оборонной техники обеспечиваются высокотехнологичными решениями, в числе которых – снижение радиолокационной заметности за счет применения специальных конструкций и материалов. Поэтому уже несколько десятилетий в мировой науке существует и развивается целое направление по моделированию объектов со сниженной заметностью, например, малозаметных летательных аппаратов. Трудоемкость решения соответствующих фундаментальных и прикладных задач объясняется сложностью структуры этих объектов и физических процессов формирования рассеянного поля, особенно в присутствии неоднородных сложных покрытий и сред. Исследования в этом направлении широко развернуты и в ИТПЭ ОИВТ РАН.

ГЛАВА 2. СОВРЕМЕННЫЕ ОТРАЖАЮЩИЕ ЭКРАНИРУЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ

2.1. ОСОБЕННОСТИ ОТРАЖАЮЩИХ ЭКРАНИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ

2.1.1. ИЗОТРОПНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

В зависимости от режима работы экрана могут быть рекомендованы вполне определенные материалы. Среди них: металлические, фольговые, полимерные, токопроводящие краски и лаки, металлизированные сетки, композитные материалы и др.

Ниже обсуждаются электрофизические параметры материалов, которые целесообразно использовать в тех или иных частотных областях, при тех или иных интенсивностях ЭМП помех.

Металлические материалы длительное время используются в практике электромагнитного экранирования, как правило, в виде металлических листов. Это объясняется тем, что высокая электрическая проводимость обеспечивает быстрое затухание электромагнитной энергии в толще металла, а большая разница между поверхностным сопротивлением металла и полным сопротивлением падающей волны приводит к значительному отражению поля от поверхности металла. В связи с этим даже сравнительно тонкие металлические листы обладают высокой эффективностью экранирования. Однако практика экранирования показывает, что чрезвычайно большие эффективности самого металла фактически реализуются лишь на 10-20% , поскольку основным фактором здесь является качество конструкции.

Металлические материалы выбирают из условий: достижения заданной величины ослабления ЭМП в рабочем диапазоне частот; устойчивости против коррозии; достаточной механической прочности; технологичности конструкции экрана и получения требуемых ее конфигурации и массогабаритных характеристик.

Электрофизические параметры ряда металлических материалов представлены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Электрофизические параметры ряда металлических материалов

при $f = 50$ Гц

Материал	Удельная электрическая проводимость, $\gamma, \times 10^7 \text{ Ом.м}^{-1}$	Относительная магнитная проницаемость, μ_r	Эквивалентная глубина проникновения, $\delta = \sqrt{(\pi f \gamma \mu)^{-1}}, \text{ м}$
Серебро	6,0	1	0,065
Медь	5,6	1	0,0672
Золото	4,0	1	0,0796
Алюминий	3,47	1	0,0854
Магний	2,16	1	0,108
Цинк	1,71	1	0,122
Латунь	1,48	1	0,1305
Никель	1,14	1	0,149
Бронза	1,03	1	0,157
Олово	0,85	1	0,173
Свинец	0,46	1	0,235
Сталь нержавеющая	0,11	1	0,480
Железо	0,15-0,96	1000-100	0,013-0,016
Пермаллой	0,17	80000	0,00137

В последнем столбце табл. 2.1 приведена эквивалентная глубина проникновения поля в материал и представляющая собой постоянную, характеризующую материал и определяемую в виде $\delta = \sqrt{2/(\omega \gamma \mu)}$; $\mu_r = \mu / \mu_0$ - относительная магнитная проницаемость, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$, Гн/м. Фактическая глубина проникновения высокочастотного ЭМП не определяется однозначно. Например, если полагать ее равной расстоянию от поверхности экрана, на котором поле уменьшается до 1% своего значения на поверхности, то получается величина, равная $4,6 \delta$. При 10 - процентном уменьшении получится

2,3 δ . Глубина проникновения будет равна δ , если уменьшение поля взять равным 1: $e=1:2,73$.

Как следует из табл. 2.1, первому требованию, предъявляемому при экранировании к металлическому материалу, удовлетворяют все применяемые в настоящее время листовые материалы (сталь, медь, алюминий, латунь и др.) при соответствующей их толщине.

Если рассматривать эффективность экранирования магнитными и немагнитными материалами одинаковой толщины в зависимости от частоты, то для разных частотных интервалов экранирующие свойства будут разными. Качественный вид эффективности экранирования в виде S^H в зависимости от частоты для магнитных и немагнитных металлов представлен на рис. 2.1.

В первом частотном интервале до $f_1 \in [3-10] \cdot 10^3$, Гц (зона I) магнитный экран работает в квазимагнитоэлектростатическом режиме и обладает лучшими экранирующими свойствами, чем немагнитный экран. Это объясняется тем, что на низких частотах МП замыкается через толщу магнитного экрана. С ростом частоты возрастает роль индукционных токов и повышенная магнитная проводимость экрана теряет смысл. Во втором частотном интервале до $f_2 = 10^6$, Гц (зона II) немагнитный экран имеет больший экранирующий эффект, чем магнитный. Это объясняется тем, что затухание отражением преобладает над затуханием поглощением, а немагнитные экраны лучше отражают поле. В третьем частотном интервале выше 10^6 , Гц (зона III) магнитные экраны обладают лучшими экранирующими свойствами, чем немагнитные. Это объясняется тем, что затухание поглощением превалирует над затуханием отражением, а магнитные экраны лучше поглощают энергию. Следует отметить, что в реальных экранах указанные свойства магнитных и немагнитных материалов проявляются слабо.

Преимущественное применение стали определяется условиями экономичности и технологичности конструкции. Преимущества стали теряются при экранировании элементов, по которым протекают токи, критичных к вносимым в них потерям. Так, сравнивая при прочих равных условиях потери мощности в экранах, выполненных из стали (P_{Fe}) и меди (P_{Cu}), полагая при этом $\Delta \gg \delta$, получаем

$$\frac{P_{Fe}}{P_{Cu}} = \sqrt{\left(\frac{\gamma_{Cu}}{\gamma_{Fe}}\right)_r}$$

где γ_{Cu} , γ_{Fe} - удельная электрическая проводимость соответственно меди и стали; Δ - толщина экрана.

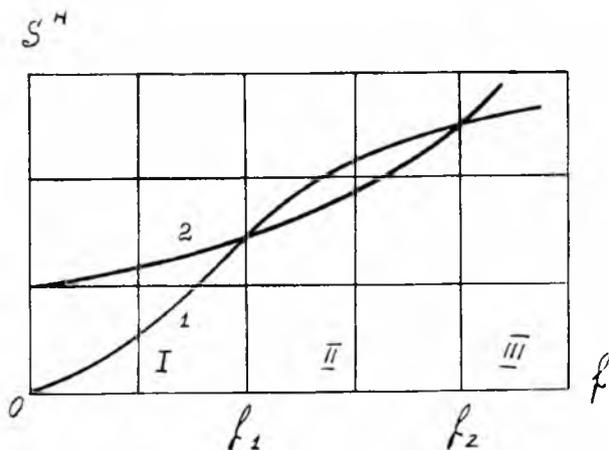


Рис. 2.1. Эффективность экранирования в зависимости от частоты для магнитных и немагнитных материалов [2.1, 2.5]

Поскольку $\gamma_{Cu} > \gamma_{Fe}$ и $\mu_r \gg 1$, потери в стали всегда выше. Поэтому применение стальных экранов в основном ограничивается из-за больших потерь в них.

При экранировании высокочастотных колебательных цепей и контуров цилиндрическими экранами с условием, что потери колебательной мощности не превышают 1%, радиус экрана должен быть не менее

$$R \geq 8,5 r_k \sqrt[3]{\frac{n^2 I^2}{\gamma \delta (l_k / r_k) P}} \quad (2.1)$$

где l_e, r_e - длина и радиус катушки, м; n - число витков катушки; I - ток в катушке, А; γ - удельная электрическая проводимость материала

экрана, C_m / m ; P - мощность генератора, $Вт$. Если в этом случае при прочих равных условиях применять стальные и медные экраны, то отношение их радиусов должно быть

$$\frac{R_{Fe}}{R_{Cu}} = \sqrt[6]{\frac{\gamma_{Cu}}{\gamma_{Fe}} \mu_r} \quad (2.2)$$

При $\gamma_{Cu} > \gamma_{Fe}$ и $\mu_r \gg 1$ $R_{Fe} > R_{Cu}$ и габариты стального

экрана оказываются больше чем медного. Например, если $\mu_r = 50$, то при одних и тех же потерях радиус стального экрана должен быть примерно в два раза больше радиуса медного экрана. Примерно так же выглядят результаты сравнения стали с другими немагнитными материалами при использовании их при электромагнитном экранировании высокочастотных катушек с большой добротностью. Эти результаты оказываются справедливыми для экранов любой формы.

Рассеиваемая мощность быстро падает с увеличением эквивалентного радиуса R_S экрана. Если необходимо уменьшить потери при заданном R_S или уменьшить R_S при заданных потерях, то экран следует изготавливать из меди или алюминия.

Для электромагнитного экранирования на высоких частотах могут быть успешно использованы тонколистовые материалы толщиной $(1 \div 5) \cdot 10^{-5}$ м. Однако, при их использовании нужно считаться с возможностью возникновения резонансных явлений, снижающих эффективность экранирования. Что касается обеспечения устойчивости против коррозии и механической прочности, то этому требованию могут удовлетворять практически все металлические материалы, включая фольговые и металлизированные сетки.

Наиболее технологичными являются конструкции экрана из листовой стали, поскольку при монтаже такого экрана можно использовать сплошные сварные швы.

В последнее время интерес к стальным листам в качестве экранирующего материала стал возрастать из-за возможности создать в них за счет направленной прокатки анизотропных магнитных материалов свойств различных магнитных проницаемостей по координатным осям, благодаря чему возможно существенное увеличение эффективности экранирования в заданных направлениях.

Фольговые материалы. К ним относятся электрически тонкие материалы толщиной $(1 \div 5) \cdot 10^{-5}$ м. В сортамент фольговых материалов входят алюминий, латунь, цинк. Монтаж фольговых экранов несложен, так как крепление фольги к основе экрана производится клеевой. Выбор клея должен производиться с учетом условий эксплуатации экрана, к которым относятся температурный режим, влажность, вибрационные нагрузки и др. Фольговые материалы применяются на токопроводящей конструкции экрана. Выбор толщины материала должен производиться с учетом возможностей возникновения резонансных явлений, что иллюстрируется графиками, приведенными на рис. 2.2, где показана эффективность экранирования материала в функции резонансной частоты или эквивалентного радиуса.

Расчет эффективности экранирования фольговыми материалами производится по формулам для электрически тонких материалов. Эффективность этих материалов достаточно высока при экранировании электрической напряженности ЭМП. Магнитную напряженность такие материалы ослабляют сравнительно мало и тем меньше, чем больше длина волны.

Полимерные материалы. Используются для уплотнений конструкций с полем СВЧ, которое чаще всего проникает через различные неплотные связи, разъемные соединители, щели и т. д. Наиболее перспективными являются уплотнения из электропроводящих полимерных материалов и резин, поскольку они обладают высокой эластичностью, стойкостью к многократным деформациям, влаго- и газонепроницаемости, малым удельным весом и хорошими технологическими свойствами. Поскольку электропроводные полимерные материалы и резины в отношении прохождения через них СВЧ - энергии в основном относятся к группе полупроводников, то общее ослабление электромагнитной энергии СВЧ - диапазона определяется выражением [2.4]

$$\mathcal{E}^F = \Delta \alpha + 10 \lg \left[\frac{1}{1 - (r_{\Sigma}^2)} \right], \text{ дБ} \quad (2.3)$$

где Δ - толщина материала; r_{Σ} - модуль амплитудного коэффициента отражения;

$$\alpha = 2\pi f \sqrt{\varepsilon \mu_0} \left[-0,5 + 0,5 \sqrt{1 + \frac{\gamma^2}{\varepsilon^2 4\pi^2 f^2}} \right]$$

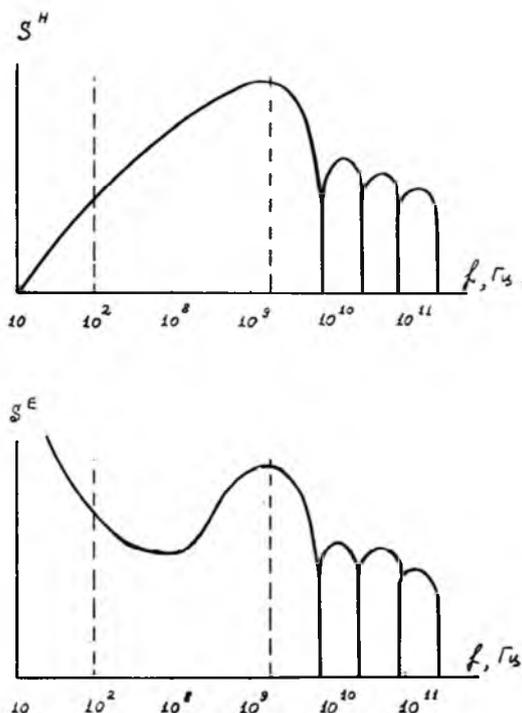


Рис. 2.2. Эффективность экранирования материалов при разных частотах [2.2]

$$r_{\Sigma} = \sqrt{\frac{\exp(2\alpha b) + \exp(-2\alpha b) - 2\cos(2\beta b)}{P_0^{-1} \exp(2\alpha b) + P_0 \exp(-2\alpha b) - 2\cos(2\beta b)}}; \quad (2.4)$$

$$P_0 = \left(\frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1} \right)^2; \quad z_2 = \sqrt{\frac{\mu^2}{\varepsilon^2 + \frac{\gamma}{4\pi^2 f^2}}}; \quad z_1 = \sqrt{\mu / \varepsilon} z$$

z_2, z_1 - волновое сопротивление полимерного материала и окружающей среды (в данном случае $z_1 = 377$ Ом); ε, μ - диэлектрическая и магнитная проницаемости материала; γ - удельная электрическая проводимость

димность материала; β - фазовый множитель (рад/м), характеризующий движение электромагнитной волны в материале и определяет фазовую скорость $v_{\phi} = \omega / \beta$.

Токопроводящие краски. Использование токопроводящих красок для электромагнитного экранирования является весьма перспективным направлением, так как позволяет быстро изготовить экран любого назначения. При этом может быть обеспечена эффективность экранирования не менее 30 Дб в широком диапазоне частот.

Токопроводящие краски создаются на основе диэлектрического пленкообразующего материала с добавлением в него проводящих составляющих, пластификатора и отвердителя. В качестве токопроводящих пигментов используются коллоидное серебро, графит, окиси металлов, порошковая медь, алюминий. Проводимость покрытий зависит от их толщины, от свойств и концентрации токопроводящего пигмента, от свойств пленкообразующего материала и других факторов.

Эффективность экранирования токопроводящими красками определяется, как и для электрически тонких материалов, по формуле [2.5]

$$\mathcal{E}^E = 20 \lg \frac{60\pi}{R_{\perp}} + 20 \lg 0,21 \frac{\lambda}{R_S}, \text{ дБ} \quad (2.5)$$

где R_{\perp} - поверхностное сопротивление; R_S - эквивалентный радиус экрана. Формула (2.5) справедлива при $\lambda \gg 2\pi R_S$.

Сеточные материалы. Находят широкое применение из-за ряда преимуществ, связанных с приемлемыми массогабаритными характеристиками, удобством в эксплуатации и т. д. В качестве материалов для их изготовления используют латунь, сталь, омедненную сталь и др. Существуют различные типы сеточных материалов: плетеные проволочные (для экранированных кабелей); металлические сетки с взаимноперпендикулярным набором проволок, ориентированно погруженных в диэлектрик, и т. д. Экранирующие свойства металлических сеток проявляются главным образом в результате отражения электромагнитной волны от поверхности. Параметрами сетки, определяющими ее экранирующие свойства, являются шаг сетки d , равный расстоянию меж-

ду соседними центрами проволоки, радиус проволоки r , удельная электрическая проводимость и магнитная проницаемость материала сетки.

Сеточные (проволочные) материалы широко применяются при экранировании отдельных рецепторов, групп рецепторов, помещений. Это связано с тем, что металлические сетки легки, экраны просты в изготовлении, удобны при сборке и эксплуатации, обеспечивают достаточный обмен воздуха, светопроницаемы и позволяют получать довольно высокую эффективность во всем диапазоне радиочастот. Недостатками являются: невысокая механическая прочность и снижение эффективности экранирования при старении. Уменьшение эффективности может иметь место из-за коррозии. Правда, последнего можно избежать, если покрывать антикоррозийным лаком.

Для сеточных экранов (рис. 2.3) с диаметром проволоки Δ можно воспользоваться выражениями (2.3), (2.4) для экрана с матрицей прямоугольных щелей, положив $\Delta = d$ и $K_1 = 0$. Если сеточный экран имеет шестигранные отверстия, можно воспользоваться выражениями (2.3), (2.4) для экрана с матрицей круглых отверстий, выбрав в качестве D и d , соответственно, расстояние между гранями b и толщину стенок Δ .

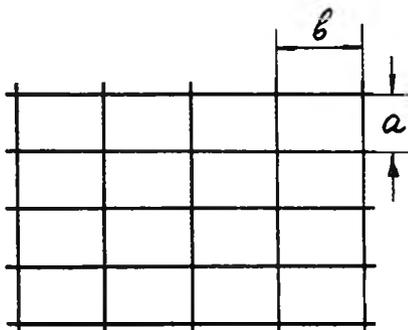


Рис. 2.3. Проволочный экран

Для приближенных оценок экранного затухания плоских сеточных экранов можно использовать при низких частотах формулу:

$$\mathcal{E}^F = 20 \lg |S^F| = 20 \lg \left[60\pi / (Ra) \right], \text{ дБ}, \quad (2.6)$$

где a - шаг сетки, м; R - сопротивление 1 м проволоки постоянному току, Ом/м.

Формула (2.6) может быть использована и для описания экранного затухания сплошного экрана, с повышением частоты поведение сетки начинает отличаться от поведения сплошного экрана. Эффективность сплошного экрана из-за ослабления поля при проникновении сквозь толщу экрана быстро растет, у сетки же это ослабление отсутствует. Поверхностный эффект приводит лишь к увеличению активного сопротивления 1 м проволоки. Это уменьшает эффект экранирования. Необходимо учесть возрастающую роль индуктивного сопротивления $X = \omega L$, из-за которого в формулу (2.6) должно быть введено $Z = |R + i\omega L|$. При $\omega L > 3R$ можно считать

$$\mathcal{E}^F = 20 \lg \left[60\pi / (\omega L a) \right], \text{ дБ.} \quad (2.7)$$

Следует отметить некоторые общие закономерности сетчатых экранов:

1. При $a/d = \text{const}$ (d - диаметр проволоки, м) редкие сетки из данного металла на низких частотах более эффективны, а на высоких частотах менее эффективны, чем густые. Эта закономерность объясняется тем, что активное сопротивление каждой проволоки на низких частотах обратно пропорционально d^2 , так что $Ra = \text{const} / D$, на высоких же частотах действует формула (2.7), в которой L мало зависит от d .

2. При одинаковых a и d медные сетки на низких частотах лучше стальных во столько раз, во сколько удельная проводимость меди больше, чем стали. С повышением частоты различие между этими сетками сглаживается, так как основную роль начинает играть внешняя индуктивность проволок.

3. При $a = \text{const}$ и одном и том же материале сетки из толстой проволоки эффективнее сеток из тонкой проволоки: в области низких частот S^F пропорционально d^2 , а в области высоких частот — при-

близительно пропорционально $\left(\ln \frac{2a}{d} - 1,2 \right)^{-1}$.

В ряде случаев целесообразно применять двухслойные сетчатые экраны. Их экранное затухание можно определить в виде

$$\mathcal{E}^F = 20 \lg \left[S_1^F S_2^F \left(4\pi d_{12} / \lambda \right) \right], \text{ дБ}, \quad (2.8)$$

где d_{12} - расстояние между слоями, м.

При $d \ll \delta$ двухслойный экран из сетки эффективнее однослойного из той же сетки. И если сплошные однослойные экраны не всегда эффективнее двухслойных, то экраны из сетки имеет смысл делать двухслойными.

Для шаровых сетчатых экранов можно использовать [2.1]

$$\mathcal{E}^F = 20 \lg \left[12,6\pi\lambda / (R_s R / a) \right], \quad (2.9)$$

где R_s - радиус шарового экрана.

Металлизация поверхностей. Получает все большее распространение благодаря большой производительности и универсальности методов нанесения покрытий. Чаще используется метод распыления. Нанесение металла на подложку осуществляется пульверизацией расплавленного металла струей сжатого воздуха. Химический состав покрытия отличается от исходного материала, а микроструктура покрытия состоит из наслаения различного размера частиц металла и окисных пленок. В процессе образования покрытия распыленные частицы металла ударяются с большой скоростью о поверхность подложки и деформируются. При этом образуется окисная пленка, свойства которой зависят от продолжительности полета частиц и активности металла. От ударов новых частиц пленка разрушается и вытесняется наружу, а частицы металла вступают в непосредственное соприкосновение, обеспечивая прочную связь с подложкой и непрерывную проводимость покрытия.

В качестве подложки можно использовать плотную бумагу, картон, ткань, дерево, текстолит, пластмассу, цементированные поверхности и др.

Металлизированные слои могут быть различной толщины. Толщина слоя зависит от свойств подложки. Количество наносимого слоя металла должно соответствовать физико-химическим свойствам материала подложки, его прочностным и деформационным характери-

кам. Так, для плотной бумаги слой металла не должен превышать 0,28 кГ/м², для ткани - 0,3 кГ/м². Для жесткой подложки количество наносимого металла существенно не ограничивается. Ограничения обуславливаются, в основном, массогабаритными характеристиками экрана.

В качестве покрытия чаще используется цинк. Средняя эффективность экранирования при этом может быть рассчитана по формуле [2.2]:

$$\mathcal{E}^F = 97 + 5 \lg d_0 - 20 \lg f, \text{ дБ}, \quad (2.10)$$

где d_0 - количество распыленного металла, кГ/м²; f - частота, МГц.

Эффективность экранирования алюминиевыми покрытиями примерно на 20 дБ выше, чем цинковыми. В общем случае при прочих равных условиях эффект экранирования металлизированным слоем ниже, чем сплошным листом той же толщины. Это объясняется отличием химического состава покрытия от структуры исходного металла, в результате чего проводимость покрытия обычно меньше проводимости самого металла.

Кроме рассмотренных здесь материалов при экранировании можно использовать стекла с токопроводящим покрытием; специальные ткани; радиопоглощающие материалы; электропроводные клеи и т. д.

В качестве перспективных материалов, существенно повышающих функции экранирования, рекомендуются анизотропные, композитные и составные материалы.

2.1.2. АНИЗОТРОПНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Необходимость расчета ЭМП в анизотропных средах возникает в самых различных практических задачах: геофизической разведки; исследования различных электромагнитных устройств с анизотропными ферромагнетиками и пьезоэлектриками; электрического моделирования движения вод в анизотропных грунтах; электрического нагрева различных анизотропных материалов и, конечно, изучения самих анизотропных материалов. При этом анизотропия материалов может быть самой различной. Она может быть обусловлена кристаллическим строением вещества, его микроструктурой и микроскопическими не-

однородностями рассматриваемой композиции. В последнем случае, рассматривая некоторую периодическую структуру, состоящую из изотропных составляющих, вводят средние эквивалентные параметры материала, которые зависят от направления векторов ЭП и МП.

Как правило, в системах экранирования используются негиротропные среды с ортогональной анизотропией, т. е. среды, в которых может быть выбрана такая ортогональная система координат, в которой удельные электрофизические параметры материала (диэлектрическая проницаемость, проводимость, магнитная проницаемость) выражаются диагональным тензором.

Часто встречающимся примером такой анизотропии является прямолинейная анизотропия. В материалах с прямолинейной анизотропией при выборе осей координат x, y, z , совпадающих с осями анизотропии, анизотропный параметр $\hat{\mathbf{v}} (\hat{\mathbf{v}} \in [\hat{\boldsymbol{\epsilon}}, \hat{\boldsymbol{\mu}}, \hat{\boldsymbol{\gamma}}])$, где $\hat{\boldsymbol{\epsilon}}$ - анизотропная диэлектрическая проницаемость, $\hat{\boldsymbol{\mu}}$ - анизотропная магнитная проницаемость, $\hat{\boldsymbol{\gamma}}$ - анизотропная электрическая проводимость, выражается тензором вида [2.5]

$$\hat{\mathbf{v}} = \begin{vmatrix} \mathbf{v}_x & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{v}_y & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{v}_z \end{vmatrix} \quad (2.11)$$

Прямолинейной анизотропией обладают, например, ферромагнитные ленты и пакеты пластин, слюда, кипы бумаги или ткани, различные волокнистые и слоистые структуры, грунты.

Вторым распространенным примером ортогональной анизотропии является аксиальная анизотропия, для которой в цилиндрических координатах r, α, z анизотропный параметр материала выражается также диагональным тензором

$$\hat{\mathbf{v}} = \begin{vmatrix} \mathbf{v}_r & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{v}_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{v}_z \end{vmatrix} \quad (2.12)$$

Примером материалов с аксиальной анизотропией могут явиться участки ротора электрической машины, изоляция кабелей, ленточные тороиды, мотки пряжи, древесина и др.

Реже приходится иметь дело со сферической анизотропией. Примером структуры, описываемой диагональным тензором в сферических координатах, является „луковичная“ структура многослойного ферромагнитного шара.

Рассмотрим некоторые важные случаи использования материалов с ортогональной анизотропией для экранирования ЭМП в широком диапазоне частот.

2.1.3. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ С АНИЗОТРОПНЫМИ СВОЙСТВАМИ, РЕКОМЕНДУЕМЫЕ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ЭКРАНОВ

Из анизотропных материалов, которые могут быть рекомендованы при изготовлении экранов в электротехнических устройствах, можно рассматривать диэлектрические, магнитные и проводниковые материалы для экранирования, соответственно, статических электрических, статических магнитных и электромагнитных полей. При этом представляют интерес лишь материалы с ортогональной анизотропией: оси анизотропии прямолинейны и совпадают с направлением трех основных векторов координатной системы. Следует отметить, что большинство анизотропных материалов удовлетворяют отмеченным условиям.

Из известных в настоящее время материалов с анизотропными свойствами интерес для целей экранирования представляют материалы, собранные в табл. 2.2.

Диэлектрические материалы рекомендуется использовать для защиты кабелей и токопроводящих шин, а также в качестве покрытия оболочек блоков электроники от воздействия электростатических полей.

Магнитные материалы рекомендуется использовать при экранировании статических магнитных полей, а также низкочастотных электромагнитных полей. Среди них:

- Холодно-катаные текстурированные материалы.
- Ферромагнитные ленты, изготавливаемые из холодно-катаных текстурированных сталей. Величина анизотропии в значительной мере определяется толщиной и шириной листов.

- Ферромагнитные пленки, полученные катодным распылением при одновременном воздействии магнитного поля.

- Спрессованные магнитно-проводящие материалы. Прессование проводится обработкой композиции порошков в пресс-форме магнитным полем и вибрацией.

- Композиционные магнитные материалы.

Проводниковые материалы рекомендуются при экранировании электромагнитных полей в широком диапазоне изменения частоты, среди них:

- Сплавы из проводящих материалов.

- Слоистые проводниковые материалы. Набираются из многослойной фольги, изготовленной из материалов с разной электрической проводимостью.

- Смеси, состоящие из нескольких механически объединенных компонент.

- Структурно анизотропные материалы, получаемые путем введения в матрицу однонаправленных стержней или чередующихся слоев наполнителей.

Количество разрабатываемых в настоящее время материалов весьма велико. Экспериментальное определение эффективных параметров многокомпонентных систем связано с трудоемкими затратами и технически достаточно сложно выполнимо. Эти обстоятельства стимулируют поиски расчетных методов прогнозирования свойств разрабатываемых композитов.

Анализ существующих материалов с анизотропными параметрами показывает, что созданию таких материалов не уделялось должного внимания, а поэтому не исчерпаны возможности их создания.

Следует принять во внимание, что анизотропные материалы являются средством повышения эффективности электромагнитных устройств путем:

- снижения паразитных вихревых токов в конструктивных элементах;

- перераспределения магнитных потоков в элементах устройств;

- перераспределения электрических токов на путях магнитных потоков.

Представляется целесообразным, наряду с использованием естественных анизотропных материалов, обратить внимание на создание композиционных и составных материалов.

В качестве композиционных материалов могут быть использованы также диэлектрические, магнитные и проводниковые материалы. При расчете их параметров необходимо рассматривать некоторую периодическую структуру, состоящую из анизотропных составляющих, вводя срединные эквивалентные параметры материала. При этом за счет создания новых технологий, использования ранее отмеченных способов стимулирования степени анизотропии (подмагничивания, вибрации, вытягивания и т. д.). В результате могут быть получены существенные анизотропные параметры $(v_t / v_n) \in [1 \div n] \cdot 10^n$, $n = 1, 2, 3$ ($V \equiv [\mu, \varepsilon, \gamma]$).

Таблица 2.2

Наименование материалов	Величина анизотропии $M^2 = (\chi_\phi / \chi_r), \chi = (\varepsilon, \mu, \gamma)$
Диэлектрические материалы Слюда Слоистые изоляционные материалы	$M^2 = (\varepsilon_\phi / \varepsilon_r)$ 1 ÷ 5 1 ÷ 5000
Магнитные материалы Холоднокатанные текстурованные материалы Ферромагнитные ленты Ферромагнитные пленки Спрессованные магнитнопроводящие материалы Композиционные магнитные материалы	$M^2 = (\mu_\phi / \mu_r)$ 1,5 ÷ 10 1 ÷ 500 1 ÷ 10 1 ÷ 10 1 ÷ 10
Проводниковые материалы Сплавы из проводящих материалов Слоистые проводниковые материалы Смеси из нескольких компонентов Структурно-анизотропные материалы	$M^2 = (\gamma_\phi / \gamma_r)$ 1 ÷ 10 1 ÷ 5000 1 ÷ 10 1 ÷ 10
Композиционные материалы Материалы волокнистого строения	$M^2 = (\chi_\phi / \chi_r)$ 1 ÷ 3000

При экранировании статических и квазистатических магнитных полей, с целью создания глубокого “магнитного вакуума” могут быть рекомендованы структуры, у которых проводящая (магнитная или электрическая) среда чередуется с непроводящей так, что $(\Delta \cdot / \Delta) \rightarrow const$. Такие составные экраны могут рассматриваться как сплошные с диагональной анизотропией параметров. Так, в случае магнитостатики, чередование весьма тонких ферромагнитных и немагнитных слоев в пределе, когда толщина отдельного слоя стремится к нулю, при сохранении общей толщины оболочки фиксированной, может рассматриваться как сплошная анизотропная среда с тензором:

$$\mu_{ik} = \hat{\mu} = \frac{\partial B_i}{\partial n_k} = \begin{vmatrix} \mu_n & 0 & 0 \\ 0 & \mu_t & 0 \\ 0 & 0 & \mu_t \end{vmatrix}, \quad (2.13)$$

где $i, k = 1$ соответствует радиальной координате, $i, k = 2$ и $i, k = 3$ – полярной и азимутальной угловым координатам соответственно (n и t – индексы нормального и тангенциального направлений к поверхности сферического слоя).

2.2. СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКРАНИРОВАНИЯ

Обеспечение электромагнитной совместимости современных технических средств и человека требует радикального повышения эффективности применяемых экранирующих устройств (пассивных, активных и комбинированных). Экранирование является наиболее распространенным и полно разработанным способом ослабления и локализации как стационарных, так и импульсных ЭМП в интересах устойчивости функционирования рецепторов путем ослабления индуктивных связей. В последние годы предпринята попытка выйти на оптимальные экраны, с целью снижения их массогабаритных показателей, что существенно для транспортных энергоустановок. В качестве мероприятий, оптимизирующих экранирующие оболочки и призванных увеличить их эффективность, которая, как известно, зависит от формы,

геометрических размеров экрана и от электрофизических параметров применяемых материалов, можно назвать:

- создание двухслойных оболочек с управляемым эксцентриситетом;
- создание оболочек с параметрическими неоднородностями: геометрическими и материальными;
- увеличение эффективности экранирования путем стабилизации магнитного состояния материала экрана и его подмагничивания;
- синтез многослойных оболочек с оптимальными экранирующими свойствами чередованием магнитно-проводящих и непроводящих слоев.

Необходимо отметить, что отмеченные мероприятия позволяют поднять эффективность экранирования в полтора - три раза при сохранении или даже некотором улучшении массогабаритных показателей. Отмечается, что диапазон выбора формы экранирующей оболочки с учетом направленности поля помех невелик. Применение комбинированных экранов (активных и пассивных) и многослойных приводит к усложнению и удорожанию экранирующих систем, к ухудшению их массогабаритных показателей. Столь же проблематичен путь повышения эффективности экранирования путем введения параметрических неоднородностей (по форме), поскольку связан со значительным усложнением и удорожанием конструкции экрана. Большой успех может быть достигнут благодаря правильному использованию известных и перспективных материалов:

$$\mu_t \approx \mu_0 \mu_n \frac{\Delta_s}{\Delta_s + \Delta_n}, \mu_n \approx \mu_0 \quad (2.14)$$

Для специальных экранов, защищающих ответственное электрооборудование, могут использовать многослойные сверхпроводники, изготовленные из материалов с анизотропными электрическими и магнитными свойствами. Дополнительно должны осуществляться следующие мероприятия:

- Подмагничивание ферромагнитного материала вдоль одной из осей. Это приводит к анизотропии материала - $(\mu_t / \mu_n) \in [1 \div 3]$.

- Охлаждение под растяжением ферромагнитных материалов - $(\mu_t / \mu_n) \in [1 \div 1,5]$.

- Дрессировка ферромагнитных материалов в сильных направленных магнитных полях с однонаправленным растяжением или сжатием - $(\mu_t / \mu_n) \in [1 \div 2,5]$.

2.3. КОНСТРУКЦИИ ОТРАЖАЮЩИХ ЭКРАНОВ

Пассивные экраны являются наиболее используемыми при обеспечении защиты технических устройств и человека от воздействия ЭМП.

По конструкции пассивные экраны можно подразделить на экраны замкнутые, открытые или полужамкнутые для МП и ЭМП. *Замкнутыми* назовем экраны, в которых магнитное и электромагнитное поля могут попасть на противоположную сторону экрана лишь путем проникновения сквозь его стенку. *Открытыми* назовем экраны, в которых главная часть поля способна попасть на противоположную сторону экрана путем его огибания. *Полужамкнутыми* можно назвать экраны, в которых поле попадает на противоположную поверхность экрана обоими выше упомянутыми путями. Такое разделение имеет большое значение с точки зрения проектирования экранирующих систем. Замкнутые экраны обладают наибольшей эффективностью. Экран, замкнутый в магнитном или электромагнитном смысле, не обязательно должен образовывать замкнутую механическую коробку. Это в основном зависит от структуры поля на поверхности экранируемого пространства и расположения экрана. В реальных экранах, за редким исключением, неизбежны отверстия и щели, которые образуют дополнительный канал для проникновения поля, снижая тем самым эффективность экранирования. Если стенки экрана тонки, а отверстия и щели незначительны, то поле за экраном создается в основном за счет проникновения сквозь стенки. Замена материала и утолщение стенок могут в этом случае повысить эффективность экранирования. Напротив, если стенки относительно толстые, а отверстия и щели значительны, то поле за экраном создается в основном за счет проникновения через эти отверстия и щели. Поэтому утолщение стенок малоэффективно.

Номинальное значение эффективности экранирования рассчитывается, исходя из требуемого подавления ЭМП помех, и определяется конкретными условиями проектирования аппаратуры. По найденному

значению эффективности экранирования, а так же с учетом допустимых пределов изменения параметров экранируемых элементов определяются материал, геометрические размеры экрана и условия размещения элементов внутри него. При этом необходимо иметь в виду, что эффективность экранирования в значительной степени зависит от неоднородностей и разрывов экрана, возникающих за счет сварных швов, соединений, отверстий и т. д. Помимо обеспечения заданной эффективности и согласно общему техническому заданию при его проектировании должны учитываться требования нормального теплового режима, пыле- и влагозащищенности, устойчивости к вибрационным и ударным нагрузкам, эргономики, технологичности конструкций.

Экранирование отдельных элементов и узлов аппаратуры производится в зависимости от их конструкции. Экран должен компоноваться в общем устройстве и обеспечивать нормальный тепловой режим, технологичность конструкции, ремонтпригодность и т. д.

Экран проектируется как самостоятельное сооружение для защиты от внешних ЭМП или локализации целого приборного комплекса, проведения специальных измерений в условиях, близких к условиям свободного пространства, а также для настройки и регулировки аппаратуры.

Для снижения электромагнитной и электростатической взаимосвязей между полями помех и рецепторами служит пассивное экранирование. Экраны предназначаются для локализации в некотором объеме пространства полей, создаваемых источниками электромагнитной энергии, с целью ослабления или исключения их воздействия на рецепторы. В зависимости от назначения различают экраны с внутренним возбуждением ЭМП, в которых обычно помещается источник помех, и экраны внешнего ЭМП, во внутренней полости которых помещаются рецепторы. В первом случае экран предназначен для локализации поля в некотором объеме, во втором - для защиты от воздействия внешних полей помех. Обе эти задачи часто формулируют как задачу экранирования от полей помех. Ее решение связано со всеми особенностями и закономерностями электромагнитных волн. К этой же задаче примыкает и экранирование ЭМП помех, создаваемых отдельными блоками или электрическими цепями, близко расположенными друг к другу. В таких случаях может идти речь о полях, создаваемых проводами, по которым протекает ток высокой частоты. Подобную задачу формулируют как задачу "экранирования от помехонесущих токов". Такое разделение задач экранирования от высокочастотных помех обычно делается как в целях систематизации методов решения задач, так и в интересах

упрощения расчета экранов. Обе задачи объединяются тем, что при их решении в самом общем случае должны быть применены электромагнитные экраны, одинаково хорошо защищающие рецептор от электрических и магнитных полей помех. Практическая реализация таких экранов возможна лишь в ограниченном количестве случаев (как правило, для однородных полей помех, однородных по форме и материалам экранов).

В ряде случаев задача экранирования электрических и магнитных полей может быть разделена. Такими случаями могут быть те, при которых одна из составляющих полей не имеет решающего значения для работы экранируемого устройства. Тогда можно отдельно рассматривать действие и расчет электрических и магнитных экранов.

Экранирование как техническое мероприятие призвано обеспечить надежность работы рецепторов: подавить до требуемого уровня влияние ЭМП помех, препятствующих эффективному функционированию рецепторов. Определение назначения экрана в каждом отдельном случае производится с учетом характера источника помех и рецепторов, их размеров, пространственного размещения, вида подводимых коммуникаций и допустимой величины воздействия экрана на экранируемые элементы.

Рассматривая группы или комплексы рецепторов, принято разделять их на сосредоточенные комплексы рецепторов и рассредоточенные. Сосредоточенные комплексы рецепторов размещаются в более ограниченных объемах пространства, обычно в пределах одного или нескольких совместно или близко расположенных объектах. При этом могут быть использованы групповые экраны с примерно одинаковыми геометрическими размерами по координатам. Рассредоточенные комплексы рецепторов размещаются в обширных объемах пространства. При этом должны быть использованы индивидуальные экраны или общие, но с неодинаковыми геометрическими размерами по координатам (например, круговые цилиндрические со значительным превышением длины над диаметром).

Экранирование является одной из основных мер ослабления и локализации ЭМП в интересах повышения устойчивости функционирования рецепторов. Однако эффективность экранирования в значительной степени зависит и от фильтрации электрических сетей управления, сигнализации, связи и электропитания, проходящих через экран, вводимых в экран и выходящих из него. Работоспособность любого самого совершенного экрана будет существенно снижена, если не препятствовать распространению электромагнитных колебаний вне и

внутри экранируемого пространства по этим сетям. Следовательно, фильтрация электрических сетей и линий является техническим мероприятием, сопутствующим электромагнитному экранированию в подавляющем большинстве его применений, а устройства, обеспечивающие фильтрацию, должны быть неотъемлемой частью системы экранирования. Предположим, что электромагнитная энергия выходит за пределы экранируемого пространства или входит в него только вследствие несовершенства экрана и недостаточной фильтрации сети. Тогда, если задана общая эффективность системы экранирования или системы подавления помех, ясно, что частные эффективности собственно экранирования и сопутствующей ему фильтрации в общем случае должны быть не хуже результирующей эффективности системы в целом. Потери эффективности подавления помех и затраты будут минимальными, если обе эти частные эффективности принять равными. Поскольку по трудностям реализации первой является частная эффективность собственно экранирования, ей в общем случае и приравнивается эффективность фильтрации.

Экранирование является одним из эффективных средств защиты рецепторов от действия мощного электромагнитного импульса при ядерных взрывах, а также от излучения радиолокационных установок, работающих в импульсном режиме. Необходимость экранирования должна быть обоснована и рассмотрена только после того, как полностью исчерпаны конструкторские методы оптимальной компоновки и размещения аппаратуры.

При создании отражающих экранов предпочтительными являются ниже рассмотренные материалы

Металлические материалы. Металлические материалы выбирают из условий:

- достижения заданной величины ослабления электромагнитного поля и его составляющих в рабочем диапазоне частот при соответствующих ограничениях размеров экранов и его влияния на экранируемый объект;
- устойчивости против коррозии и механической прочности;
- технологичности конструкции экрана и получения требуемых его конфигурации и высоко габаритных характеристик.

Первому требованию удовлетворяют практически все применяемые в настоящее время листовые материалы (сталь, медь, алюминий, латунь, так как при соответствующей их толщине обеспечивают доста-

точно высокую эффективность экранирования. Но в различных диапазонах рабочих частот при одинаковой толщине экрана эффективность экранирования магнитных и немагнитных материалов будет различной. То есть, пока экран работает как магнитоэлектрический, эффективность магнитных материалов значительно выше немагнитных. В электромагнитном режиме в полосе частот, где эффективность экранирования за счет отражения больше эффективности поглощения, немагнитные материалы, обладающие большей проводимостью по сравнению с магнитными материалами, обеспечивают более высокую эффективность.

Однако в реальных экранах указанные свойства магнитных и немагнитных материалов проявляются слабо. Ввиду экономических и конструктивных соображений предпочтение отдается стальным конструкциям экранов. Преимущества стали, теряются при экранировании токонесущих элементов, критичных к вносимым в них потерям, (т. е. применение стальных экранов ограничено из-за больших потерь, вносимых ими). Применение стали для экранов обусловлено еще тем, что при монтаже такого экрана можно широко использовать сварку.

Толщина стали, выбирается исходя из вида и назначения конструкции, условий ее монтажа и из возможности осуществления сплошных сварных швов. При сварке на переменном токе толщину берут примерно 1,5-2 мм, на постоянном токе - около 1 мм, при газовой сварке - 0,8 мм.

К недостаткам листовых металлических экранов можно отнести:

- высокую стоимость (бронза, серебро и т. д.);
- значительный вес и габариты;
- сложность пространственного решения конструкции;
- низкую эффективность самого металла, реализуемую лишь на 10-20% из-за несовершенства конструкции.

Металлизация поверхностей. Металлизация различных материалов для электромагнитного экранирования получает все большее распространение благодаря большой производительности и универсальности методов нанесения покрытий. Из существующих методов нанесения покрытий наиболее удобным является метод распыления расплавленного металла струей сжатого воздуха. Нанести металлический слой можно на любую поверхность таких материалов, как плотная бумага, картон, ткань, дерево, текстолит, пластмасса, сухая штукатурка, цементированные поверхности и др.

Металлизированные слои могут быть различной толщины. Толщина слоя не зависит от вида металла - покрытия, а зависит от свойств подложки (основания). Количество наносимого слоя металла должно соответствовать физико-химическим свойствам материала подложки, его прочным и деформационным характеристикам. Например, для плотной бумаги слой металла должен быть не более $0,28 \text{ кг/м}^2$, для ткани - до $0,3 \text{ кг/м}^2$. Для жесткой подложки количество наносимого металла существенно не ограничивается, т. к. более существенные ограничения обуславливаются высоко габаритными характеристиками экрана. Наиболее распространенным покрытием является цинк. Это покрытие технологично, обеспечивает сравнительно высокую эффективность экранирования, достаточную для многих экранов механическую прочность. Алюминиевые покрытия имеют эффективность на 20 дБ выше, чем цинковые, но они менее технологичны.

Следует заметить, что при прочих равных условиях эффективность экранирования металлизированным слоем ниже, чем сплошным листом той же толщины. Это объясняется тем, что проводимость нанесенного слоя меньше, чем проводимость исходного материала (металла). Металлизация поверхностей может успешно применяться для экранирования помещений и кабин, в условиях деления радиоэлектронных средств (РЭС) на отдельные экранированные отсеки при неметаллической общей несущей конструкции, для отдельных устройств, монтируемых в пластмассовых корпусах. Металлические поверхности наносят и на стеклянные поверхности. Стекла с токопроводящими покрытиями в основном используются в смотровых окнах и поисковых системах РЭС, в экранированных системах РЭС и камерах с целью обеспечения доступа в них света. Замкнутый экран из стекол с токопроводящим покрытием используют и тогда, когда требуется наблюдать за происходящим внутри экрана процессами. В настоящее время имеется номенклатура стекол с токопроводящими покрытиями, имеющих поверхностное сопротивление не менее 6 Ом при ухудшении прозрачности не более чем на 20%. Эффективность экранирования у таких стекол составляет примерно 30 дБ.

Наибольшее распространение получили пленки из оксида олова, так как они обеспечивают наибольшую механическую прочность, химически устойчивы и плотно соединяются со стеклянной поверхностью (подложкой).

2.4. РАСЧЁТ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОТРАЖАЮЩИХ ЭКРАНОВ ПРОСТЕЙШИХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ФОРМ

Методика расчета пассивных экранов для всего частотного спектра ЭМП примерно одинакова. Она состоит из следующих этапов:

- В зависимости от длины электромагнитной волны на рабочем месте, удаленном от источника излучения на расстояние d , определяются: плотность потока энергии (ППЭ), электрическая (E) или магнитная (H) составляющие напряженности ЭМП.

- Рассчитывается нужная степень ослабления ЭМП.

- Определяется толщина экрана в зависимости от используемого материала и нужной степени ослабления.

В зависимости от требуемой степени ослабления напряженностей ЭМП могут применяться разные конструкции экранов: сравнительно простые однослойные, ограниченные каноническими поверхностями с однородными параметрами материалов, так и сложные многослойные конструкции, ограниченные неканоническими поверхностями с нелинейными или неоднородными параметрами материала. К тому же выбор материалов для целей экранирования тоже достаточно велик. В дальнейшем рассмотрим формулы расчета лишь однослойных экранирующих оболочек разных геометрических форм, полученные методом теории длинной линии. При желании использовать многослойные экраны для получения большей эффективности экранирования следует обратиться к специальной литературе.

Однородные однослойные экраны. Применяются в технике экранирования экраны многообразных форм как канонических, так и неканонических. Столь же многообразны подходы к их расчету. Здесь используется единый подход, основанный на теории длинной линии.

Широкое распространение находят классические разновидности экранов: плоские, цилиндрические и сферические. Формулы для их расчета относительно МП, обусловленного поперечно-магнитной волной (ТМ) и ЭП, обусловленного поперечно - электрической волной (ТЕ), имеют принципиально одинаковую структуру [2.5]:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}^F = & 20 \lg |chk_M \Delta| + \\ & + 20 \lg \left| 1 + 0,5 \left(N + \frac{1}{N} \right) thk_M \Delta \right|, \text{ дБ} \end{aligned} \quad (2.15)$$

где $N = Z_D^F / Z_M$; Z_M, Z_D^F — волновое сопротивление металла и диэлектрика, соответственно (при этом $Z_D^F = (Z_D^E, Z_D^H)$);
 $k_M = \sqrt{i\omega\mu\gamma}$ — коэффициент распространения электромагнитной волны в металле; Δ — толщина слоя металла; i — мнимая единица;
 $Z_M = \sqrt{i\omega\mu / \gamma}$.

Формула (2.15) справедлива для расчета экранного затухания $\mathcal{E}^F = (\mathcal{E}^E, \mathcal{E}^H)$ в широком диапазоне частот (от нулевой до СВЧ) и при любом режиме использования экранов. Первый член формулы (2.15) — $20 \lg |chk_M \Delta|$ обусловлен тепловыми потерями на вихревые токи в металле экрана и не зависит от вида поля. Второй член формулы

(2.15) — $20 \lg \left| 1 + 0,5 \left(N + \frac{1}{N} \right) thk_M \Delta \right|$ связан с несоответствием волновых характеристик металла, из которого изготовлен экран (Z_M), и диэлектрика, окружающего экран (Z_D^F), чем больше между ними различие, тем сильнее эффект затухания отражения. Форма экрана влияет на величину волнового сопротивления, оказываемого диэлектрической средой различным видам волн [2.4]:

- для плоской волны (плоский экран):

$$Z_D^E = 1 / (2i\omega\epsilon r_s); Z_D^H = 2i\omega\mu r_s, \quad (2.16)$$

- для цилиндрической волны (круговой цилиндр):

$$Z_D^E = n / (i\omega\epsilon r_s); Z_D^H = i\omega\mu r_s / n, \quad (2.17)$$

- для сферической волны (сферический экран):

$$Z_D^E = n\sqrt{2} / (i\omega\epsilon r_s); Z_D^H = i\omega\mu r_s / (n\sqrt{2}), \quad (2.18)$$

где n - индекс типа волны, а геометрические соотношения соответствуют рис. 2.4.

Для практически интересующих нас частотных спектров ($f \leq 10^8$, Гц) и конструкций экранов существует неравенство $N > 1/N$. Тогда экранные затухания плоского, кругового, цилиндрического и сферического экранов (при $n=1$) будут соотноситься приблизительно как 1 : 0,5 : 0,33. Таким образом, если экранное затухание плоского экрана принять за единицу, то экранное затухание кругового цилиндрического экранов будет в два раза меньше, а сферы - в три раза меньше. Следовательно, по эффективности экранирования экраны можно расположить в последовательности: плоский экран, круговой цилиндр, сфера. Это соотношение справедливо для экранов, изготовленных из одинакового металла и с равными толщинами стенок, причем расстояние между параллельными пластинами плоского экрана равно диаметру сферического или кругового цилиндрического экранов.

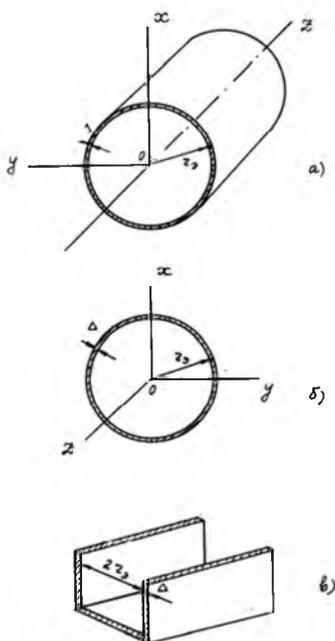


Рис. 2.4. Экраны простейших форм

Преимущество кругового цилиндра по сравнению со сферой, а плоского экрана по сравнению с обеими этими конструкциями обусловлено тем, что плоская волна имеет лучшее соотношение волновых сопротивлений диэлектрика и металла и поэтому происходит большее отражение волны на границах диэлектрик-экран-диэлектрик и соответственно обеспечивается больший эффект отражения.

Конструктивная форма экрана сравнительно мало влияет на его экранирующие характеристики (при $\lambda \ll r_0$). Решающее значение имеет материал, из которого экран изготовлен; его толщина Δ и радиус r_0 . Малое влияние формы экрана позволяет в практике расчета и конструирования экранов, а также при определении эффективности существующих экранов применять приведенные формулы экранирования плоского, кругового цилиндрического и сферического экранов к экранам, близким им по конструкции. Так, например, если имеется вытянутый экран с прямоугольным сечением, то его можно заменить круговым цилиндрическим экраном, если его стороны примерно равны, и плоским, если он имеет существенно не равные стороны. Экраны различной конфигурации, имеющие по всем трем координатам почти одинаковую протяженность, следует для расчета заменять эквивалентным сферическим экраном.

Для магнитных экранов действует обратная закономерность. Экранированные затухания плоского, кругового цилиндрического и сферического экранов соотносятся как 1: 2: 3, т. е. по экранирующему эффекту на первом месте находится сфера. Эта закономерность имеет следующее физическое объяснение. Магнитостатический экран действует на принципе замыкания магнитного потока в магнитной массе экрана. Чем меньше сопротивление экрана этому потоку, тем больше экранирующий эффект. Конструкция экрана в виде сферы или кругового цилиндра более полно отвечает этому требованию по сравнению с плоским экраном.

Основные рекомендации по проектированию однослойных экранов [2.1]:

1. При экранировании напряженности низкочастотного МП большой амплитуды целесообразно использовать либо ферромагнитные, либо немагнитные экраны, но с высокой электрической проводимостью. При использовании в качестве экранов ферромагнитных оболочек полезны следующие предложения:

– необходимо обеспечить высокую магнитную проницаемость материала, поэтому желательно применение магнитно-мягких материалов, а для повышения начальной магнитной проницаемости можно использовать подмагничивание;

– толщина оболочки должна быть достаточно велика, чтобы обеспечить минимальное магнитное сопротивление материала экрана; не рекомендуется выбирать длинные конструкции экранов;

– расстояния между экраном и магнитопроводами других элементов должны быть наибольшими, чтобы магнитное сопротивление внешней среды было большим по сравнению с магнитным сопротивлением экрана.

2. При экранировании многополюсного электрооборудования необходимо применять экраны из магнитно-мягких материалов из следующих соображений. Экранирующее действие магнитных экранов определяется не только макроскопическими токами, протекающими в его стенках, но и намагниченностью материала. Экран образует для магнитных силовых линий путь с малым сопротивлением, и величина магнитного потока, проходящего внутрь, зависит от магнитного сопротивления материала оболочки. Увеличение числа полюсов источника приводит к возрастанию экранирующего действия ферромагнитной оболочки. Экранирующее действие немагнитных оболочек обусловлено реакцией вихревых токов, протекающих в материале оболочек под действием поля. С изменением числа полюсов источника магнитного поля изменяется и число эквивалентных контуров, образуемых вихревыми токами в материале экранов. При этом изменяются сопротивление и индуктивность контуров, что приводит к изменению фазы между магнитными потоками в материале оболочек, к возрастанию результирующей составляющей напряженности магнитного поля.

3. При расчете экранов, находящихся вблизи мощных источников помех, необходимо учитывать изменение динамической магнитной проницаемости в зависимости от напряженности поля, а также мощность потерь в экране.

4. Экранирующие оболочки и конструкции необходимо заземлять, особенно в транспортных энергоустановках, так как в противном случае сам экран может явиться источником ЭМП помех нежелательного частотного диапазона, заземление необходимо также для обеспечения безопасности персонала.

5. При проектировании необходимо установить характеристики источников магнитных полей помех, в связи с которыми выбираются электрофизические параметры, толщина и форма экрана.

Однородные многослойные экраны. Применяются в случаях, когда необходимы высокое экранирующее действие от сильных полей и малые вносимые потери. Они состоят из последовательно чередующихся слоев магнитно-мягких (сталь, пермаллой) и немагнитных (медь, алюминий, латунь) материалов, между которыми может быть или отсутствовать слой диэлектрика. Название экрану дается по числу металлических слоев. Такие экраны эффективны в широком диапазоне частот, включая область низких частот, а значит эффективны для защиты от воздействия импульсных ЭМП. В случае однослойного магнитного экрана при большой напряженности поля помех материал экрана насыщается. Это приводит к снижению его магнитной проницаемости и эффективности экранирования. Чтобы исключить насыщение и перевести экран в линейный режим работы, слой составного двухслойного экрана, обращенный к источнику магнитного поля, выполняется из магнитно-мягкого материала с низкой магнитной проницаемостью, имеющего высокий уровень насыщения, или немагнитного металла, а второй слой - из материала с высокой магнитной проницаемостью, имеющего низкий уровень насыщения. При этом первый слой экрана уменьшает напряженность магнитного поля до значения, не вызывающего насыщение второго слоя, который и обеспечивает в основном экранирование.

Для определения параметров многослойных экранов, как и однослойных, удобно пользоваться волновым методом. Для компактности записи для оценки эффективности экранирования используем коэффициенты экранирования в виде [2.1-2.2]:

- для двухслойного экрана

$$K_{12}^F = \frac{K_1^F K_2^F}{1 - W_1^F W_2^F}; \quad (2.19)$$

- для трехслойного экрана

$$K_{123}^F = \frac{K_1^F K_2^F K_3^F}{(1 - W_1^F W_2^F)(1 - W_2^F W_3^F) - K_1^F K_3^F (W_2^F)^2}. \quad (2.20)$$

В выражениях (2.19) – (2.20):

$$K_j^F = \frac{1}{chk_{Mj} \Delta_j [1 + 0,5 \left(N_j + \frac{1}{N_j} \right) thk_{Mj} \Delta_j]};$$

$$W_j^F = \frac{0,5 \left(\frac{1}{N_j} - N_j \right) thk_{Mj} \Delta_j}{1 + 0,5 \left(\frac{1}{N_j} + N_j \right) thk_{Mj} \Delta_j} \quad ; \quad N_j = \frac{Z_{Mj}}{Z_D^F}$$

Наиболее широкое применение имеют трехслойные экраны с наружными слоями из одинакового металла. Для таких экранов

$$K_{121}^F = \frac{(K_1^F)^2 K_2^F}{(1 - W_1^F W_2^F)^2 - (K_2^F W_1^F)^2} \quad (2.21)$$

В принципе формулы (2.19), (2.20) можно переписать и для экранного затухания. Например, экранное затухание \mathcal{E}_{12}^F для двухслойного экрана можно записать в виде:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{12}^F = & 20 \lg |chk_{M1} \Delta_1| + 20 \lg |chk_{M2} \Delta_2| + \\ & + 20 \lg \left| 1 + 0,5 \left[\left(\frac{Z_D^F}{Z_{M1}} + \frac{Z_{M1}}{Z_D^F} \right) \times \right. \right. \\ & \times thk_{M1} \Delta_1 + \left. \left(\frac{Z_D^F}{Z_{M2}} + \frac{Z_{M2}}{Z_D^F} \right) thk_{M2} \Delta_2 + \right. \\ & \left. \left. + \frac{Z_{M1}}{Z_D^F} \right) th \left(\frac{Z_{M2}}{Z_{M1}} + \frac{Z_{M1}}{Z_{M2}} \right) thk_{M1} \Delta_1 thk_{M2} \Delta_2 \right] \right|, \text{ дБ, } (2.22) \end{aligned}$$

где k_{Mj}, Z_{Mj} ($j=1,2$) - параметры j -го слоя, рассчитываются по (2.15); Z_D^F - рассчитываются по (2.16).

По формулам двухслойного экрана можно рассчитать многослойный путем попарного рассмотрения соседних слоев и затем образовавшихся пар.

Анализ формулы (2.22) показывает, что характер частотной зависимости \mathcal{E}^F в основном такой же, как и для однослойных экранов при соответствующих режимах работы. Затухание поглощения не зависит от типа экранируемой волны и равно сумме затухания в отдельных слоях. Затухание за счет отражения состоит из отражений от границ всех слоев и для различных видов волн имеет разные значения и частотную зависимость.

Основные рекомендации по проектированию многослойных экранов:

1. Многослойную конструкцию следует применять при экранировании напряженности низкочастотных магнитных полей большой интенсивности как с целью повышения эффективности экранирования, так и с целью более рационального их конструирования (уменьшения массы и габаритов).

2. Внутренние слои многослойного экрана для обеспечения большего экранирующего действия и достижения минимальных потерь, вносимых в рецепторы, следует выполнять из немагнитных материалов.

3. Должны быть выдержаны определенная толщина стенок и оптимальные расстояния между ними. Эффективность экранирования многослойным экраном достигает максимального значения в случаях, когда толщина стенок и промежутки между экранами увеличиваются пропорционально от центра экрана. Величина каждого промежутка является средней геометрической величиной толщины стенок примыкающих к нему слоев. Такие экраны могут использоваться, если по условиям проектирования допускается некоторое увеличение габаритных размеров и массы экранов.

4. При экранировании низкочастотных или статических магнитных полей можно рекомендовать к использованию многослойные проводящие электрический ток магнитные экраны. Их действие не сводится к простому ослаблению напряженности падающего поля, а приводит к существенному уменьшению неоднородности поля в полости экрана.

Необходимо отметить, что конструкции многослойных экранов достаточно сложны и громоздки [2.1-2.3]. Поэтому при проектировании рецепторов следует рассматривать возможные способы изменения компоновки элементов рецептора для снижения влияния ЭМП помех, а также искать путь повышения эффективности экранирования однослойного экрана [2.4-2.7].

ГЛАВА 3. МАТЕРИАЛЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЙ

3.1. ОСОБЕННОСТИ СВЧ ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СПЕКТРА

СВЧ область электромагнитного спектра занимает диапазон частот от 300 МГц до 30 ГГц. Длинноволновые военные радары работают на частотах около 450 МГц; UHF телевизионные каналы – от 470 до 870 МГц; сотовые мобильные телефоны - около 900 МГц; спутниковые навигационные системами (GPS, ГЛОНАС) - выше 1 ГГц; космические телеметрические системы - около 2 ГГц; станции тропосферной связи - свыше 2 ГГц; радары для управления движением самолетов - свыше 3 ГГц; различные радиорелейные системы - около 4 ГГц. Коммуникационные спутниковые системы используют диапазон частот от 4 до 7 ГГц; контроль воздушного пространства осуществляется на частотах около 10 ГГц; милицейские радары работают на частотах 24 ГГц и 10,25 ГГц. Частоты от 20 до 30 ГГц предназначены для перспективных спутниковых коммуникационных систем.

Диапазон частот от 30 до 300 ГГц характеризуется повышенным поглощением атмосферой. ЭМП различной частоты используются в качестве приемо-передающего, управляющего или энергетического канала, разделенного во времени и по частоте с помощью радиотехнических устройств и локализованного в пространстве с помощью антенных устройств и экранов.

Электромагнитное излучение (ЭМИ) радиочастотного диапазона, формируемое радиоэлектронными средствами, отличается от естественного фона по своим частотным и мощностным характеристикам и вносит дополнительный вклад в реакцию биологических объектов. Зачастую реакции биообъектов трудно предсказуемы и носят комплексный характер.

При этом особо актуальной проблемой является подавление нежелательных (паразитных) ЭМИ, возникающих из-за несовершенства конструкций излучающих блоков, оказывающих наиболее сильное влияние на человеческий организм вследствие незначительного удаления от источников излучения и образующих дополнительный электромагнитный канал утечки информации.

Актуальность разработки высокоэффективных, широкополосных, технологичных и удобных в эксплуатации экранирующих и радиопоглощающих материалов обуславливается не только проблемами

биологического воздействия ЭМИ, а также и высокой потребностью в таких материалах при разработке и усовершенствовании конструкций изделий радиоэлектроники, устройств защиты информации и военной техники.

3.2. ЭКРАНИРУЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ В СВЧ ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СПЕКТРА

3.2.1. ЗАЩИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ В СВЧ ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРО- МАГНИТНОГО СПЕКТРА

Эффективность экранирующих устройств определяется электрическими и магнитными свойствами материала экрана, конструкцией экрана, его геометрическими размерами и частотой излучения.

Для уменьшения ЭМИ РЧ защитные устройства должны представлять собой электрически и магнитно-замкнутый экран. В этом случае можно рассчитывать на значительное ослабление помехонесущего сигнала (см. табл. 3.1).

Таблица 3.1

Наименование материала	ГОСТ, ТУ	Электрически и магнитно-замкнутый экран		
		Толщина, мм	Диапазон частот, Гц	Ослабление, Дб
Листовая Ст.3	ГОСТ 19903-74	1,4	30 МГц - 40 ГГц	100
Фольга алюминиевая	ГОСТ 618-73	0,08		80
Фольга медная	ГОСТ 5638-75	0,08		80
Сетка стальная тканая	ГОСТ 5336-73	0,3 - 1,3		30
Радиозащитное стекло с одно- или двухсторонним полупроводниковым покрытием	ТУ 21-54-6 или 41-73		30 МГц - 30 ГГц	20-40
Ткань хлопчатобумажная с микропроводом	ОСТ 17-28-70		10 кГц - 30 ГГц	20-40

Наименование материала	ГОСТ, ТУ	Электрически и магнитно-замкнутый экран		
Ткань металл-зи-рованная "Восход"				40-65
Ткань трико-таж-ная (поли-амид + прово-лока)	ТУ 6-06-С202-90		300 кГц - 30 МГц	15-40

3.2.2. СВОЙСТВА РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ

Радиопоглощающие материалы (РПМ) используют для поглощения электромагнитных волн и в средствах защиты от воздействия ЭМП. Кроме того, РПМ широко используются для снижения заметности в радиолокационном диапазоне различных стационарных, двигающихся и летающих объектов.

При взаимодействии падающей электромагнитной волны с РПМ происходит ее поглощение, рассеяние, а в некоторых типах РПМ - интерференция. В результате этих процессов происходит диссипация энергии падающей волны в поглощающем покрытии, и отраженная волна становится незначительной. Требования, предъявляемые к РПМ, имеют противоречивый характер. С одной стороны, для обеспечения малого отражения падающей волны от поглощающего покрытия требуется, чтобы его свойства не сильно отличались от свойств свободного пространства, т. е. среды, в котором распространяется волна. Иными словами, на границе раздела «среды - поверхность РПМ» не должно быть заметного скачка коэффициентов преломления. При этом падающая волна без заметных отражений на границе раздела «втянется» в поглощающее покрытие с последующим поглощением и рассеянием.

Таким образом, для выполнения этого требования необходимо, чтобы комплексное волновое сопротивление \tilde{Z} поглощающего покрытия стремилось по абсолютной величине к волновому сопротивлению

свободного пространства, равному $Z_0 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0} = 377$ Ом, т. е.

$|\tilde{Z}| \rightarrow Z_0$. При этом коэффициент отражения \tilde{R} равный $(\tilde{Z} - Z_0) / (\tilde{Z} + Z_0)$, стремится к нулю.

С другой стороны, для эффективного поглощения волны необходимо, чтобы среда обладала значительными потерями. При этом, мнимые части ε'', μ'' комплексных диэлектрических $(\tilde{\varepsilon} = \varepsilon' - i\varepsilon'')$ и магнитных $(\tilde{\mu} = \mu' - i\mu'')$ проницаемостей должны иметь высокие значения. Величины ε'', μ'' и $\text{tg}_\varepsilon^\delta = \varepsilon'' / \varepsilon'$; $\text{tg}_\mu^\delta = \mu'' / \mu'$ определяют потери электромагнитной энергии в среде на различных частотах. При выполнении этих условий волновое сопротивление РПМ \tilde{Z} значительно отличается от волнового сопротивления свободного пространства Z_0 и коэффициент отражения \tilde{R} увеличивается. Для согласования этих двух требований используют ряд мер, учитывающих назначение и область применения РПМ, диапазон частот его работы, требования к массогабаритным характеристикам, особенности эксплуатации и т. п.

По принципу действия РПМ делятся на две большие группы: объемные поглотители и резонансные (интерференционные) поглотители.

В *объемных поглотителях* используется объемное поглощение электромагнитной энергии за счет внесения электрических или магнитных потерь. Поглощающие материалы этого типа состоят из основы и наполнителя. В качестве основы используются различные каучуки, пенопласты и другие органические связующие. В качестве наполнителей используются порошки графита, угольной и ацетиленовой сажи, порошки карбонильного железа, ферриты, тонкие металлические волокна и т. п. Количество наполнителя достигает 40% (массовых). При дальнейшем увеличении концентрации металлических частиц мощность поглощенной энергии уменьшается из-за увеличения отражения от металлических образований. Для уменьшения эффекта отражения внешние слои поглотителя имеют незначительные концентрации наполнителя по сравнению с более глубокими слоями. Внешнюю поверхность объемных поглотителей часто выполняют в виде шипов, имеющих форму конуса или пирамиды. Для защиты от внешних источников ЭМП стены зданий можно покрывать пористым бетоном с примесью графита, волосяными матами, пропитанными неопреном и угольной сажой, многослойными строительными материалами и т. п.

В настоящее время используются множество разнообразных объемных поглотителей. К числу их достоинств относится высокое поглощение энергии магнитного поля с малым коэффициентом отражения в широком диапазоне частот. К числу недостатков можно отнести относительно большие массогабаритные параметры.

Резонансные (интерференционные) поглотители представляют собой композицию из чередующихся слоев диэлектрика проводящих пленок металла. Толщина диэлектрика составляет четверть длины волны падающего излучения или кратна нечетному числу $\lambda/4$. Принцип действия таких систем основан на интерференции падающей волны и образовании в них стоячих волн. Такие поглотители обладают низким коэффициентом отражения, малой массой, компактностью, но недостаточной широкополосностью.

В ряде случаев применяются комбинированные РПМ, представляющие собой сочетание резонансных и объемных поглотителей. Удельную мощность потерь в диэлектрике рассчитывают по формуле:

$$w_v = \sigma E^2 = \omega \varepsilon_0 \varepsilon' \operatorname{tg} \delta E^2 \cong 0,556 \cdot 10^3 \varepsilon'' \nu E^2$$

Различные разновидности РПМ не исчерпываются приведенными типами. В настоящее время ведутся разработки различных типов РПМ как с точки зрения совершенствования свойств существующих композиций в части увеличения поглощающей способности, значительного снижения отражательной способности и массогабаритных характеристик, увеличения диапазона частот, повышения устойчивости и прочности, так и с точки зрения принципиально новых типов РПМ. В равной степени при этом уделяется внимание видам РПМ как коллективного, так и индивидуального пользования.

Определенные успехи достигнуты в разработке радиопоглощающих материалов для средств переносной радиосвязи. Начиная с 2010 года в Санкт-Петербурге на опытном производстве компании "Лаотэк" создаются защитные изделия ЭМИН-NF из радиопоглощающего материала марки ЭМИН. Принцип работы основан на фронтальном экранировании, локальном радио-поглощении вредных для здоровья владельцев мобильных устройств связи электромагнитных излучений широкого радиочастотного диапазона на наиболее опасном расстоянии (0-5см). Защитный мини-аксессуар ЭМИН-NF создает устойчивую радио-тень, которая и защищает наиболее уязвимые области слухового прохода, слухового нерва и прилегающей части височной доли мозга.

Радиопоглощающие материалы или РПМ и радиопоглощающие покрытия или РПП представляют класс материалов, в первую очередь применяемых в технологии снижения заметности («стелс-технология») для маскировки средств вооружения и военной техники от обнаружения радиолокационными средствами противника. Являются составной частью общего направления, связанного с разработкой средств и методов уменьшения демаскирующих признаков оружия и военной техники в основных физических полях. При взаимодействии электромагнитного излучения с РПМ происходят одновременные процессы поглощения, рассеяния (вследствие структурной и геометрической неоднородности материала) и интерференции радиоволн.

Различие между собственно материалами (РПМ) и покрытиями (РПП) до некоторой степени условно и предполагает, что первые входят в состав конструкции объекта, а вторые - как правило, наносятся на его поверхности. Условность разделения связана и с тем обстоятельством, что любой радиопоглощающий материал является не только материалом, но микроволновым устройством-поглотителем. Способность материала поглощать высокочастотное излучение зависит от его состава и структуры. РПМ и РПП не обеспечивают поглощения излучения любой частоты, напротив, материал определенного состава характеризуется лучшей поглощающей способностью при определенных частотах. Не существует универсального поглощающего материала, приспособленного для поглощения излучения радиолокационной станции (РЛС) во всем частотном диапазоне.

Существует распространенное заблуждение относительно того, что в результате применения РПМ объект становится невидимым для локаторов. В действительности, применение радиопоглощающих материалов способно лишь существенно снизить эффективную поверхность рассеяния объекта в конкретном диапазоне частот РЛС, что, однако не обеспечивает полную «невидимость» объекта при иных частотах излучения. РПМ являются лишь слагаемым обеспечения низкой заметности объекта, среди которых: конфигурация летательного аппарата (ЛА); конструктивно-компоновочные решения; широкое применение композиционных материалов, отсутствие собственных излучений и т.п.

Историческая справка. Самая первая разновидность РПМ, известная под маркой Schornsteinfeger (по кодовому названию проекта по защите подводных лодок от обнаружения РЛС союзников, установленных на противолодочных самолётах), представляла лёгкий слоистый материал, применённый немцами в годы Второй мировой войны для уменьшения отражающей способности шноркеля (перископа) подвод-

ных лодок при облучении РЛС с рабочей длиной волны от 3 до 30 см. При толщине РПМ, равной 75 мм, структура материала представляла семь последовательно расположенных слоев графито-наполненной полупроводящей бумаги, разделённых между собой промежуточными слоями диэлектрика - поливинилхлоридного пенопласта. Положенный в основу данного РПМ принцип поглощения Jaumann Absorber, поглотитель Яумана (см. ниже), назван по имени его создателя - профессора Йогана Яуманна (г. Брюн).

В Германии также в период Второй мировой войны были проведены пионерские работы по созданию самолёта Хортен Но 229, в конструкции которого впервые применены РПМ. Так использование фанеры с высоким содержанием углерода позволило существенно снизить его радиолокационную заметность для сравнительно примитивных британских РЛС того периода. Отчеты разведки по указанным германским разработкам были рассекречены британским правительством только в 1960 году.

3.2.3. ТИПЫ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Классификация типов РПМ и РПП достаточно условна. Здесь представлена классификация, употребительная, главным образом, в Англии и США.

Существует, по меньшей мере три типа РПМ: резонансные, нерезонансные магнитные и нерезонансные объёмные материалы. Резонансными или частотно-настроенными РПМ обеспечивается частичная или полная нейтрализация отраженного от поверхности поглотителя излучения частью его, прошедшей по толщине материала. Эффект нейтрализации значителен при толщине поглотителя, равной одной четверти длины волны излучения. В этом случае, отраженные поверхностью поглотителя волны находятся «в противофазе».

Резонансные материалы наносятся на отражающие поверхности объекта маскировки. Толщина РПМ соответствует четверти длины волны излучения РЛС. Падающая энергия высокочастотного излучения отражается от внешней и внутренней поверхностей РПМ с образованием интерференционной картины нейтрализации исходной волны. В результате происходит подавление падающего излучения. Отклонение ожидаемой частоты излучения от расчётной приводит к ухудше-

нию характеристик поглощения, поэтому данный тип РПМ эффективен при маскировке от излучения РЛС, работающей на стандартной, неизменяемой моно-частоте.

Нерезонансные магнитные РПМ, к которым относится, например, композит марки ЭМИН, содержат частицы ферритов, распределенные в полимере слоями в определенной последовательности. Поскольку нерезонансные магнитные РПМ рассеивают энергию высокочастотного излучения по большой поверхности, результатом является тривиальное повышение ее температуры. Иными словами уменьшение ЭПР производится за счет ухудшения ИК сигнатуры объекта. Основное преимущество нерезонансных магнитных РПМ состоит в их широкополосности - эффективности поглощения излучения в широком диапазоне частот. Напротив, эффективность резонансных РПМ ограничена узким диапазоном расчётных частот излучения.

Нерезонансные объёмные РПМ обычно используются в виде относительно толстых слоев, поглощающих большую часть подводимой энергии до подхода и возможного отражения волны от металлической задней пластины. Принцип работы основан на использовании как диэлектрических, так и магнитных потерь, последнее - за счет добавления соединений феррита. В некоторых случаях используется введение графита в пенополиуретановую матрицу.

Тонкие покрытия, полученные из диэлектриков и проводников, являются узкополосными, поэтому в тех случаях, когда добавленная масса и стоимость не являются критичными, используются магнитные материалы как в резонансных РПМ, так и в нерезонансных РПМ.

Градиентные РПМ - многослойные структуры с плавным или ступенчатым изменением по толщине комплексной диэлектрической (или магнитной) проницаемости, увеличение тангенса угла диэлектрических потерь стремятся обеспечить в направлении к задней поверхности. Этот тип РПМ технологически сложен в изготовлении.

РПМ, содержащие *ферромагнитные порошки*. Одним из наиболее известных типов РПП является покрытие «iron ball paint», содержащее микросферы карбонильного железа или феррита. Использовалось на разведывательном самолёте «Локхид» SR-71 Blackbird. Была разработана специальная конструкция планера самолёта, не содержащая вертикальных поверхностей. Покрытие способно поглощать радиоволны в определенном диапазоне частот РЛС. При облучении радиоволнами, содержащиеся в покрытии молекулы феррита под дейст-

вием переменного магнитного поля приходят в колебательное движение, преобразуя энергию высокочастотного излучения в тепло. Тепло передается конструкции ЛА и рассеивается. В данном случае имеет место тот же физический принцип, в рамках которого происходит разогрев воды в микроволновой (высокочастотной) печи. На самолете F-117 «Найтхок» покрытием с микросферами феррита заполнялись зазоры между плитками РПМ наклеенными на поверхность фюзеляжа.

Другой тип РПМ, работающий на аналогичном принципе магнитных потерь, выполнен в виде листов неопренового каучука, наполнителем которого являются зерна феррита или частицы графита (содержащими около 30 % кристаллического углерода), распределенные в полимерной матрице. Плитки такого материала устанавливались на первых модификациях самолёта F-117A.

ВВС США приняли на вооружение радиопоглощающее покрытие, на основе композиции ферромагнитной жидкости и немагнитных материалов. При использовании этого покрытия с уменьшенной способностью отражения электромагнитных волн, достигается снижение радиолокационной заметности летательных аппаратов.

РПМ на основе диэлектрических потерь. Тип РПМ, представляющих собой чередование диэлектрических и проводящих слоев. Уменьшение уровня отражённого сигнала достигается за счёт противофазного сложения волн, отразившихся от металлической поверхности объекта, диэлектрических прослоек и электропроводящих слоев.

Покрытие Яумана. Покрытие или поглотитель Яумана представляет собой радиопоглощающее устройство. В том виде, как оно было создано в 1943 году, состояло из двух отражающих поверхностей и проводящего заземлённого экрана, с равными расстояниями между ними. Некоторые полагают, что покрытие Яумана является обобщенным случаем многослойного экрана Сэлисбери Salisbury, ввиду схожести их принципов работы. Являясь резонансным поглотителем (использующим интерференцию волн для подавления отражённой волны) покрытие Яумана использует фиксированное расстояния $\lambda/4$ (четверти длины волны) между первой отражающей поверхностью и заземленным экраном, и между обеими отражающими поверхностями (суммарная толщина $\lambda/4 + \lambda/4$).

Покрытие Яумана (при использовании двухслойной схемы) даёт два максимума поглощения по диапазону длин волн. Все слои покрытия должны быть параллельными между собой и параллельны токопроводящей поверхности, которую они экранируют. В окончательном варианте, принятом для установки на подводной лодке, покрытие Яумана представляло набор параллельных отражающих листов, разделённых слоями диэлектрика (пенопласта). Проводимость этих листов увеличивается по мере приближения к защищаемой металлической поверхности.

Полимерные композиционные материалы специального назначения «Суперпластики» (от англ. super plastics) - группа полимерных композиционных материалов (ПКМ), превосходящих по удельной прочности высокопрочные стали и титановые сплавы, и способные поглощать электромагнитное излучение. При использовании в конструкции фюзеляжа самолета, являются «прозрачными» для излучения РЛС, в отличие от металлов, обладающих свойством отражения падающего излучения в сторону излучателя, при нормальном расположении поверхности самолета относительно падающего излучения.

Являются предметом экспортного контроля материалы, специально созданные для применения в виде поглотителей электромагнитного излучения, либо естественно проводящие полимеры, в частности:

- материалы, поглощающие электромагнитное излучение с частотами, превышающими $2 \cdot 10^8$ Гц, но меньшими $3 \cdot 10^{12}$ Гц (диапазон сверхвысоких частот, СВЧ-диапазон);

- проводящие материалы с объемной проводимостью, превышающей 10000 Сименс/м, и с поверхностным удельным сопротивлением менее 100 ом на основе следующих полимеров и композитных материалов: полианилин; полипиррол; новафор/композит марки "Эмин"; политиофен; полифенилен-винилен.

Применяются РПМ в виде:

- Экранов для основных источников отраженного излучения авиационных конструкций: антенн и антенных обтекателей; кабины экипажа; воздухозаборников и выходных сопел; внешних подвесок; фюзеляжа; мест сопряжения фюзеляжа с хвостовым оперением; киля; уголковых отражателей.

- Экранов для антенн мобильных устройств связи: полного экранирования антенн мобильных устройств связи; частично-го(фронтального) экранирования антенн мобильных устройств связи.

В США применение РПМ в конструкциях самолётов обычной схемы началось в конце 1950-х годов. Такие материалы применены:

- на высотном самолёте-разведчике Lockheed U-2 («Локхид» SR-71 Blackbird);
- на штурмовике A-10;
- на стратегическом бомбардировщике Northrop B-2 Spirit;
- на многоцелевом истребителе пятого поколения F-22 Raptor.
- на опытном разведывательно-ударном вертолете RAH-66 Comanche.

Цель применения РПМ двоякая - снизить видимость летательного аппарата в конкретном диапазоне частот РЛС, и изолировать работу многочисленных бортовых антенных устройств во избежание взаимных помех.

Приоритетный опыт применения РПМ марки "ЭМИН" для гражданского населения принадлежит отечественной компании ЛАОТЭК. Защитный мини-аксессуар ЭМИН-NF, разработанный для средств переносной радиосвязи, создает устойчивую радио-тень, которая локально защищает наиболее уязвимые области (слухового прохода, слухового нерва и прилегающей части височной доли мозга) при удержании мобильного устройства связи возле уха.

3.3. ВЫБОР ЭФФЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЙ

В конструкциях поглощающих ЭМИ экранов и покрытий используются явления рассеивания электромагнитных волн.

Здесь имеют место потери на проводимость при использовании проводящих материалов, а также магнитные и диэлектрические потери в среде, прямо пропорциональные значениям относительной диэлектрической (ϵ) и магнитной (μ) проницаемости материала. В идеальном случае величины ϵ и μ должны быть максимизированы и равны между собой, чтобы уменьшить уровень отраженной волны. Для получения поглотителей электромагнитных волн используются ферриты, ферромагнитные материалы и диэлектрики. Также ведутся разработки новых радиопоглощающих покрытий на основе сегнетоэлектриков, однако их

эффективность невысокая, и они далеки от практического использования.

К материалам, применяемым для защиты от СВЧ-излучений, следует отнести, в первую очередь, специальные ткани, радиопоглощающие материалы, электропроводные клеи, строительные материалы, лесонасаждения и др. Рассмотрим некоторые из них.

Специальные ткани (типа РТ и артикула 4381). Ткань РТ изготавливается из капроновых нитей, скрученных с расплющенной и посеребренной медной проволокой диаметром 35...50 мм. У ткани артикула 4381 нитка свита с эмалированным микропроводом ПЭЛ-0,06. Число металлических ниток может быть 30х30, 20х20, 10х10 и 6х6 в 1 см. поскольку провод изолирован, то поверхностное сопротивление этой ткани велико. Из таких тканей обычно изготавливают специальные костюмы для индивидуальной биологической защиты.

Радиопоглощающие материалы (РПМ). Эти материалы не относят к экранирующим материалам, хотя некоторые из них выпускаются на металлической основе, которая при тщательном соединении ее отдельных частей и элементов может служить экраном. Однако монтаж таких экранов очень сложен, поэтому поглощающим материалом экран покрывают внутри с целью уменьшения отражения радиоволн.

Электропроводные клеи (ЭПК). Целесообразно этот клей использовать вместо пайки, болтовых соединений там, где нужно электромагнитное экранирование. Шовное соединение, крепление контактных систем и различных элементов экранов, заполнение щелей и малых отверстий, установка экран на несущей конструкции - эти и другие операции успешно могут быть осуществлены с помощью ЭПК при высокой эффективности экранирования и сокращения объема работ.

Состав ЭПК – это эпоксидная смола, заполненная тонкодисперсными порошками (железо, кобальт, никель). Клей очень быстро отверждается (5 мин.), если процесс проводить с помощью токов высокой частоты.

Строительные материалы. Определенными защитными свойствами, оцениваемыми по степени сквозного затухания, обладают строительные материалы и конструкции из них. Для конструкций из различных экранирующих материалов оценку степени сквозного затухания дают только по результатам инструментального метода.

Лесонасаждения. Использование в качестве защиты лесонасаждений также основано на радио-поглощении. Защитный эффект лесонасаждений наиболее выражен, когда они находятся в непосредственной близости от защищаемого объекта. При этом учитывается только

степень сквозного затухания. При большой протяженности объекта в глубину и густой защитной полосе из высоких деревьев необходимо учитывать дифракционное затухание. Возможно секторное блокирование направления излучения.

Гетерогенные радиопоглощающие среды. В связи с развитием технологии получения композиционных материалов, свойства которых могут варьироваться в широких пределах путем подбора материала связующего и наполнителя, особое внимание уделяется гетерогенным радиопоглощающим средам. Материалы для поглотителей ЭМИ получают методами порошковой металлургии и с использованием технологии композиционных материалов. В качестве исходного сырья применяются неорганические порошки и волокна, закрепленные в связующем на основе неорганических (оксидов алюминия, титана и др.) или органических (смолы, полимеры, пластмассы, парафины) материалов. Такие материалы обладают как высокой эффективностью экранирования, так и большим значением коэффициента поглощения ЭМВ, однако часто их применение ограничено узким частотным диапазоном. Последние исследования в области разработки композиционных материалов направлены на расширение частотного диапазона электромагнитных экранов и получение многофункциональных конструкций. Использование дисперсных растворов с управляемыми магнитными свойствами также представляется перспективным, однако еще далеко от практического применения из-за сложности синтеза, низкой технологичности, относительно невысокой стабильности или токсичности существующих магнитных жидкостей [3.4].

Конструкционные диэлектрики, имеющие высокий коэффициент поглощения и низкий коэффициент отражения радиоволн. Применяются для затруднения радиолокационного обнаружения различных объектов (надводных кораблей, самолетов, боевых рубок и выдвижных устройств подводных лодок и др.) радиолокационными средствами, экранирования радиоприемных устройств, оборудования специальных камер, в которых испытываются радиоэлектронные средства, организации биологической защиты от радиоизлучений. Кроме того, радиопоглощающие материалы используются при изготовлении маскировочных сетей, материалов обмундирования и касок для личного состава.

Радиопоглощающими и радиопрозрачными материалами являются неметаллические материалы, чаще всего конструкционные диэлектрики, имеющие высокий коэффициент поглощения и низкий коэффициент отражения радиоволн. Они обеспечивают поглощение или

пропускание электромагнитных волн радиочастотного диапазона ($10^5 \div 10^{12}$ Гц) при минимальном его отражении. Распространяясь в объеме этих материалов, электромагнитные волны создают переменное электрическое поле, энергия которого преобразуется в тепловую энергию практически полностью в радиопоглощающих и минимально - в радиопрозрачных материалах.

В радиопоглощающих материалах и конструкциях наряду с dielectricкими и магнитными потерями имеют место дисперсия, дифракция, интерференция и полное внутреннее отражение радиоволн, вызывающие дополнительное ослабление энергии радиоволн вследствие рэлеевского рассеяния, сложения волн в противофазе и др. Изделия из таких материалов поглощают потоки электромагнитной энергии плотностью 0,1-8,0 Вт/см²; интервал рабочих температур от 60 до 1300 °С; уровень отраженного излучения 0,001-5%.

Основу радиопоглощающих материалов составляют органические или неорганические (главным образом оксиды и нитриды) вещества, в которые в качестве активной поглощающей компоненты вводят порошки графита, металлов и их карбидов.

Градиентные радиопоглощающие материалы характеризуются многослойной структурой, обеспечивающей заданное изменение диэлектрической проницаемости в толще материала. Наружный слой изготавливают из твердого диэлектрика с диэлектрической проницаемостью $\epsilon \approx 1$ (например, из фенольного пластика, упрочненного кварцевым стекловолокном), последующие - из диэлектриков с более высокой ϵ (например, эпоксидной смолы с $\epsilon \approx 5$ или той же смолы с наполнителем с $\epsilon \approx 25$) и порошка поглотителя (например, графитовой пыли). Описанная структура способствует минимальному отражению радиоволн от поверхности и увеличению их поглощения по мере проникновения в глубь материала.

Интерференционные радиопоглощающие материалы обычно состоят из подложки и чередующихся диэлектрических и проводящих слоев. В качестве подложки используют металлическую пластину или немаetalлический материал с $\epsilon \geq 100$ и тангенсом угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$, близким к 1. Диэлектрический слой, являющийся связующим, содержит в себе поглотитель (например, оксиды Fe), проводящий слой-металлизированные волокна. Такая структура обес-

печивает сдвиг фазы отраженной в материале волны почти на 180° и ее гашение.

Рассеивающие радиопоглощающие материалы обеспечивают многократное отражение и рассеяние волн. Изделия из них чаще всего полые пирамидальные конструкции из пенополистирола, внутренние стенки которых покрыты графитом, или трубы из стеклопластиков, покрытые снаружи слоем SiC .

Керамические материалы представляют собой, как правило, плотно спеченные материалы из оксидов металлов с низким электрическим сопротивлением [например, Ti_3O_4 и $(AlTi)_2O_3$] или оксидов и нитридов Ba и Al с добавкой металлов (W, Mo, Zr, Hf, Ti) или их карбидов. Обладают высокими теплопроводностью, механической прочностью и термостойкостью. Для экранирования от радиоизлучений высокой интенсивности изготавливают многослойные материалы из микросфер оксида Al и титаната Ba , соединенных между собой алюмофосфатным цементом [3.5].

К группе керамических материалов относят также плотный пиролитический углерод.

Ферритовые материалы, отличающиеся большими магнитными потерями, характеризуются высокой поглощающей способностью, что позволяет использовать их в виде облегченных элементов, например тонкослойных (до 0,2 мм) покрытий из FeO .

Защита, основанная на принципе радио-поглощения, применяется при создании аналогов свободного пространства при антенных нагрузках; при невозможности применения каких-либо других защитных материалов вследствие возможного нарушения технологического процесса; при обкладывании мест стыков внутренней поверхности шкафов с генераторной и усилительной аппаратурой, генерирующей ЭМИ; при закладывании щелей между теми деталями волнопроводящих структур, которые не могут быть соединены сваркой или пайкой. Используемые радиопоглощающие материалы должны отвечать следующим требованиям: максимальное поглощение электромагнитных волн в широком частотном диапазоне, минимальное отражение, отсутствие вредных испарений, пожаробезопасность, небольшие габариты и вес.

По максимальному поглощению и минимальному отражению лучшими качествами обладают материалы с ячеистой структурой, пирамидальной или шиповидной поверхностью. Со стороны, не подле-

жашей облучению, радиопоглощающие материалы покрываются, как правило, радио-отражающими, в результате чего характеристики всей экранирующей конструкции во многом улучшаются. Критерием, характеризующим защитные свойства радиопоглощающего материала, выступает коэффициент отражения по мощности.

Таким образом, в поглощающих экранах используются специальные материалы, обеспечивающие поглощение излучения соответствующей длины волны. В зависимости от излучаемой мощности и взаимного расположения источника и рабочих мест конструктивное решение экрана может быть различным (замкнутая камера, щит, чехол, штора и т.д.).

Вторая составляющая эффективности экранирования обусловлена отражением электромагнитной волны на границе раздела свободное пространство – экран. Значительно большего эффекта экранирования можно достичь, используя не однородные, а многослойные экраны той же суммарной толщины. Это объясняется наличием в многослойных экранах нескольких границ раздела поверхностей, на каждой из которых происходит отражение электромагнитной волны вследствие разницы волновых сопротивлений слоев. Эффективность многослойного экрана зависит не только от числа слоев, но и порядка их чередования. Наиболее эффективны экраны из комбинаций магнитных и немагнитных слоев, причем наружный по отношению к источнику излучения поля слой предпочтительнее выполнять из материала, обладающего магнитными свойствами.

3.4. СОВРЕМЕННЫЕ ЭКРАНИРУЮЩИЕ И РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ

При разработке конструкций экранов или поглотителей электромагнитных волн (ЭМВ) используются различные материалы, обладающие способностью отражать или поглощать ЭМИ в определенном диапазоне частот. Следует отметить, что в природе не существует ни идеально отражающих, ни идеально поглощающих электромагнитную энергию материалов, поэтому подавление ЭМИ чаще всего обеспечивается за счет обоих процессов.

Способность среды поглощать ЭМИ определяется ее электрическими и магнитными свойствами, к которым относятся удельная электропроводность, диэлектрическая и магнитная проницаемости. Эти

характеристики используются при описании процесса распространения ЭМВ и в общем случае являются нелинейными, тензорными, комплексными величинами. Поглощение электромагнитной энергии происходит за счет диэлектрических, магнитных потерь и потерь на проводимость, которые пытаются максимизировать для достижения максимума эффективности экранирования. Отражение ЭМВ происходит на любых неоднородностях в материале, а при конструировании экранов определяется различием волновых сопротивлений среды распространения волны и экрана. Довольно часто используют рассеивание плоского фронта ЭМВ на различных неоднородностях структуры радиопоглощающего материала или конструкции для достижения более полного поглощения электромагнитной энергии и уменьшения уровня отраженного сигнала.

Сложный механизм распространения ЭМВ и поглощения ЭМИ, а также технологические сложности синтеза материалов с заранее заданными электромагнитными свойствами в широком диапазоне частот обуславливают большое разнообразие существующих экранов.

К радио-отражающим материалам относятся различные металлы. Чаще всего используются железо, сталь, медь, латунь, алюминий. Металлические экраны известны уже давно и широко используются. Они отличаются высокой эффективностью на радиочастотах, которая увеличивается при повышении частоты падающего ЭМИ, и технологически выполняются в виде сплошных и перфорированных листов, сеток, решеток, трубок и могут быть нанесены в виде тонкопленочных покрытий. Экранирующие свойства листового металла выше, чем сетки, сетка же удобнее в конструктивном отношении, особенно при экранировании смотровых и вентиляционных отверстий, окон, дверей и т.д. Защитные свойства сетки зависят от величины ячейки и толщины проволоки: чем меньше величина ячеек, чем толще проволока, тем выше ее защитные свойства. Однако металлические экраны обладают одним существенным недостатком, связанным с их высокой электропроводностью: высоким коэффициентом отражения, обусловленным большим различием волнового сопротивления свободного пространства и экрана. Кроме того, эффективность таких экранов очень сильно зависит от качества и надежности монтажа электрических контактов, при нарушении которых появляются области переизлучения ЭМВ. В свою очередь, эффективность перфорированных и сетчатых экранов падает с повышением частоты, что также ограничивает область их применения.

Для экранирования ЭМП за счет отражения ЭМВ могут применяться и другие проводящие электрический ток материалы, такие, как углеродные волокна, проводящие полимеры и т.д. Недостатки таких экранов аналогичны недостаткам экранов, изготовленных из металлов и сплавов [3.5].

Явление отражения ЭМИ при использовании проводящих экранов довольно часто оказывает отрицательное влияние, связанное с формированием переотраженной волны, которая воздействует на экранируемый объект, вызывая изменение его параметров. Это обуславливает необходимость учитывать параметры экрана при разработке радиоэлектронных устройств, а также принимать специальные меры по защите биологических объектов. Поэтому особое внимание уделяется разработке экранов и покрытий, эффективность которых достигается за счет поглощения ЭМИ.

В связи с развитием технологии получения композиционных материалов, свойства которых могут варьироваться в широких пределах путем подбора материала связующего и наполнителя, особое внимание уделяется гетерогенным радиопоглощающим средам. Материалы для поглотителей ЭМИ получают методами порошковой металлургии и с использованием технологии композиционных материалов. В качестве исходного сырья применяются неорганические порошки и волокна, закрепленные в связующем на основе неорганических (оксидов алюминия, титана и др.) или органических (смолы, полимеры, пластмассы, парафины) материалов. Такие материалы обладают как высокой эффективностью экранирования, так и большим значением коэффициента поглощения ЭМВ, однако часто их применение ограничено узким частотным диапазоном. Последние исследования в области разработки композиционных материалов направлены на расширение частотного диапазона электромагнитных экранов и получение многофункциональных конструкций. Использование дисперсных растворов с управляемыми магнитными свойствами также представляется перспективным, однако еще далеко от практического применения из-за сложности синтеза, низкой технологичности, относительно невысокой стабильности или токсичности существующих магнитных жидкостей.

3.5. МНОГОСЛОЙНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ

3.5.1. ШИРОКОПОЛОСНЫЕ ПОГЛОТИТЕЛИ ЭЛЕКТРОМАГ- НИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Расширение рабочего диапазона частот поглотителей ЭМИ достигают как за счет использования специальных материалов, так и путем применения конструктивных решений. Среди возможных конструкций поглотителей наиболее эффективными и оптимальными с точки зрения массогабаритных характеристик являются многослойные системы. Перспективной является многослойная конструкция с градиентом электрических и магнитных свойств по толщине, каждый последующий слой которой имеет больший коэффициент отражения и более высокую эффективность экранирования ЭМИ. Обычно эффективность таких систем увеличивается с повышением частоты и особое внимание уделяется подавлению низких частот, которое обеспечивается за счет увеличения эффективной толщины покрытия и формирования рассеивающих электромагнитные волны геометрических неоднородностей на поверхности поглотителя, обращенной к источнику излучения.

Многослойные радиопоглощающие конструкции градиентного типа на основе металлоорганических волокон. Исследовались многослойные трикотажные конструкции, сформированные сшиванием отдельных слоев в виде полотен из композиционных никель- и кобальтсодержащих волокон, полученных на основе полиакрилонитрила или целлюлозы. Конструкция представляла собой два сопряженных полотна, где для сравнения изменялся порядок следования слоев [3.6].

Результаты исследований показали, если в качестве первого слоя выступает полотно из никельсодержащего материала, имеющее высокий коэффициент отражения, происходит значительное отражение электромагнитной энергии от первого слоя. Когда в качестве первого слоя выступает кобальтсодержащий материал с низким коэффициентом отражения, то отражение от границы раздела $Co - Ni$ меньше, чем от границы воздух - Ni , а отраженное излучение дополнительно поглощается кобальтсодержащим слоем. Отмечено, что эффективность многослойной градиентной конструкции выше, чем суммарная эффективность отдельных слоев.

На основе полученных данных разработаны многослойные конструкции радиопоглощающих покрытий, где в качестве согласующего

слоя выступает трикотажное полотно, обладающее наиболее низким коэффициентом отражения и лучше согласованное со средой распространения ЭМИ. Рабочим слоем является полотно с высокой электропроводностью и эффективностью подавления ЭМИ. Для повышения общей эффективности конструкции дополнительно может вводиться отражающий слой, который возвращает прошедшее через экран излучение. При этом отраженная от последнего слоя энергия дополнительно поглощается в рабочем и согласующем слоях.

Конструкции с рассеивающими неоднородностями на поверхности Исследование различных конструкций позволило получить поглотитель следующего типа: согласующий слой – кобальтсодержащий ПАН, сопротивление которого 150 Ом м, коэффициент отражения не хуже 10 дБ в диапазоне частот 18-118 ГГц; рабочий слой – полотно на основе волокон с нано-размерными кластерами никеля или жидкими растворами; в качестве третьего слоя использовано напыление пленки никеля в вакууме. Сопряжение слоев производится путем сшивания их между собой, что позволяет облегчить конструкцию и сохранить ее воздухопроницаемость и гибкость, которая обуславливается гибкостью каждого из слоев. В результате комбинации полотен различной структуры, использования металлоорганических волокон и формирования разно-размерных псевдо-пирамидальных поверхностных неоднородностей реализованы покрытия общей толщиной несколько сантиметров с эффективностью экранирования ЭМИ до 70 дБ в частотном диапазоне от десятков МГц до сотен ГГц. Линейные размеры, форма и расположение неоднородностей на рассеивающей поверхности зависят от конкретной области применения экранов, используемых материалов и диапазона частот.

Разработанные поглотители могут выпускаться в виде отдельных гибких модулей, легко стыкуемых один с другим, а также могут быть реализованы в виде конструкций однократного применения на основе легко-утилизируемых волокнистых материалов.

Использование радиопоглощающих объемов. При нахождении источников СВЧ и РЧ внутри помещений защиту целесообразно проводить в местах проникновения электромагнитной энергии из экранирующих кожухов, улучшать методы радио-герметизации стыков и сочленений, применять насадки с радиопоглощающей нагрузкой. При внешних источниках применяются различные защитные изделия из радио-отражающих материалов: металлизированные обои, металлизированные шторы, сетки на окнах и другие. Наибольшей эффективностью

стью эти защитные средства обладают в СВЧ диапазоне, на более низких частотах их применение ограничено дифракцией.

В некоторых случаях для защиты от излучений внешних источников используют специальные коридоры со стенками из радиотражающих материалов (листовой алюминий, латунная сетка и т. п.). Оценку эффективности перечисленных коллективных средств защиты производят по степени сквозного и дифракционного затуханий [3.7].

3.5.2. ГИБКИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЭКРАНЫ И РАДИОПОГЛОТИТЕЛИ

Гибкие электромагнитные экраны находят широкое применение не только для «классических» целей подавления нежелательных излучений электронной техники, а также актуальны и в других областях, таких, как экологическая защита живых организмов от вредного воздействия электромагнитного излучения, создание одежды и накидок специального назначения, подавление электромагнитного канала утечки информации и защита устройств обработки информации от электромагнитного воздействия. Отдельным направлением является использование таких материалов в военном деле при конструировании и модернизации изделий электроники, а также для снижения заметности объектов и повышения их помехозащищенности. Особое внимание уделяется использованию радио-поглотителей в конструкциях авиационной техники, надводных и подводных кораблей, где большое количество электронной аппаратуры сконцентрировано на ограниченной площади судна. Актуальной проблемой в настоящее время является электромагнитная маскировка наземных объектов с помощью материалов, способных снизить дальность обнаружения подвижных и неподвижных радиолокационных целей в широком диапазоне частот, включая оптический, инфракрасный и радиочастотный.

В настоящее время, когда электромагнитные ресурсы широко используются, число действующих радиоэлектронных средств постоянно увеличивается, разрабатываются новые виды электромагнитного оружия, что приводит к обострению проблем экологической защиты живых организмов, электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств, обеспечения защиты информации, скрытности объектов и др., проблема разработки новых экранирующих материалов и технологий с повышенной эффективностью и широкополосностью весьма актуальна.

3.6. ЭКРАНИРУЮЩИЕ СВОЙСТВА НЕГЕРМЕТИЗИРОВАННЫХ СИЛИКАГЕЛЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Радиопоглощающие материалы нашли широкое применение в различных отраслях науки и техники. При разработке конструкций экранов или поглотителей электромагнитных волн используются различные среды, обладающие способностью отражать или поглощать электромагнитные излучения в определенном диапазоне частот. С учетом развития современных радиоэлектронных средств, целесообразным является разработка поглощающих материалов с высокой эффективностью как в видимом и ближнем инфракрасном, так и в радиочастотном диапазонах длин волн.

Вода, как известно, является эффективным поглотителем ЭМИ в широком диапазоне длин волн.

Силикагель обладает высокими адсорбционными свойствами и даже в нормальных условиях содержит до 20–30 % воды, в соответствии с чем, применение такого материала для создания поглотителей ЭМИ радиочастотного диапазона на основе воды является перспективным. Силикагель - высушенный гель поликремневой кислоты, твердый гидрофильный сорбент. По химическому составу силикагель – дву-

окись кремния SiO_2 (кремнезем), по структуре – высокопористое тело, образованное мельчайшими сросшимися сферическими частицами. Адсорбционная способность силикагеля обусловлена наличием на его поверхности силанольных групп $Si-OH$, способных к образованию водородных связей с молекулами сорбата.

Проводимые ранее исследования показали, что композиционный материал на основе молотого силикагеля в силиконовом связующем позволяет получить ослабление и коэффициент отражения ЭМИ 1,9...2,3 дБ и -11,2...-12,7 дБ соответственно в диапазоне частот 8...12 ГГц. Регулированием влагосодержания силикагеля от 20 % до 55 % изменяется величина ослабления в пределах 5...20 дБ, и коэффициента отражения ЭМИ в пределах -12,0...-5,1 дБ. Однослойные композиты на основе гранулированных силикагелевых материалов с различными включениями в силиконовом связующем обладают ослаблением ЭМИ в пределах 1,6...4,0 дБ и коэффициентом отражения электромагнитных волн - 9,0...-15,0 дБ в частотном диапазоне 8...12 ГГц, и могут быть использованы для создания средств защиты радиоэлектронных средств от ЭМИ. Исследования динамики изменения влагосодержания материалов показали, что у негерметизированных образцов влагосодержание значительно снижается при комнатной температуре за краткое время (48 ч.). Есте-

ственное испарение влаги из пропитанных материалов при обычной комнатной температуре приводит только к разрушению физических связей молекул воды с поверхностью силикагеля, нарушение химических связей возможно при термическом или химическом воздействии. С помощью герметизации процесс испарения влаги из пропитанных материалов замедляется, при этом, как показали исследования, снижение концентрации влаги при использовании герметизации в основном определяется проницаемостью герметизирующего материала [3.8].

Задачей исследования является получение поглощающего композиционного материала с низким коэффициентом отражения ЭМИ в диапазоне СВЧ. Для этого были исследованы образцы из непропитанного гранулированного силикагеля без использования герметизирующего внешнего слоя. На диэлектрической подложке толщиной 2 мм закреплялись гранулы силикагеля диаметром 2–3 мм посредством двух связующих: жидкого стекла (образец № 1) и водостойкого полиуретана (образец № 2), выбранных вследствие их различных физико-химических свойств. Гранулы силикагеля укладывались в плотные ряды.

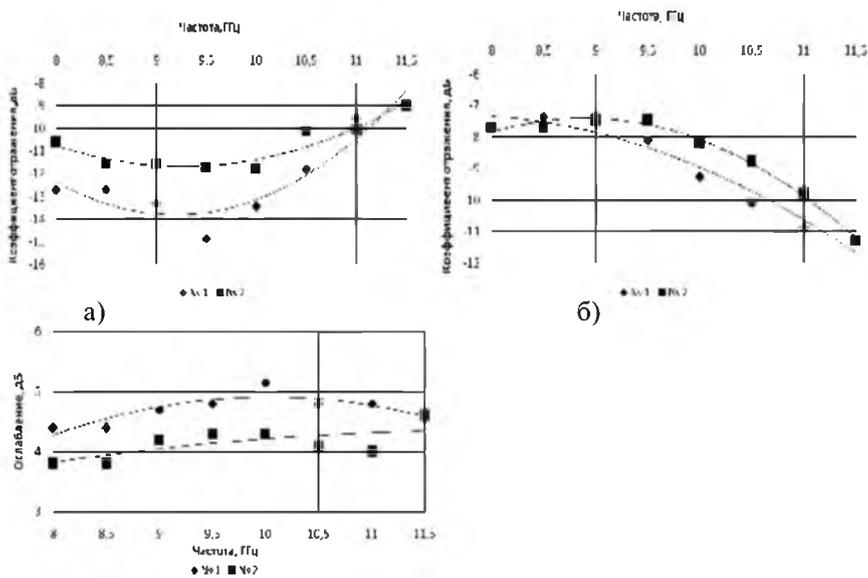


Рис. 3.1. Экранирующие характеристики:

- а) коэффициент отражения ЭМИ образцами без металлического отражателя;
- б) коэффициент отражения ЭМИ с металлическим отражателем;
- в) ослабление ЭМИ в диапазоне 8...11,5 ГГц – непропитанного гранулированного силикагеля без герметизации с различными связующими: 1 – жидкое стекло; 2 – водостойкий полиуретан

Вследствие сферической формы гранул, поверхность образца, обращенная к излучателю, имеет геометрически неровную форму, для создания условий дополнительного рассеивания ЭМВ на границе раздела свободного пространства и композитного материала. Методом скалярного анализа цепей проводилось исследование ослабления и коэффициента отражения электро- магнитного излучения негерметизированным гранулированным силикагелем. Результаты измерений показаны на рис. 3.1.

Отсутствие герметизирующего слоя позволяет силикагелю в естественных условиях адсорбировать влагу из окружающего воздуха, увеличивая тем самым свою поглощающую ЭМИ способность. Как показывают результаты эксперимента (рис. 3.1) величина ослабления электромагнитной энергии составляет 3,8...5,15 дБ. Показатели коэффициента отражения ЭМИ находятся в пределах $-12,0...-7,0$ дБ. Установка металлического отражателя за измеряемыми образцами позволяет снизить значения коэффициента отражения ЭМИ на 2 дБ, вследствие отражения ЭМВ от металлической поверхности отражателя и ее дополнительного рассеивания при распространении в обратном направлении в слое силикагеля.

При воздействии на исследуемые образцы ЭМИ происходит преломление ЭМВ от геометрически неровной поверхности гранул, а также рассеивание одной части ЭМЭ на границе раздела двух сред и поглощение другой в составе композита. Вследствие этого происходит снижение коэффициента отражения ЭМИ полученного композиционного материала.

3.7. РАСЧЁТ ФУНКЦИЙ ЭКРАНИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ С РАДИОПОГЛОЩАЮЩИМИ МАТЕРИАЛАМИ

Аналитические методы расчетов коэффициентов экранирования конструкций с радиопоглощающими материалами являются трудоёмкими. Поэтому для быстрых практических оценок можно использовать метод Л. А. Щелкунова, основанный на аналогии с распространением электромагнитных волн в электрически длинных двухпроводных линиях. Эти волны являются распространяющимися вдоль проводящих линий ТЕМ-волнами (электромагнитные волны с векторами \vec{E} и \vec{H} напряженностей электрического и магнитного полей, ориентированными перпендикулярно к направлению распространения), так что разработанные для них формальные методы нетрудно перенести на плоские

волны в свободном пространстве. Нужно просто заменить в уравнениях проводимости комплексные амплитуды входного напряжения \dot{U}_1 и входного тока \dot{I}_1 комплексными напряженностями $\dot{\vec{E}}_1$ и $\dot{\vec{H}}_1$, а также напряжение \dot{U}_2 и ток \dot{I}_2 на напряженности $\dot{\vec{E}}_2$ и $\dot{\vec{H}}_2$.

Подобно тому, как волны в неоднородных линиях частично отражаются, частично пропускаются и затухают из-за потерь, электромагнитные волны в свободном пространстве отражаются от неоднородностей и ослабляются внутри материала.

Стенка экрана, расположенная поперек направления распространения плоской волны, обуславливает эффекты, сравнимые с теми, которые имеют место в линии с потерями и малым волновым сопротивлением, последовательно включенной с длинной электрической линией без потерь с большим волновым сопротивлением (рис. 3.2).

Общий коэффициент затухания экранирующей конструкции с радиопоглощающими материалами определим в виде [3.3]

$$\mathcal{E} = P + \Pi + B, \quad (3.1)$$

где P - коэффициент затухания вследствие отражения на граничных плоскостях; Π - коэффициент затухания из-за поглощения в стенке экрана (преобразование электромагнитной энергии в тепло из-за тепловых потерь); B - корректирующий коэффициент, который учитывает многократные отражения внутри экрана (может отсутствовать при $\Pi > 10 \div 15$ дБ).

Коэффициенты затухания вследствие отражения. Этот коэффициент состоит из двух составляющих $P_{вш}$ и $P_{вн}$ в соответствии с двумя граничными плоскостями "вш" и "вн". При условии $Z_{вш} \gg Z$, большая часть энергии, приходящейся на граничную плоскость "вш" отражается обратно к источнику. В соответствии с теорией волн отношение напряженностей электромагнитного поля падающей и прошедшей волнами

$$E_{вш} / E_{э.вш} = (Z_{вш} + Z_{э}) / 2Z_{э}, \quad (3.2)$$

Аналогичным образом и на внутреннем пограничном слое происходят отражения волн. Суммарное влияние отражений можно получить из отношения

$$E_{ВШ} / E_{ВТ} = (Z_{ВШ} + Z_{\text{э}}) / (4Z_{ВШ} Z_{\text{э}}) \quad (3.3)$$

или, если подставить $K = Z_{ВШ} / Z_{\text{э}}$,

$$E_{ВШ} / E_{ВТ} = (1 + K)^2 / 4K \quad (3.4)$$

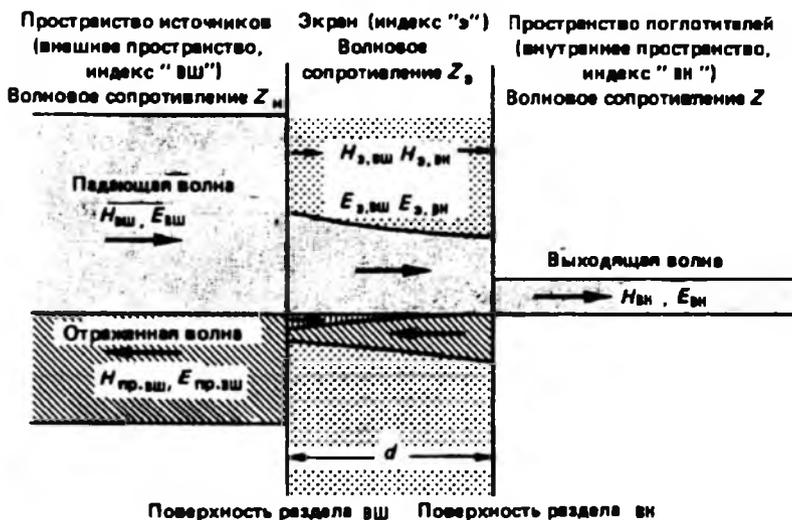


Рис. 3.2. Аналогия бегущей волны с плоской волной, которая падает на бесконечную стенку экрана, расположенную перпендикулярно к направлению распространения волны (отражение, пропускание, поглощение)

Из (3.3) и (3.4) получаем выражение для коэффициента затухания вследствие отражения:

$$P = 20 \lg \frac{|(Z_{ВШ} + Z_{\text{э}})^2|}{|4Z_{\text{э}}Z_{ВШ}|} = 20 \lg \frac{|(1 + K)^2|}{4|K|}, \text{ дБ.} \quad (3.5)$$

Для практической оценки коэффициента затухания необходимо иметь простые формулы для волновых полных сопротивлений $Z_{вш}, Z_{э}, Z_{вт}$.

Волновые сопротивления в пространстве источника помехи.

Дальняя зона. Если стенка экрана находится в дальней зоне источника помехи, то $Z_{вш}$ равно волновому сопротивлению пространства

$$Z_{вш} = Z_0 = 377 \text{ Ом.} \quad (3.6)$$

Ближняя зона. Если стенки экрана находится в ближней зоне источника помехи, то волновое сопротивление зависит от расстояния r до источника помехи, а также от природы источника. В высокоомных (квазистатических электрических) полях (штыревые антенны)

$$Z_{вш} = Z_0 \frac{\lambda}{2\pi r} = \frac{18 \cdot 10^{-3}}{rf}, \quad (3.7)$$

где λ - длина электромагнитной волны, м; f - частота, Гц.

В низкоомных (квазистатических магнитных) полях (рамочные антенны)

$$Z_{вш} = Z_0 \frac{2\pi r}{\lambda} = 7,9 \cdot 10^{-6} rf \quad (3.8)$$

Волновое сопротивление стенки экрана. Волновое сопротивление материала рассчитывается

$$Z_{э} = \sqrt{j\omega\mu / (\gamma + j\omega\varepsilon)}, \quad (3.9)$$

где $\omega = 2\pi f$ - круговая частота, Гц; γ, μ, ε - электрическая проводимость (1/Ом.м), магнитная (Гн/м) и диэлектрическая (Ф/м) проницаемости радиопоглощающего материала, соответственно.

Для экрана, при условии, что толщина стенки больше глубины проникновения,

$$Z_{\text{Э}} = \sqrt{j\omega\mu/\gamma} = \sqrt{\omega\mu/2\gamma\sigma} (1+j), \quad (3.10)$$

или

$$|Z_{\text{Э}}| = Z_{\text{Э}} = \sqrt{2\pi f \mu / \gamma} \quad (3.11)$$

Часто $Z_{\text{Э}}$ выражают через глубину проникновения δ :

$$\delta = 1 / \sqrt{\pi a \mu \gamma}; \quad (3.12)$$

$$Z_{\text{Э}} = \sqrt{2} / (\gamma \delta) \quad (3.13)$$

В заключение выразим коэффициент затухания вследствие отражения непосредственно через параметры материала и частоту [3.3]:

дальняя зона

$$P = 108 - 10 \lg \frac{\mu_r f}{\gamma_r}, \text{ Дб}; \quad (3.14, \text{а})$$

электрическое поле в ближней зоне

$$P = 142 - 10 \lg \frac{\mu_r f^3 r^2}{\gamma_r}, \text{ Дб}; \quad (3.14, \text{б})$$

магнитное поле в ближней зоне

$$P = 75 - 10 \lg \frac{\mu_r}{f \gamma_r r^2}, \text{ Дб}, \quad (3.14, \text{в})$$

где r - расстояние от источника помехи, м; f - частота, МГц; σ_r - относительная удельная электропроводность (за базовую принята электропроводность меди);

$$\gamma_r = \frac{\gamma}{5,8 \cdot 10^7}, \quad (3.15)$$

$\mu_r = \mu / \mu_0$ - относительная магнитная проницаемость материала,
 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Отметим, что в зависимости от отношения полных сопротивлений коэффициент затухания вследствие отражения от граничной плоскости принципиально может быть положительным, отрицательным или равным нулю. При определении коэффициента затухания, по (3.5), не учитывается то, что волна, отраженная от граничного слоя "вТ" может быть еще раз отражена от граничного слоя "вШ" и т. д.

Многочисленные отражения внутри экрана учитываются корректирующим коэффициентом "В" в (3.19), однако это уточнение целесообразно делать только после введения коэффициента затухания вследствие поглощения.

Коэффициент затухания вследствие поглощения. Этот коэффициент описывает экспоненциальное ослабление падающей волны при прохождении стенки экрана. Отношение амплитудного значения напряженности электрического поля, проникшего через граничный переход «вШ» к амплитудному значению напряженности у граничного перехода «вТ», равно

$$E_{Э.ВШ} / E_{Э.ВТ} = e^{\alpha d} \quad (3.16)$$

а коэффициент затухания вследствие поглощения

$$П = 20 \lg(E_{Э.ВШ} / E_{Э.ВТ}) = 20 \lg e^{\alpha d} \quad (3.17)$$

Переходя к натуральным логарифмам и учитывая, что

$$\alpha = \sqrt{\pi f \mu \gamma} \quad , \text{ можно (3.17) заметно упростить}$$

$$П = 13,14 d \sqrt{f \mu_r \gamma_r} \quad , \text{ дБ,} \quad (3.18)$$

где μ_r и γ_r - относительная магнитная проницаемость и относительная удельная электропроводность, соответственно, f выражено в МГц.

Коррекция коэффициента затухания при многократном отражении. Если затухание $\Pi < 10 \div 15$ дБ, то возникающие на граничных слоях отраженные волны могут заметно повлиять на действительные значения E_{VT} и H_{VT} . Для коррекции можно использовать поправку

$$B = 20 \lg \left| 1 - \frac{(K-1)^2}{(K+1)^2} e^{2\dot{\gamma}d} \right|, \text{ дБ.} \quad (3.19)$$

Приняв $\dot{\gamma} = \alpha + j\beta = \sqrt{j\omega\mu\sigma} = (1+j)\sqrt{\pi f\mu\sigma}$ и $K \gg 1$, можно (3.19) упростить:

$$B = 20 \lg \left| 1 - e^{2d\sqrt{\pi f\mu\gamma}} e^{j2d\sqrt{\pi f\mu\gamma}} \right|, \text{ дБ.} \quad (3.20)$$

Многократные отражения сильнее влияют на затухание H_{VT} чем E_{VT} .

Читателю, питающему доверие к теории проводимости, метод полных сопротивлений кажется очень внушительным, однако необходимо указать, что теоретическое и экспериментальное определение коэффициентов затухания экранов, могут рассматриваться отдельно. Расхождения обычно объясняются тем, что метод полных сопротивлений не учитывает конечных размеров, отклонения угла падения волны от прямого, многократных отражений волны внутри экрана от противоположной стенки, влияния щелей и углов в реальном экране. Все эти факторы в значительной степени влияют на общий коэффициент затухания. Чтобы получить значения, близкие к экспериментальным, метод полных сопротивлений должен уточняться путем введения новых членов K_1, K_2, K_3 и т. д.:

$$\mathcal{E} = P + A + B + K_1 + K_2 + K_3 \dots$$

Рассмотрение этих членов, как и критическая точная оценка этого метода, лежит за рамками данной книги.

Пример расчёта. Для экрана используется радиопоглощающий материал – фольга алюминиевая - с параметрами: $d = 0,08$ мм; $\gamma_r = 0,6$; $\mu_r = 1,0$; $f = 10^3$ МГц.

Требуется рассчитать коэффициент затухания \mathcal{E} магнитного поля в дальней зоне.

Для решения воспользуемся формулами (3.14,а), (3.18), (3.20) и (3.1):

$$P = 108 - 10 \lg \frac{\mu_r f}{\gamma_r} = 108 - 10 \lg \frac{1 \cdot 10^3}{0,6} = 75,8 \text{ дБ,}$$

$$\begin{aligned} \Pi &= 13,14 d \sqrt{f \mu_r \gamma_r} = \\ &= 13,14 \cdot 0,08 \cdot 10^{-3} \sqrt{10^3 \cdot 1 \cdot 0,6} = 0,026 \text{ дБ,} \end{aligned}$$

$$B = 20 \lg \left| 1 - e^{2d \sqrt{\pi f \mu \gamma}} e^{j2d \sqrt{\pi f \mu \gamma}} \right| = 0$$

$$\mathcal{E} = P + \Pi + B = 75,8 + 0,026 + 0 = 75,826 \text{ дБ.}$$

Коэффициент затухания алюминиевой фольги по магнитному полю составляет $\mathcal{E} = 75,826$ дБ.

Материалы публикаций, используемые в третьей главе почерпнуты из источников [3.1-3.8], упомянутых в библиографии к II тому.

ГЛАВА 4. ЭКРАНИРУЮЩИЕ И ПОГЛОЩАЮЩИЕ СВОЙСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

4.1. ЭКРАНИРУЮЩИЕ СВОЙСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Перечень строительных материалов, эффективно экранирующих ЭМП широкого диапазона частот, ограничен. Так, исследования показывают, что такие строительные материалы как кирпич, бетон, шлакоблоки и другие в той или иной степени ослабляют электромагнитную энергию. Например, обыкновенный бетон является слабо проводящим материалом. В основном его проводимость определяется содержанием влаги. Увлажненный бетон может иметь электропроводность на уровне 10-3 См/м, сухой бетон до 10-8 См/м. Введение специальных электропроводящих добавок (сажа, кокс) позволяет получить проводимость до 10 См/м. Диэлектрическая проницаемость сильно зависит от типа за-

полнителя. Обыкновенный бетон имеет $\epsilon_r \approx 5 \div 6$, добавки порошка сегнетокерамики могут поднять ее до 50-60. В энергетике бетон используется и как конструкционный материал (в большей степени), и как диэлектрический материал, и как электропроводный материал. Для конструкций из различных экранирующих материалов оценку степени сквозного затухания дают только по результатам инструментального метода, сравнительная характеристика которых представлена в табл. 4.1.

Существенно более эффективны для защиты от ЭМИ минерал шунгит и строительные материалы на основе шунгитовых пород.

Первые исследования радио-экранирующих свойств таких материалов были выполнены в Северо-Западном научном центре гигиены и общественного здоровья МЗ РФ (г. Санкт-Петербург), которые показали перспективность разработок в данном направлении. В промышленно-строительной компании «Альфа-Пол» (Россия) был организован Испытательный исследовательский центр защиты от электромагнитных полей и подготовлена программа дальнейших исследований. К настоящему времени исследования по изучению радио-экранирующих свойств магнезиально-шунгитовых строительных материалов (МШСМ) выполнены рядом аккредитованных лабораторий (Государственного морского технического университета, СПб филиала Федерального Государственного унитарного предприятия «Научно-технический центр «Атлас»», Института геологии Карельского научно-

го центра РАН, Научно- исследовательского центра безопасности технических систем МО). В Институте геологии Карельского научного центра РАН разработаны строительные радио-экранирующие материалы (РЭМ) на основе шунгитовых пород (кирпичи, кладочный раствор, конструкционный бетон, штукатурная мастика).

Таблица 4.1

Ослабление ЭМИ некоторыми строительными материалами

Наименование материала или конструкции	Толщина, см	Сквозное затухание (дБ) на разных частотах		
		3,0 ГГц	10,0 ГГц	37,5 ГГц
Кирпич	12	15	15	15
Металлизированный стеклянный кирпич	-	25	25	25
Штукатурка	1,8	-	8	12
Стекло	0,28	-	2	2
Доска	5,0	8,4	-	-
Доска	3,5	5,0	-	-
Доска	1,6	2,8	-	-
Фанера	0,4	-	1	2
Древесностружечная плита	1,8	3,2	20,5	-
Шлакобетонная стена	46	14,5	21	-
Капитальная стена здания	70	16	12	-
Оштукатуренная стена	15	8	22	-
Межэтажная перегородка	80	20	13	-
Окно с двойными рамами	-	7	-	-
Окно с одинарной рамой	-	4,5	-	-

В состав выпускаемых смесей входят натуральные компоненты, такие как шунгит (наполнитель), магнезит (вяжущее) и бишофит (затвердитель). В соответствии с разработанной программой были исследованы более десяти образцов экранирующих материалов «Альфапол» различного конструктивного исполнения (панели, кубы с различной

длиной ребра) и получены экспериментальные электрофизические характеристики (табл. 4.2).

Исследования, выполненные в лабораторных и натуральных условиях, показали, что эффективность экранирования МШСМ зависит от частотного диапазона электромагнитных излучений.

Таблица 4.2

Оценка значений электрофизических характеристик МШСМ

Электрофизическая характеристика	Сухая порошковая смесь магнетита и шунгита	Смесь магнетита и шунгита с раствором бишофита – «Альфапол ШТ-1»
Относительная диэлектрическая проницаемость, ϵ_r	6,3	21,2±2,3
Относительная магнитная проницаемость, μ_r	1,0	1,0
Электропроводность, γ (См/м)	0,36	0,313

В табл. 4.3 представлены значения коэффициента экранирования в диапазоне частот от 10,0 кГц до 34,5 ГГц штукатурным составом «Альфапол ШТ-1» при толщине слоя штукатурки 15 мм.

Материал экранирует также электрические поля частотой 50 Гц. Эффективность экранирования составляет 37,2 дБ (73 раза). С увеличением толщины слоя эффективность экранирования возрастает.

Проведенные испытания позволили определить основные области применения экранирующих строительных материалов. Использование МШСМ позволяет обеспечить соблюдение предельно допустимых уровней электромагнитных полей на рабочих местах и жилище, сократить протяженность санитарно-защитных зон и зон ограничения застройки при проектировании зданий вблизи ЛЭП и передающих радиотехнических объектов.

Таблица 4.3

Значения коэффициентов экранирования ЭМП
штукатурным составом «Альфапол ШТ-1»

Частота, МГц	Коэффициенты экранирования	
	дБ	разы
0,01 – 0,16	26,9-17,1	22,2-7,1
0,24 – 22,0	16,6-6,4	6,7-2,1
30,0 – 90,0	11,0-13,9	3,9-4,9
110,0 – 210,0	11,0-8,2	3,9-2,5
230,0 – 420,0	9,0-14,0	3,1-25,1
430,0 – 530,0	13,1-8,0	20,4-6,3
540,0 – 640,0	6,0-5,3	4,5-3,4
650,0 – 740,0	7,9-11,0	6,1-12,9
760,0 – 920,0	12,6	18,2-6,1
940,0 – 1000,0	11,7-12,0	14,8-16,5
2450,0	8,0	6,1
10000,0	18,1	64,7
34500,0	18,3	67,8

Преимущества сооружений на основе магнезиально-шунгитовых строительных материалов в том что, в них совмещаются не только экранирующие, но и конструкционные свойства, что позволяет создавать специальные строительные конструкции с применением традиционных строительных технологий. Традиционные строительные материалы могут снижать уровни ЭМП. Так, например, кирпичная стена толщиной 70 см снижает уровень ЭМП в СВЧ диапазоне до 21 дБ, шлакобетонная стена при толщине 46 см до 20,5 дБ. Применение магнезиально-шунгитовой строительной смеси дает близкую эффективность экранирования ЭМИ СВЧ диапазона (до 18 дБ) при существенно меньшей толщине слоя - в 15 мм. Кроме того, экранирование традиционными строительными материалами громоздко, при их использовании трудно обеспечить герметичность экрана. Разработанные составы являются немагнитными материалами, не снижают естественное магнитное поле Земли. Совмещение в одном сооружении конструкционных и экранирующих свойств значительно снижает сроки ввода таких экранирован-

ных помещений в эксплуатацию. Экранирующие штукатурные составы наносятся по обычной строительной технологии.

В настоящее время ведутся исследования по испытанию многослойных экранов с применением МШСМ.

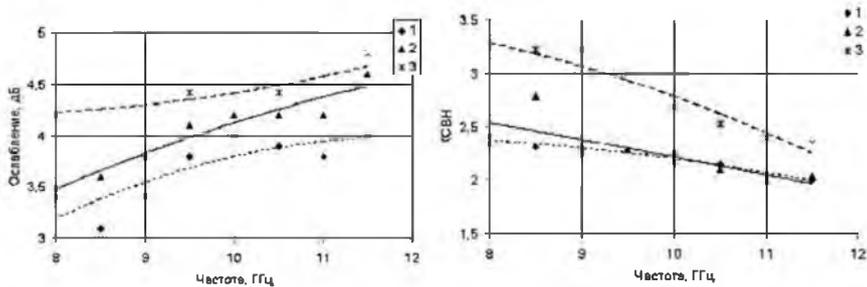
4.2. КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Основным направлением разработок экранов и радиопоглотителей электромагнитного излучения является синтез композиционных материалов с новыми свойствами, не присущие исходным компонентам по отдельности.

Механические свойства композита обычно задаются образующей матрицей, которая используется для пространственной фиксации наполнителя, обладающего резистивными, магнитными или диэлектрическими потерями, взаимодействие которого с электромагнитным излучением приводит к ослаблению энергии за счет механизмов отражения, поглощения ЭМИ.

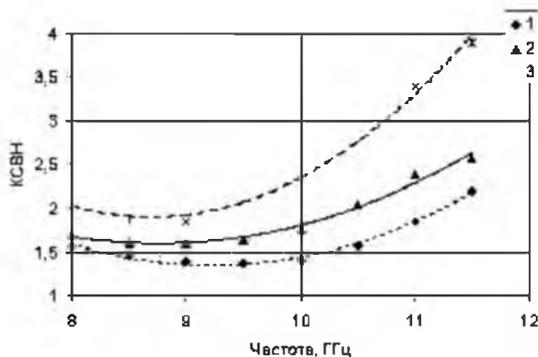
В некоторых композиционных материалах для закрепления поглощающих частиц используются полимерные связующие, в которых диспергируются порошкообразные частицы или волокна проводящего или магнитного материала. Однако содержание поглощающего вещества в них ограничено ухудшением механической прочности материала при повышении концентрации частиц. Другим вариантом образующих матриц являются капиллярно-пористые материалы, органические и неорганические, жесткие или эластичные, формирующие каркас, который заполняется веществом с потерями. К таким материалам относятся тканые и нетканые волокнистые материалы, порошкообразные материалы, керамические матрицы. В качестве веществ с потерями выступают осаждаемые тонкопленочные металлические покрытия, магнитные жидкости, жидкости с диэлектрическими потерями.

Рядом специалистов предложено для изготовления образующей матрицы использовать вспененные полимерные материалы, что позволяет сформировать сложную дисперсную структуру поглощающего материала, заполняющего поровые пространства или покрывающего поверхность стенок матрицы, получать радиопоглотители с небольшим весом, хорошей гибкостью, прочностью, технологичностью.



а)

б)



в)

Рис. 4.1 Частотная зависимость ослабления (а), КСВН (б) и КСВН с металлическим отражателем (в) вспененных композиционных материалов:

1 – содержание TiO_2 до 10 об.%; 2 - содержание TiO_2 до 40 об.%; 3 - содержание TiO_2 до 60 об.%

В качестве радиопоглощающего материала выбирается суспензия диоксида титана TiO_2 в органических растворителях, так как TiO_2 обладает высокими диэлектрическими потерями в диапазоне СВЧ.

Образцы для исследований получались путем пропитки матрицы суспензией TiO_2 . В качестве матрицы использовался двухслойный

вспененный полимерный материал. Толщина первого слоя составляла 5 мм, толщина второго, более уплотненного слоя – 0,5 мм.

Коэффициент отражения ЭМИ показывает долю энергии, переизлученной в направлении источника колебаний. Величина ослабления электромагнитной энергии оценивает отношение уровней падающей электромагнитной энергии и в области пространства за образцом. Процессы отражения электромагнитных волн от границы раздела двух сред с различными электромагнитными характеристиками и поглощения энергии ЭМИ в объеме материала за счет различных механизмов характеризуют эффективность экранирования электромагнитного излучения.

Пропитка суспензией TiO_2 вспененного материала приводит к формированию большого количества границ раздела свободное пространство-материал с потерями, что приводит к возникновению многочисленных переотражений электромагнитных волн внутри гетерогенной структуры сформированного композиционного материала и рассеянию энергии ЭМИ. Невысокий уровень ослабления ЭМИ образцов (до 4,5 дБ) обусловлен небольшой толщиной формируемых слоев диэлектрика с потерями и небольшим вкладом механизма поглощения в общую эффективность экранирования. Величина ослабления ЭМИ пропорциональна концентрации поглощающего наполнителя.

КСВН тракта с образцами составляет 2...3,5. При установке металлического отражателя за образцом КСВН понижается на 0,5...1 и характер частотной зависимости изменяется. Это связано с рассеиванием энергии падающих и отраженных от металла волн в объеме материала, что приводит к снижению доли энергии, отраженной нормально от поверхности образцов. Кроме того, неравномерность характеристики КСВН в частотной области может быть связана с возникновением явления наложения волн в противофазе, отраженных от различных слоев образца и металла. Общая эффективность экранирования в этом случае за счет использования металла существенно повышается (свыше 40 дБ).

Диспергированием TiO_2 во вспененной полимерной матрице были получены экранирующие материалы со значением КСВН 1,3...4 и ослаблением ЭМИ порядка 40 дБ в частотном диапазоне 8...11,5 ГГц. Применение вспененных композиционных материалов является перспективным для создания экранирующих и радиопоглощающих материалов с небольшим весом и габаритами.

4.3. ЭКРАНИРУЮЩИЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПОЛА И СТЕН

Основным методом защиты человека от электромагнитного излучения в помещениях является экранирование.

Экранирование также является основным методом защиты в различных областях техники - электромагнитной совместимости высокочувствительных элементов технических средств, защиты от мощных электромагнитных полей, защиты средств и систем обработки информации для исключения утечки информации по техническим каналам.

Наиболее распространенным способом защиты человека и технических средств методом экранирования является создание экранированных помещений.

4.3.1. МАГНЕЗИТО-ШУНГИТОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Для экранирования помещений чаще всего используются магнезито-шунгитовые материалы.

В вопросе выбора покрытия промышленного пола специалисты руководствуются двумя ключевыми факторами: совокупностью специальных требований к конкретному производственному помещению и экономической выгодой, складывающейся из обеспечения наиболее полного набора физико-механических свойств используемого материала.

Существуют три основные группы строительных материалов, предназначенных для устройства покрытий пола в производственных помещениях. Это разного рода полимерные составы, цементные полы с применением упрочняющих покрытий (топпинги) и магнезиальные промышленные полы. Использование магнезиального вяжущего материала позволяет создавать строительные материалы, обладающие превосходными эксплуатационными свойствами. Разработанная компанией АЛЬФАПОЛ технология производства сухих строительных смесей на основе магнезита выводит широко известные магнезиальные промышленные полы на совершенно иной уровень возможного использования за счет применения специфических минеральных добавок.

У производимых компанией магнезиальных промышленных покрытий имеется целый ряд технологических преимуществ, основанных на характеристике производимых составов:

- Высокая прочность покрытий пола, обеспечивающая любые производственные нагрузки.

- Высокая адгезия - очень важное строительное свойство материала, позволяющее без армирования связывать магнезиальные полы с основой из бетона, дерева, металла, натурального камня, кирпича. По величине силы адгезии магнезиальные полы превосходят специальные строительные клеи для плитки.

- Безусадочность магнезиальной стяжки, покрытия. Как следствие, пол, выполненный из магнезиального бетона, не образует трещин. Это даёт преимущество при обустройстве стяжки - возможность создавать сплошные покрытия без деформационных швов на большой площади.

- Износостойкость, отсутствие пылеобразования. Фактически пол из магнезиального бетона - это искусственный камень, имеющий равную прочность по всей толщине (10-50 мм). Это существенное отличие магнезиальной стяжки от тонких полимерных (полиуретановых) покрытий и обычных бетонов с упрочнённым верхним слоем, где износостойчивой является только тонкая пленка на поверхности.

- Очень короткие сроки готовности пола к повышенным нагрузкам. Позволяет экономить время ввода промышленных объектов в эксплуатацию. Для магнезиальных полов срок от укладки пола до начала промышленной эксплуатации составляет всего 3-5 дней.

- Морозостойкость: класс F 300. Это важное свойство, т. к. по сравнению с обычными либо упрочнёнными бетонами (топпинги) магнезиальный бетон выдерживает более 300 циклов шоковой заморозки и нагрева в соляной ванне. Разрыва изнутри и потери прочностных характеристик не происходит. Это позволяет использовать магнезиальные бетоны для устройства финишного покрытия или стяжки в морозильных камерах и холодильных складах.

- Маслостойкость. Магнезиальные строительные материалы не впитывают горюче-смазочные вещества (ГСМ), такие, как бензин, минеральное масло, которые легко проникают в бетоны на портланд-цементе, приводя к разрушению строительных конструкций.

- Водонепроницаемость: класс W 14. В сравнении с традиционными бетонами, магнезиальные имеют иную структуру «пор». После

выполнения заглаживания бетонно-затирачной машиной, верхние «поры» закрываются полностью.

- Взрывопожаробезопасность. Все строительные смеси на магниезиальном вяжущем относятся к категории негорючих строительных материалов (НГ).

Приведём ряд дополнительных свойств магниезиальных покрытий АЛЬФАПОЛ, которые могут быть обеспечены, исходя из требований по эксплуатации:

- Искробезопасность. Специально разработанные покрытия пола марки «МИ» и «КИ» не образуют искр при ударах металлическими и каменными предметами. Особенно это свойство актуально при наличии в помещении взрывоопасной газозвдушной смеси.

- Антистатичность. Особое свойство, присущее покрытиям пола марок «МИ», «АМШ» -электропроводность, достаточная для снятия зарядов статического электричества.

Среди разработанных в последние годы и рекомендуемых при производстве строительных работ можно назвать следующие магниезито-шунгитные материалы: «АЛЬФАПОЛ АМШ», «АЛЬФАПОЛ АЬШ», «АЛЬФАПОЛ ШТ-1», «АЛЬФАПОЛ МШ» и др. Рассмотрим некоторые из них подробнее.

«АЛЬФАПОЛ АМШ» - магниезиально-шунгитовая сухая расворная строительная смесь. Обработанный ею пол становится антиэлектростатическим, обеспечивает защиту человека от электромагнитного излучения радиочастотного диапазона, статического электричества, электрических полей промышленной частоты. Такой материал незаменим при решении задач электромагнитной совместимости технических средств, при защите средств и систем обработки информации, для исключения утечки информации по техническим каналам и при защите населения от преднамеренного силового электромагнитного воздействия (электромагнитного терроризма).

«АЛЬФАПОЛ АЬШ» - магниезиально-шунгитовая сухая бетонная строительная смесь. Обработанный ею пол становится антиэлектростатическим, обеспечивает защиту человека от электромагнитного излучения радиочастотного диапазона, статического электричества, электрических полей промышленной частоты. Материал незаменим

при решении задач электромагнитной совместимости технических средств, защите средств и систем обработки информации, для исключения утечки информации по техническим каналам и при защите населения от преднамеренного силового электромагнитного воздействия.

«АЛЬФАПОЛ ШТ-1» - магнезиально-шунгитовая сухая штукатурная строительная смесь, экранирующий штукатурный состав. Обеспечивает защиту человека от электромагнитного излучения радиочастотного диапазона, статического электричества, электрических полей промышленной частоты. Материал незаменим при решении задач электромагнитной совместимости технических средств, при защите средств и систем обработки информации, для исключения утечки информации по техническим каналам и защиты населения от преднамеренного силового электромагнитного воздействия.

«АЛЬФАПОЛ МШ» - фасадная магнезиальная мраморно-шунгитовая штукатурная строительная смесь для создания экранов, защищающих от электромагнитного излучения.

Необходимо отметить, что отмеченные строительные материалы обладают хорошими экранирующими свойствами в широком диапазоне частот. Радио-экранирующие покрытия на основе магнезиально-шунгитовых составов, открывают новые горизонты в экологичном строительстве. Теперь дом и рабочее место может не просто защищать человека от вредных воздействий окружающей среды, но и оказывать полноценный оздоравливающий эффект. В линейке строительных материалов для экранирования представлены уникальные запатентованные составы, позволяющие одновременно значительно снизить либо исключить влияние ЭМП на здоровье людей, обеспечить изоляцию внутреннего пространства помещений от радиоэлектронных помех и несанкционированных утечек информации, нейтрализовать влияние геоактивных (геопатогенных) зон Земли, защитить от биоповреждения и коррозии строительные конструкции:

- снижают уровни электромагнитных излучений радиочастотного диапазона 10 кГц- 39 ГГц, электрических полей 50 Гц;
- используются вместо (или совместно) обычных цементных ровнителей пола и штукатурок;
- в отличие от металлических экранов, не снижают уровень естественного магнитного поля Земли в экранированных помещениях;
- не накапливают статическое электричество;

- обладают повышенной адгезией к любым основаниям, высокопрочные материалы, относятся к категории непылящих и негорючих;
- радио-экранирующие покрытия для пола служат ровнителем бетонного основания и покрытием пола одновременно.

Электромагнитные свойства некоторых магнетито-шунгитовых материалов приведены в табл. 4.4

Таблица 4.4

Электромагнитные характеристики магнетито-шунгитовых материалов

Наименование материала	γ , См/м	ϵ_r	μ_r
Сухая порошковая смесь магнетита и шунгита	0,36	6,3	1,0
Смесь магнетита и шунгита с раствором бишофита – «Альфапол ШТ-1»	0,313	21,2±2,3	1,0

4.3.2. РАДИО-ЭКРАНИРУЮЩИЕ ШУНГИТОВЫЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Радио-экранирующие шунгитовые строительные материалы являются доступным и надёжным способом защиты от электромагнитных излучений (ЭМИ).

Радио-экранирующие материалы обеспечивают изоляцию определённой части пространства от источника ЭМП данного частотного диапазона. Для экранирования ЭМП в радиочастотных диапазонах используются разнообразные радио-отражающие и радиопоглощающие материалы. К радио-отражающим относятся различные металлы. Они используются в виде металлических листов, сеток, либо в виде решёток и металлических труб. Однако мероприятия по защите электронного оборудования от ЭМП радио-отражающими материалами могут повлечь за собой ухудшение условий труда персонала. В некоторых случаях эти материалы способны создавать отражённые радиоволны, которые могут усилить облучение человека. Кроме того, в экранированных отражающими материалами помещениях снижается естественное магнитное поле Земли. Более удобными для экранирования являются радиопоглощающие материалы.

Для защиты от ЭМИ в строительных конструкциях в качестве экранов применяются разработанные нашей компанией специальные строительные материалы. Для их создания используются уникальные свойства шунгита - древнего природного минерала. В сочетании с энергетически плотным магнезитом в качестве вяжущего средства шунгитовые наполнители придают композиционным материалам достаточно высокую электропроводность, что определяет экранирующую способность последних. В отличие от металлических, композиционные шунгитовые радио-экранирующие материалы исключают возможность вредного воздействия на обслуживающий персонал и работу оборудования, так как не искажают магнитного поля Земли и не создают значительной напряженности ЭМП на резонансных частотах экранированного помещения. Экранирующие свойства магнезиальных составов с шунгитовым наполнителем подтверждены исследованиями, выполненными рядом аккредитованных центров, на что имеются соответствующие экспертные заключения. Исследованиями также подтверждено, что электропроводность материала практически определяется электропроводностью входящего в его состав шунгита, а экранирующая способность увеличивается с ростом частоты.

В состав материалов входят природные компоненты: наполнитель шунгит, в качестве вяжущего используется магнезит (магнезиальный цемент Сореля) и затвердитель - водный раствор природного минерала – бишофита. Шунгитовые породы – уникальные по составу, свойствам и структуре природные композиты, состоящие из аморфного углерода с примесью неорганических веществ. Углерод шунгитовых пород (шунгит) - это некристаллический углерод с метастабильной структурой, не способный к графитизации, обладает многими ценными свойствами естественного и искусственного углерода. Уникальные свойства шунгита обусловили его применение в различных областях: в строительстве, производстве резины, в качестве наполнителя в различного рода полимеров.

Магнезиальный цемент (магнезит) получают при обжиге природного минерала – периклаза. Пыль, улавливаемая в циклонах и электрофильтрах, используется для производства магнезиального цемента.

Первые данные о радио-экранирующих свойствах шунгита, связанные с его повышенной электропроводностью и первые радио-экранирующие материалы на основе шунгита были получены в Институте геологии Карельского научного центра РАН: кирпичи, кладочный раствор, конструкционный бетон, мастики. В качестве вяжущего в материалах использованы обычный портландцемент, жидкое стекло. В

материалах «Альфапол» портландцемент не используется, заменен магниезальным вяжущим, низкое объемное электрическое сопротивление. Сочетание электропроводящего наполнителя шунгита с электропроводящим магниезальным вяжущим и соевым раствором – бишофитом и позволило получить новый класс экранирующих строительных материалов.

Первые исследования радио-экранирующих свойств материалов были выполнены в Северо-Западном научном центре гигиены и общественного здоровья МЗ РФ (г. Санкт-Петербург), которые показали перспективность разработок в данном направлении. В компании «Альфа-Пол» был организован Испытательный исследовательский центр защиты от электромагнитных полей и подготовлена программа дальнейших исследований. К настоящему времени исследования по изучению радиоэкранирующих свойств магниезально-шунгитовых строительных материалов (МЦСМ) выполнены рядом аккредитованных лабораторий (Государственного морского технического университета, СПб филиала Федеральное Государственного унитарного предприятия «Научно-технический центр «Атлас», Института геологии Карельского научного центра РАН, Научно-исследовательского центра безопасности технических систем МО). Основными направлениями исследований является изучение электрофизических характеристик материалов, определение коэффициентов экранирования в лабораторных и натуральных условиях при эксплуатации передающих радиотехнических объектов.

В табл. 4.5 представлены электрофизические характеристики строительной смеси. Установлено, что электропроводность композиционного материала равна электропроводности шунгита в природном состоянии в породах с аналогичным процентным содержанием углерода (0,313 См/м). Строительная композиция является на 6-7 порядков менее проводящим материалом, по сравнению с металлом. Относительная диэлектрическая проницаемость материала существенно увеличивается после добавления бишофита.

Были выполнены измерения объемного электрического сопротивления строительных: оно составляет до 10^3 Ом·м. Материалы удовлетворяют требованиям ГОСТ 12.4.124-83, предъявляемым к средствам защиты от статического электричества, где указано, что объемное электрическое сопротивление должно быть не выше 10^7 Ом·м.

Таблица 4.5

Коэффициенты экранирования ЭМИ магнизиально-шунгитовым материалом «Альфапол ШТ-1» в диапазоне частот 175-700 МГц (толщина слоя 15 мм)

Коэффициенты экранирования	Частотный диапазон (МГц)					
	175	480	510	520	610	700
дБ	7,7	11,5	10,7	8,9	3,9	7,0
раз	2,4	14,1	11,7	7,7	2,4	5,1

Исследования экранирующих свойств проводились в диапазоне частот 10 кГц – 34,5 ГГц. В табл. 4.5, 4.6 и рис. 4.2, 4.3 представлены значения коэффициента экранирования при толщине слоя штукатурки 15 мм.

Таблица 4.6

Коэффициенты экранирования ЭМИ в диапазоне частот 800-900 МГц магнизиально – шунгитовым материалом «Альфапол ШТ-1» (толщина слоя 15 мм)

Коэффициенты экранирования	Частотный диапазон (МГц)				
	800	820	840	860	900
дБ	9,4	7,4	6,8	5,5	4,0
раз	8,7	5,5	4,8	3,5	2,5

Из табл. 4.5, 4.6 видно, что штукатурная смесь «Альфапол ШТ-1» в диапазоне частот в 175- 700 МГц снижает уровень ЭМП в пределах от 3,9 до 11,5 дБ (в 2,4 - 14,1 раз). В диапазоне частот 800 - 900 МГц коэффициент экранирования составил от 4,0 до 9,4 дБ (2,5-8,7 раз).

Проводилось изучение радио-экранирующих свойства материалов в реальных условиях при эксплуатации передатчиков радиосвязи (диапазон 6,0-390,0 МГц) и средств радиолокации (частота излучения 2,45, 10,0 и 34,5 ГГц). Коэффициенты экранирования ЭМИ средств радиосвязи магнизиально-шунгитовым материалом «Альфапол ШТ-1» представлены на рис. 4.1. Как следует из рисунка, коэффициенты экранирования в частотном диапазоне 6,0-390,0 МГц составили от 8,6 до 22,7 дБ (2,7- 13,7 раз). Коэффициенты экранирования ЭМИ РЛС (рис.

4.2) составили 8,0 - >20,0 дБ (от 6,1 до > 67,8 раза). Исследованиями установлено, что материалы снижают уровни и электрических полей 50 Гц.

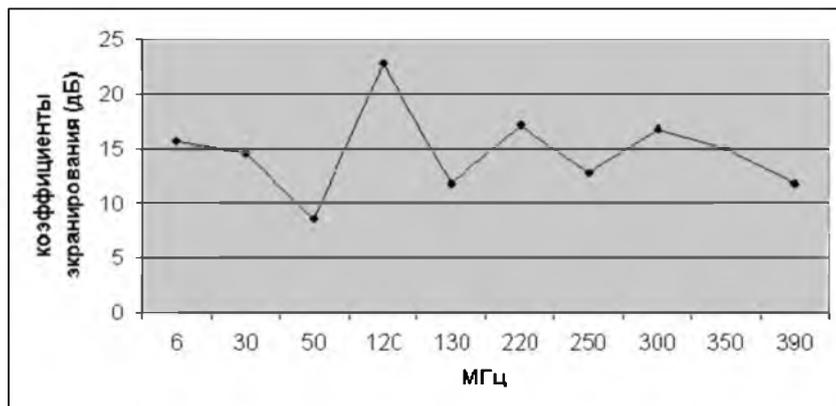


Рис. 4.2. Коэффициенты экранирования ЭМИ средств радиосвязи магнезиально - шунгитовым материалом «Альфапол ШТ-1»

Таким образом, полученные данные свидетельствуют, что применение магнезиально-шунгитовых строительных материалов позволяет снизить уровни ЭМП во всех исследуемых диапазонах частот. В настоящее время продолжают дальнейшие исследования электромагнитных и радио-экранирующих свойств материалов и факторов, влияющих на эффективность экранирования.

Магнезиально-шунгитовые композиционные материалы прошли санитарно-эпидемиологическую экспертизу (Заключение № 78.01.06.574.П. 000552.02.06 от 08.02.2006г.). Смеси соответствуют требованиям «Норм радиационной безопасности (НРБ - 99)» и рекомендованы к применению в жилых и общественных зданиях, в производственных помещениях со значительной интенсивностью механических воздействий, в пищевых, фармацевтических, медицинских, детских учреждениях. В соответствии с санитарно-эпидемиологическим заключением № 78.01.06.574.П.000578.02.06 от 15.02.2006 г. являются средствами коллективной защиты от электромагнитных полей радиочастотного диапазона, электрических полей промышленной частоты, статического электричества.

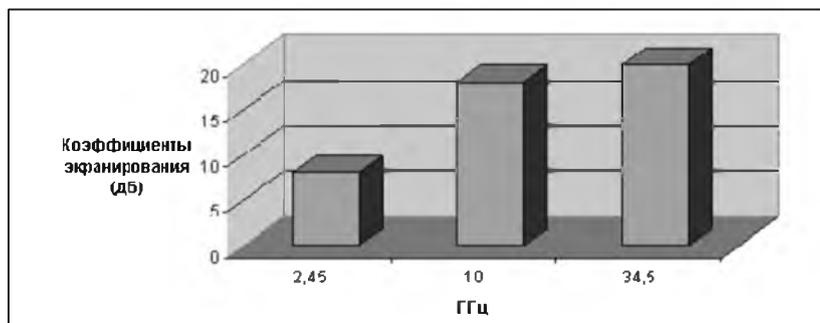


Рис. 4.3. Коэффициенты экранирования ЭМИ радиолокационных станций

Разнообразны области применения магнезиально-шунгитовых строительных материалов со специальными свойствами. Так, анти-электростатические покрытия для пола применяются в строительстве и реконструкции объектов, где недопустимо образование и негативное влияние статического электричества: (при работе современной электронной техники, средств связи, измерительного и другого оборудования). В помещениях, где работают с легковоспламеняющимися и взрывоопасными веществами, на предприятиях электронной и других отраслей промышленности.

Радио-экранирующие магнезиально-шунгитовые штукатурки и напольные покрытия могут быть рекомендованы для защиты населения от воздействия электромагнитных излучений антенн передающих радиотехнических объектов (радиолокационных станций, средств связи, теле - и радиоцентров, станций спутниковой связи и других). Эти материалы могут быть использованы для создания защитных экранов для персонала передающих объектов Министерства обороны, гражданской авиации, береговых объектах флота. Разработанные компанией новые строительные материалы, являются, несомненно, шагом вперед в деле обеспечения электромагнитной безопасности человека. Их применение позволяет обеспечить предельно допустимые уровни электромагнитных полей на рабочих местах персонала и в местах проживания населения.

С помощью магнезиально - шунгитовых радио-экранирующих материалов можно создавать экранирующие поверхности больших размеров. Совмещение в одном сооружении конструкционных и экра-

нирующих свойств значительно снижает сроки ввода таких экранированных помещений в эксплуатацию. Экраны из магнезиально-шунгитовых материалов являются пожароустойчивыми, надежными и долговечными, что упрощает их эксплуатацию. Смеси обладают такими свойствами как высокая прочность, беспыльность, маслостойкость, безусадочность, морозоустойчивость, стойкость к истиранию, негорючесть. Строительные свойства строительных смесей подтверждены исследованиями в соответствующих аккредитованных лабораториях.

4.3.3. МАГНЕЗИАЛЬНО-БАРИТОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ

Необходимо отметить, что данная группа материалов обладает более широкой областью экранирующих свойств, чем ранее рассмотренные. Наряду с экранированием неионизирующих излучений в широком диапазоне частот они могут экранировать и ионизирующие излучения, в связи с чем использоваться и в целях радиационной защиты. Среди таких материалов можно назвать, в первую очередь следующие: «АЛЬФАПОЛ ШТ-БАРИТ», «АЛЬФАПОЛ М-БАРИТ». О них следует упомянуть подробнее.

«АЛЬФАПОЛ ШТ-БАРИТ» - магнезиально – баритовая радиационно-защитная штукатурная строительная смесь, применяется для обеспечения радиационной безопасности и защиты от сверхнормативного воздействия всех видов источников ионизирующих излучений методом оштукатуривания стен в рентгенофлюорографических комплексах, медицинских, промышленных, научных учреждениях, жилых домах. Может использоваться при изготовлении контейнеров для утилизации радиоактивных отходов и для отверждения жидких радиоактивных отходов.

«АЛЬФАПОЛ М-БАРИТ» - магнезиально- баритовая радиационно-защитная сухая растворная строительная смесь, высокопрочное безусадочное магнезиальное покрытие пола, применяется для обеспечения радиационной безопасности и защиты от сверхнормативного воздействия всех видов источников ионизирующих излучений. Применяется для устройства стяжки пола в рентгенофлюорографических комплексах, медицинских, промышленных, научных учреждениях, жилых домах. Может использоваться при изготовлении контейнеров для утилизации радиоактивных отходов и для отверждения жидких радиоактивных отходов

4.4. РАДИОПРОЗРАЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Радиопрозрачные материалы — конструкционные диэлектрики с однослойной или многослойной структурой, пропускающие без существенных потерь и искажений электромагнитные колебания радиочастотного диапазона. Они не изменяют существенным образом амплитуду и фазу проходящей сквозь них электромагнитной волны радиочастотного диапазона.

К радиопрозрачным материалам относятся и другие неметаллические материалы, обеспечивающие поглощение или пропускание электромагнитных излучений радиочастотного диапазона ($10^5 \div 10^{12}$ Гц) при минимальном его отражении.

В авиации радиопрозрачные материалы применяются, главным образом, для изготовления антенных обтекателей летательных аппаратов.

К радиопрозрачным материалам предъявляются следующие основные требования:

- обеспечение заданной прочности и устойчивости конструкции в условиях воздействия аэродинамических нагрузок при полёте и импульсных перегрузок при взлёте и посадке самолёта;
- эрозионная стойкость под воздействием ударов капель дождя, града или снега при полётах через полосу осадков;
- стойкость к тепловой эрозии;
- обеспечение заданных радиотехнических характеристик в рабочих секторе углов падения и диапазоне волн.

В зависимости от преобладания тех или иных требований стенки обтекателей могут быть однослойными или многослойными (с 2, 3, 5, 7 слоями). В качестве однослойных конструкций применяются такие композиционные материалы, как, например, стеклопластики и органопластики. Для многослойных конструкций из чередующихся слоев с различной плотностью в качестве заполнителей используют сотовые материалы (жёсткие и армированные), например, стеклосотопласт. Некоторые свойства радиопрозрачных материалов приведены в табл. 4.7.

Для теплостойких обтекателей применяют керамику и ситаллы. Эти материалы, характеризующиеся исключительно высокой однородностью структуры и стабильностью диэлектрических свойств в условиях воздействия высоких температур, используются в конструкциях, подвергающихся жёсткому термическому удару.

Таблица 4.7

Некоторые свойства радиопрозрачных материалов

Материал	Предел прочности при сжатии, МПа	Относительная диэлектрическая проницаемость (при частоте колебаний 10 ГГц)	Тангенс угла диэлектрических потерь
Стеклопластик	300-320	3,3-3,7	0,010-0,032
Органопластик	60-80	2,8-3,8	0,014-0,020
Стеглосотопластик	3	1,05-1,15	0,002-0,005

При написании четвёртой главы использованы материалы, опубликованные в [4.1-4.8].

ГЛАВА 5. ЭКРАНИРУЮЩИЕ ТКАНИ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

5.1. ВИДЫ ЭКРАНИРУЮЩИХ ТКАНЕЙ

5.1.1. ЗАЩИТНЫЕ ТКАНИ С МЕТАЛЛИЗАЦИЕЙ

Одним из видов защиты от ЭМИ является экранирование, в качестве которого может выступать специальная защитная одежда. В последнее время производители тканей, реагируя на изменение спроса на рынке, повышенное внимание уделяют защите от ЭМИ. В результате расширяется ассортимент тканей, появляются новые варианты защиты. Одним из наиболее распространенных вариантов является ткань с решеткой из металлизированной нити.

В основе создания средств индивидуальной защиты от ЭМИ лежат принципы сквозного затухания. Экранирующие свойства тканей определяются удельным содержанием металлизированных нитей в основе и утке. Характер взаимного расположения нитей в виде решетки обуславливает способность ткани защищать от ЭМИ различных поляризацій.

До настоящего времени у нас в стране было разработано два типа защитной ткани - с открытой и скрытой металлизацией. Ткань первого типа изготавливается из хлопчатобумажных нитей, на которые накручивается металлическая фольга. Сплетенная из таких нитей ткань имеет металлический блеск. Хотя некоторые ткани имеют достаточные экранирующие свойства, они не нашли широкого применения, так как костюмы из них, с одной стороны, производят нежелательное психологическое воздействие на окружающих, с другой стороны, человек в этом костюме ощущает в электрических полях легкое покалывание током, вызывающее неприятные ощущения. К тому же возрастает опасность электрических травм.

Защитная ткань второго типа имеет скрытую металлизацию. В этом случае тонкая прочная микропроволока вплетается внутрь хлопчатобумажной нити. Изготовленная из таких нитей ткань не имеет недостатков, присущих ткани с открытой металлизацией, и по внешнему виду она не отличается от обычной.

Металлизированные ткани, пришедшие на замену металлическим листам и сеткам, являются наиболее удобными как средство защиты человека и приборов от ЭМИ. Они нашли широкое применение в России и за рубежом вследствие высокой эффективности экранирования и технологичности применения, т. к. у многих видов сохраняются

текстильные свойства. Однако их различные защитные свойства зависят от способа изготовления. Есть ткани, сотканые из синтетических нитей, в которые вплетены металлические медные или медные посеребрённые нити. Есть ткани из полиэфира или полиамида, на которые в вакууме проводят напыление медного или никелевого слоя. Такие покрытия являются тонкопленочными и не обеспечивают высокой эффективности экранирования от ЭМИ. Есть также ткани, на которые химическим осаждением нанесены никелевые или медные покрытия. Этот метод с применением драгоценных металлов является малопродуктивным и дорогостоящим.

Сегодня все ведущие производители металлизированных тканей используют в качестве металлического покрытия никель. Этот металл является ферромагнетиком, поэтому хорошо отражает магнитную составляющую ЭМИ. Кроме того, он достаточно хороший проводник электрического тока и обладает высокими антикоррозионными свойствами. Существует также производство тканей, основанное на применении гальванической технологии, которая обеспечивает сплошное двухстороннее никелевое или никелево-медное покрытие толщиной до 12 мкм материала-основы. Технология отличается высокой экономичностью и стабильностью.

Металлизированные ткани производятся на различной основе: полиэфирной, полиамидной, параамидной, стеклянной, базальтовой, кремнеземной, хлопковой, комбинированной (например, хлопок с полиэфиром или полиамидом). Кроме того, производятся металлизированные сетки на капроновой основе, обладающие высоким светопропусканием; ткани в зависимости от назначения - с высокой электропроводимостью (от 0,003 до 0,4 Ом/кВ) или низкой (до 1 500 Ом/кВ). Ткани с высокой отражательной способностью обеспечивают экранирование ЭМИ в широком диапазоне частот с защитным эффектом свыше 99,99 %. Высокие теплоизоляционные свойства тканей (на уровне асбеста) за счет теплового отражения, имеют коэффициент экранирования инфракрасного излучения 0,4 – 0,6 в диапазоне длин волн от 2 до 14 мкм. Это расширяет возможности использования таких тканей (для защиты или сохранения тепла) при изготовлении спецодежды для тех, кто работает в экстремальных температурных режимах. Металлические свойства электропроводящих тканей позволяют применять их также для снятия статического электричества, а наряду с металлическими свойствами тканям присущи и высокие текстильные характеристики: гибкость, легкость, воздухопроницаемость.

Также может быть различной и ткань-основа - с плотным и редким плетением нитей разной жесткости и химической природы: поли-

мерной горючей, полимерной негорючей (не поддерживает горение) и негорючей (на основе стекла, кремнезема, базальта). Нанесение металлического покрытия возможно на угле-графитные ткани. В качестве электрически подогреваемых могут быть использованы ткани с заданным электрическим сопротивлением.

Недавно был разработан метод магнетронного распыления, получивший широкое применение в микроэлектронике. Это еще один метод металлизации тканей, который до сих пор практически не применялся в текстильной промышленности. Метод основан на использовании аномального тлеющего разряда в инертном газе с наложением на него кольцеобразной зоны скрещенных неоднородных электрического и магнитного полей, локализующих и стабилизирующих газоразрядную плазму в прикатодной области. Положительные ионы, образующиеся в разряде, ускоряются в направлении катода, бомбардируют его поверхность в зоне эрозии, выбивая из нее частицы материала. Покидающие поверхность мишени частицы осаждаются в виде пленки на подложке (ткани). Высокая кинетическая энергия частиц обеспечивает хороший уровень адгезии образующейся пленки к подложке.

Метод магнетронного распыления реализуется в достаточно глубоком вакууме (порядка 5×10^{-5} мм рт. ст.) и позволяет наносить на ткани тонкие пленки меди, алюминия, титана, латуни, серебра, нержавеющей стали, бронзы и других металлов и их сплавов. Способ позволяет наносить на текстильные материалы также соединения некоторых металлов с кислородом или азотом. Например, если нанести нитрид титана, можно получить ткань, окрашенную «под золото» или ткань с эффектом перламутра.

Особенно необходимо отметить, что данный метод практически не загрязняет окружающую среду. Отсутствует необходимость в использовании каких-либо химических материалов, а значит - в очистке сточных вод, что должно компенсировать затраты, связанные с повышенным энергопотреблением оборудования в связи с необходимостью достаточно глубокого вакуумирования и использования магнетрона. Установка оборудования не требует наличия специальных инженерных коммуникаций: станций очистки сточных вод, парогенераторов и паропроводов, химических станций и т. п. Это позволяет использовать данное оборудование даже в условиях малых предприятий.

Поскольку обработка тканей происходит в мягких условиях так называемой низкотемпературной плазмы, ткань сохраняет мягкий гриф, воздухо- и влагопроницаемость, драпируемость и прочностные характеристики.

Напыление слоя металла приводит к появлению у ткани электрической проводимости. В отличие от других способов металлизации, способ магнетронного распыления позволяет достаточно тонко регулировать толщину металлического слоя, а значит и его сопротивление, что очень важно при создании структур с определенной проводимостью. Появление проводимости приводит к тому, что синтетические ткани или нетканые материалы приобретают антистатические свойства. Это весьма важно, например, для создания искробезопасных фильтров, использующихся на взрывоопасных производствах (угледобывающая, деревообрабатывающая и пищевая отрасли промышленности).

Никогда еще за всю историю человечества не было такого ускорения технического прогресса, который наблюдался за последние десятилетия, в том числе и в области производства тканей. Инновации, внедренные в процесс производства ткани, изменили образ жизни человека, его отношение к одежде, стилю жизни и заставили по-новому взглянуть на материалы с точки зрения их функциональности.

Производство тканей с эффектом защиты от ЭМИ, которые при этом не теряют своих эргономических свойств, будет приобретать все больший масштаб. С учетом роста количества приборов, оказывающих ЭМИ, данные ткани со временем, возможно, будут использоваться и при изготовлении не только специальной, но и повседневной одежды.

Наиболее распространённые в настоящее время экранирующие ткани приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Ткани, используемые при экранировании ЭМП

№ п/п	Перечень тканей
1.	Ткани из шелковых нитей или из шелковых отходов
2.	Ткани из шерстяной пряжи аппаратного прядения или пряжи аппаратного прядения из тонкого волоса животных
3.	Ткани льняные
4.	Ткани из джутовых волокон или других текстильных лубяных волокон
5.	Ткани из прочих растительных текстильных волокон; ткани из бумажной пряжи
6.	Ткани из синтетических комплексных нитей
7.	Ткани из искусственных комплексных нитей
8.	Нетканые материалы, пропитанные или непропитанные, с покрытием или без покрытия, дублированные или недублированные
9.	Ткани ворсовые и ткани из синели
10.	Ткани махровые полотенечные и аналогичные махровые ткани; тафтинговые текстильные материалы
11.	Текстильные материалы, пропитанные, с покрытием или дублированные пластмассами

Одним из наиболее широко распространенных технологических решений создания гибких электромагнитных экранов и защитной одежды является использование в структуре полотен материалов, обладающих высокой проводимостью и эффективностью экранирования - металлов.

Металлические рисунки могут формироваться различными способами, такими, как использование металлических порошков, дисперсных металлосодержащих паст, красок и т. д., однако наиболее простой метод изготовления экранирующих материалов - формирование проводящих структур с помощью металлических проводников в виде комплексных нитей или микропровода.

Экранирующие свойства тканей определяются удельным содержанием металлизированных нитей в основе и утке. Характер взаимного расположения нитей в виде решетки обуславливает способность ткани защищать от ЭМИ различных поляризаций. До настоящего времени у нас в стране было разработано два типа защитной ткани: с открытой и скрытой металлизацией.

Ткань первого типа изготавливается из хлопчатобумажных нитей, на которые накручивается металлическая фольга. Сплетенная из таких нитей ткань имеет металлический блеск. Хотя некоторые ткани имеют достаточные экранирующие свойства, они не нашли широкого применения, так как костюмы из них, с одной стороны, производят нежелательное психологическое воздействие на окружающих, с другой стороны - человек в этом костюме ощущает в электрических полях легкое покалывание током, вызывающее неприятные ощущения. Увеличивается опасность электротравм. К этой группе относятся также ткани типа парчи и шоопированная ткань.

Защитная ткань второго типа имеет скрытую металлизацию. В этом случае тонкая прочная микропроволока вплетается внутрь хлопчатобумажной нити. Изготовленная из таких нитей ткань не имеет недостатков, присущих ткани с открытой металлизацией, и по внешнему виду не отличается от обычной (арт. 7289; СТУ-36-12-199-63).

До последнего времени широко применялась ткань В-1. По основе она содержит на 10 см длины 320 нитей. Из них каждые 2 нити из 3 имеют внутри микропровод. По утку на 10 см содержится 210 нитей, каждая из которых имеет внутри микропровод. По основе данная ткань ослабляет сантиметровые волны на 23,5 дБ (в 225 раз), по утку - на 23,93 дБ (в 241 раз). Защитные свойства этой ткани представлены в табл. 6.2. При этом ослабление в диапазоне частот излучения 0,6-10 ГГц составляет 20-30 дБ. На более высокой частоте облучения степень

защиты уменьшается, поэтому верхняя граница применения средств индивидуальной защиты из такого материала составляет несколько десятков ГГц, нижняя - 0,3-0,6 ГГц. Эти ограничения в ГГц-диапазоне связаны с тем, что не обеспечивается достаточный контакт между проводниками ткани, а в МГц-диапазоне - появлением резонансных изменений величины затухания при соизмеримости длины волны излучения с размерами одежды. В некоторых случаях с целью повышения эффективности защиты, места швов отдельных элементов одежды пропитывают электропроводящей массой или клеем. В последнее время разработана новая радио-экранирующая ткань типа «Восход» (ТУ РТ 17-001-91) на основе полимерных волокон с покрытием из меди, никеля и других металлов. Результаты измерения значений коэффициентов ослабления этих тканей приведены в табл. 5.2.

Наиболее критичным параметром, определяющим экранирующие характеристики полотен с микропроводом, является технология формирования металлического рисунка.

Исследования экранов связаны с измерением эффективности экранирования, т. е. с измерением напряженности электрической и магнитной составляющей ЭМП в одной и той же точке экранируемого пространства до и после установки экрана. Установлено, что трикотажные полотна с микропроводом подавляют ЭМИ радиочастотного диапазона в основном за счет отражения электрической составляющей ЭМП.

Максимальное значение эффективности экранирования в радиочастотном диапазоне не превышает 30 дБ вне зависимости от материала используемого микропровода, а применение таких материалов ограничено достаточно узкой полосой рабочих частот, в которой характеристики достаточно стабильны.

Таблица 5.2

Защитные свойства различных типов экранирующих тканей

Частота излучения, ГГц	Ослабление, дБ			
	В-1	«Восход-1 Н»	«Восход-ЮН»	«Восход 12НМ»
37,5	20	-	-	-
9,3	28	-	70	70
3,0	40	-	70	70
1,2	43	40	8	99
0,6	46	44	75	98
0,3	54	47	70	99

5.1.2. ЗАЩИТНЫЕ ТКАНИ С НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ

Проблемы биологического воздействия ЭМИ, а также вопросы обеспечения электромагнитной совместимости при развитии и усовершенствовании изделий радиоэлектроники и устройств защиты информации приводят к широкому использованию экранирующих и радиопоглощающих материалов. Чаще всего для этих целей используются композиционные материалы, в которых эксплуатационные (механические) характеристики задаются свойствами образующей матрицы (обычно полимерной), а наполнитель взаимодействует с электромагнитным излучением.

Существует возможность создания экранов и поглотителей ЭМИ на основе влагосодержащих композиционных материалов. Матрицей в этом случае являются органические капиллярно-пористые среды, удерживающие влагу за счет сил поверхностного натяжения (например, машинно-вязанное полотно из синтетических волокон). Для этих целей используются пористые среды в виде дисперсных влагопоглотителей, наиболее распространенным из которых является *силикагель*. Подавление электромагнитной энергии осуществляется при взаимодействии излучения с раствором, диэлектрические и проводящие свойства которого можно контролировать, изменяя его состав, а также структуру образующей матрицы, и созданием многослойных материалов с градиентом свойств по толщине.

Вода является наиболее широко распространенным поглотителем ЭМИ миллиметрового диапазона, большинство материалов имеют малые диэлектрические потери в СВЧ диапазоне по сравнению с водой.

Исследования свойств воды в различных дисперсных системах показали, что вода в тонких порах представляет собой многослойную структуру, включающую связанную, граничную и объемную фазы. При этом физические свойства их различны. Связанная вода обладает повышенной плотностью (при влагосодержании материала 1,64 % плотность - $1,74 \text{ г/см}^3$), удельное сопротивление связанной воды очень велико, что объясняется ее пониженной растворяющей способностью. Диэлектрические свойства связанной воды также отличаются от свойств воды в объеме. Хотя единого мнения на этот счет не существует, наиболее распространенным является мнение о частотной независимости диэлектрической проницаемости связанной воды.

Температура замерзания граничного слоя понижена по сравнению с объемной водой, вследствие этого при температурах до 10 °С некоторая доля воды, содержащейся в пористой системе, остается неизмерзшей.

Взаимодействие электромагнитной энергии с молекулами воды в жидкой фазе, содержащейся в поровых пространствах дисперсных систем, приводит к ее частичному отражению и поглощению в растворе. Основными характеристиками взаимодействия ЭМИ с влагосодержащими композиционными материалами являются величина ослабления и отражения электромагнитной энергии, зависящие от количества и свойств поглощающего наполнителя. Таким образом, сравнивая величины ослабления ЭМИ разными образцами, можно анализировать их влагосодержание.

Поглощение энергии ЭМИ диапазона СВЧ связано с релаксационным процессом ориентационной поляризации диполей воды в диапазоне частот до 300 ГГц. Однако при образовании упорядоченной структуры кристаллов льда, молекулы воды теряют свободу вращательных и колебательных движений, вследствие чего поглощение энергии ЭМИ резко снижается.

При конструировании и изготовлении экранов из волокнистых материалов несомненным преимуществом является высокая технологичность таких изделий, которая совместно с высокой производительностью современного вязального оборудования и относительно невысокой стоимостью, как исходного сырья, так и процесса производства, обуславливает перспективность использования технологии машинного вязания полотен (трикотажа) для создания гибких конструкций экранов и поглотителей ЭМИ. Особенности трикотажной технологии позволяют создавать конструкции с повышенной прочностью, износостойкостью, воздухопроницаемостью и другими технологическими и эксплуатационными преимуществами.

Готовое полотно образуется соединением петель, полученных из нитей. Вид переплетения трикотажа определяется формой, размерами, расположением петель и связями между ними и является одним из наиболее существенных факторов, характеризующих структуру трикотажа и его свойства. От вида переплетения зависят прочность, растяжимость, упругость, толщина, вес полотна и ряд других механических и физических его свойств.

Трикотажная технология характеризуется большим разнообразием возможных переплетений, позволяющих создавать полотна с объемными и пространственно-распределенными рисунками в широком

интервале размеров и толщин. Преимущества технологии машинного вязания заключается в возможности формирования определенной пространственной структуры в едином технологическом цикле, в то время когда для тканых или нетканых полотен необходимо введение дополнительных технологических операций.

5.1.3. ФУНКЦИОНАЛЬНО-АКТИВНЫЙ ТЕКСТИЛЬ

В настоящее время среди технических текстильных материалов выделился особый весьма перспективный вид, создание которого связано с развитием нано- и биотехнологий, использованием последних достижений физики и химии. Речь идет о функционально активном текстиле, каждый конкретный вариант которого разработан в соответствии с определенным назначением. Именно последнее и определяет те модифицирующие компоненты, которые будут использоваться для придания текстилю тех или иных свойств.

Одна из наиболее интересных областей применения наноматериалов в текстильной промышленности - это производство тканых поглотителей и экранов электромагнитных волн. Тканые поглотители используются в первую очередь для маскировки военной техники, а экранирующие материалы применимы везде, где требуется защититься от проникновения ЭМП. В частности, при производстве защитной спецодежды для персонала, обслуживающего ретрансляционные станции сетей сотовой связи. И, наконец, большое значение имеет развитие методик экранирования для проблемы обеспечения государственной и коммерческой тайны. Сегодня с «жучка» прослушивания через оконный проем можно получить информацию практически на расстоянии до 1 км. Для защиты помещения, например комнаты переговоров, используются специальные материалы и конструкции, представляющие собой, как правило, унылый металлический короб без окон и дверей. Для защиты оконных проемов разработан специальный материал, поглощающий ЭМИ и сочетающий элегантное дизайнерское решение с радиотехнической сущностью. Но на этом область применения экранирующих материалов не исчерпывается.

В настоящее время при обилии всевозможной электронной техники все более актуальной становится проблема электромагнитной совместимости. В России введены в действие ГОСТ Р 50839-95 и 50842-95, устанавливающие требования к защите от ЭМИ. Основными заказчиками подобных экранов, препятствующих распространению

электромагнитных волн, являются предприятия аэрокосмической отрасли. Ведь отказы в работе автономной бортовой аппаратуры измеряются огромными потерями, в том числе и финансовыми. Для обеспечения согласованной работы бортовых приборов необходимы тонкие поглотители электромагнитных волн, удовлетворяющие определенным критериям. С этой целью разработан наноструктурный микропровод - композит, внутри которого находится черный стержень из аморфных металлических сплавов на основе переходных металлов, а вокруг - стеклянная изоляция. Толщина жилы и изоляции составляет соответственно 2–30 и 5–10 мкм. Электрические свойства провода могут меняться в широком диапазоне в зависимости от геометрии и химического состава жилы. Формируется этот материал методом индуктивной плавки, при которой металл расплавляется, а стекло только размягчается. При понижении температуры происходит процесс затвердевания, однако кристаллическая решетка не формируется. В итоге получается провод в стеклянной изоляции. При небольшом повторном нагревании материала образуются нанокристаллиты. Интересны свойства переходного слоя между металлом и стеклом (проводником/изолятором) толщиной всего 50 нм, т. е. переход между двумя аморфными фазами. Из-за сильного различия в термических коэффициентах линейного расширения провод находится в напряженном состоянии. Благодаря этим напряжениям материал имеет магнитные свойства в СВЧ диапазоне. (Тут следует отметить, что у всех известных веществ, за исключением ферритов, в этом диапазоне магнитных свойств практически нет.) По прочности материал на основе микропровода не уступает металлокорду. Таким образом, удалось получить эффективный электромагнитный экран, поглощающий как электрическое, так и магнитное поле. Выпускается он на экспериментальной российской установке, выдающей за смену 100 км провода. Микропровод может применяться для изготовления радиопоглощающих и экранирующих материалов, различных датчиков, резисторов, кодирующих меток и другой продукции. Специалисты ЦКБ научились присоединять к микропроводу нити любой основы. Так, например, для военных целей требуется негорючесть, поэтому нужно брать стеклянную нить. Итогом разработки и опробования соответствующей технологии на текстильных предприятиях стал материал из наноструктурного ферромагнитного микропровода, который гарантированно сохраняет свои свойства в течение 15–20 лет. Он эффективно скрывает военную технику от обнаружения в оптическом, инфракрасном и радиодиапазоне. По словам разработчиков, если принять величину падающего потока излучения за 100%, то отражается

только 0,5 %, что не дает возможности обнаружить объект. В дальнейшем удалось использовать и другую основу для микропровода: хлопок и шелк. Получились разновидности текстильных маскировочных материалов, из которых можно изготавливать, как уже говорилось, защитные шторы. Аналогичным образом пытались работать и со льном, однако льняная нить не очень ровная, так что ее использование достаточно проблематично. Кстати, говоря о льне, стоит заметить, что его элементарные волокна имеют веретенообразную поверхность и в отличие от шерсти и хлопка не обладают сцепляемостью. Поэтому в текстильном производстве это растительное сырье перерабатывается в виде комплексов, раздробленных по толщине. Как следствие, принципы наноконструирования льняных текстильных материалов имеют свои особенности. Возможны и другие варианты специальных материалов, в частности, текстиль с защитным покрытием толщиной от 5 нм, полученным способом вакуумного напыления. Однако таким методом нельзя напылить покрытие на хлопок или шерсть, т. к. в них слишком много влаги - установка перестает работать в штатном режиме. Тем не менее, на ней можно получать монофиламентные волокна, а значит, и ткани типа тюля. На базе таких волокон разработан материал серебристого цвета с прекрасным свойством, заключающимся в невозможности наружного прослушивания по электромагнитному каналу. Поскольку обратное отражение сигнала составляет около 1 %, работу компьютера и других устройств отследить невозможно. Один из вариантов применения материалов-поглотителей рассчитан на самую широкую аудиторию. Можно использовать их для создания чехольчиков для мобильных телефонов, как известно, излучающих ЭМИ разных частотных диапазонов. Думается, что на этом область применения функционально защитного текстиля далеко не исчерпывается.

5.2. ЭКРАНИРУЮЩИЕ ТКАНИ С СЕТОЧНЫМИ МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ СЛОЯМИ

Одним из наиболее широко распространенных технологических решений создания гибких электромагнитных экранов и защитной одежды является использование в структуре полотен материалов, обладающих высокой проводимостью и эффективностью экранирования - металлов. Металлические рисунки могут формироваться различными способами, такими, как использование металлических порошков, дисперсных металлосодержащих паст, красок и т. д., однако наиболее про-

стой метод изготовления экранирующих материалов - формирование проводящих структур с помощью металлических проводников в виде комплексных нитей или микропровода.

Пространственная конфигурация проводящего материала в плотне формируется прокладыванием его вместо одной или нескольких нитей, заправленных в нитеводы трикотажно-вязальной машины. Этот способ используется для изготовления полностью металлических сеток, которые применяются в качестве отражающих элементов конструкций экранов, а также антенной техники, однако такие конструкции недолговечны при многократном изгибании.

Исследования экранов связаны с измерением эффективности экранирования, т. е. с измерением напряженности электрической и магнитной составляющей ЭМП в одной и той же точке экранируемого пространства до и после установки экрана. Установлено, что трикотажные полотна с микропроводом подавляют ЭМИ радиочастотного диапазона в основном за счет отражения электрической составляющей ЭМП, что соответствует теоретическим представлениям о принципе действия сеточных металлических экранов.

Максимальное значение эффективности экранирования в радиочастотном диапазоне не превышает 30 дБ вне зависимости от материала используемого микропровода, а применение таких материалов ограничено достаточно узкой полосой рабочих частот, в которой характеристики достаточно стабильны.

На СВЧ значительное влияние начинают оказывать геометрические размеры ячеек в сетке и заполненность ее металлическим материалом. При приближении длины волны к размерам отверстий в экране каждое из них становится излучателем, а эффективность сетки стремится к нулю. При этом повышение плотности сеток (уменьшение размеров промежутков между проводниками) позволяет увеличить эффективность экранирования, однако приводит к повышенной материалоемкости и ухудшает механические характеристики экранов.

Наиболее критичным параметром, определяющим экранирующие характеристики полотен с микропроводом, является технология формирования металлического рисунка. При формировании рисунка из металлической нити или микропровода путем провязывания их совместно с ассистирующей нитью из синтетического волокна износостойкость и гибкость трикотажных полотен значительно увеличиваются, однако это негативно сказывается на эффективности таких экранов. При увеличении частоты эффективность таких полотен снижается, и

применение трикотажных экранов с сетчатой проводящей структурой ограничено.

Немонотонная зависимость эффективности сеточных экранов от частоты обуславливается в первую очередь влиянием индуктивности проводов и емкостными взаимосвязями между ними, что увеличивает реактивную составляющую сопротивления проводников. При повышении частоты вклад реактивного индуктивного сопротивления в общее сопротивление провода оказывается значительно больше активной части. Однако на эффективность экрана дополнительно оказывают влияние уменьшение переходных емкостных сопротивлений между проводами и поверхностный эффект.

На СВЧ значительное влияние начинают оказывать геометрические размеры ячеек в сетке и заполненность ее металлическим материалом. При приближении длины волны к размерам отверстий в экране каждое из них становится излучателем, а эффективность сетки стремится к нулю. При этом повышение плотности сеток (уменьшение размеров промежутков между проводниками) позволяет увеличить эффективность экранирования, однако приводит к повышенной материалоемкости и ухудшает механические характеристики экранов.

При формировании рисунка из металлической нити или микропровода путем провязывания их совместно с ассистирующей нитью из синтетического волокна износостойкость и гибкость трикотажных полотен значительно увеличиваются, однако это негативно сказывается на эффективности таких экранов. При увеличении частоты эффективность таких полотен снижается, и применение трикотажных экранов с сеточной проводящей структурой ограничено.

5.3. ЭКРАНИРУЮЩИЕ ТКАНИ С КОМБИНИРОВАННЫМИ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИМИ НИТЯМИ

С появлением электрических и электронных устройств во всем мире защита от электромагнитных волн, излучаемых приборами, является одной из главных задач, которую необходимо решить. Среди различных предлагаемых решений, текстильные изделия и основанные на тканях композиционные материалы получили наиболее широкое распространение из-за универсальности этих текстильных материалов. Основным источником электромагнитного излучения - это электрические сигналы, испускаемые различными приборами. Электромагнитное излучение испускают: компоненты катушек индуктивности, цифровые

устройства и высоковольтные провода, несущие большой переменный ток в энергетических частотах, которые способны к испусканию СВЧ волн. Для решения проблемы защиты от электромагнитных волн необходимо экранировать (отражать) эти виды излучений.

Одним из способов экранирования ЭМИ является применение тканей специального назначения с комбинированными электропроводящими нитями в основе и утке.

В настоящее время разработана технология производства комбинированных электропроводящих нитей, где в качестве электропроводящего элемента была выбрана медная микропроволока. Этот выбор обусловлен тем, что медная микропроволока обладает высоким поглощением и низким отражением электромагнитной энергии, а также лучшими электрическими свойствами по сравнению с другими металлами. Материалы с высокими потерями за счет поглощения и низкой отражательной потерей очень эффективны для экранирования электромагнитной энергии. Потери за счет поглощения определяются как результат удельной электропроводности.

На основе литературного анализа было установлено, что необходимый уровень экранирования ЭМИ для использования в военных, электронных, бытовых и других отраслях составляет приблизительно 99,8 - 99,99 %. Разработка тканей с такой эффективностью экранирования была бы эффективным решением для защиты человека и электронных приборов от излучения и электромагнитных помех.

Для наработки тканей специального назначения с экранирующими свойствами использовались комбинированные электропроводящие нити, содержащие в своей структуре медную микропроволоку диаметром 0,05 и 0,1 мм.

Способ получения экранирующих тканей специального назначения успешно доказал свою целесообразность. Было установлено, что эффективностью электромагнитного экранирования тканей специального назначения с использованием медной микропроволоки можно варьировать путем изменения переплетения, плотности ткани по основе и утку, а также диаметра медной микропроволоки.

Установлено, для достижения максимальной экранирующей способности наиболее целесообразно вырабатывать ткани сатинового переплетения с максимально возможной плотностью ткани по основе и утку - с диаметром медной микропроволоки 0,1 мм.

Дальнейшие исследования по изучению влияния структуры тканей специального назначения на экранирующую способность должны проводиться в целях возможности использования таких тканей в авто-

мобильной промышленности, авиации, строительстве, бытовой электронике, электроприборах и проводящего наполнителя в композитных материалах.

5.4. ФОЛЬГИРОВАННЫЕ ЛЕНТЫ ДЛЯ ЭКРАНИРОВАНИЯ ОТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ

5.4.1. ФОЛЬГИРОВАННЫЕ ЛЕНТЫ 3М

Это специальные ленты на металлической основе, которые обеспечивают надежный электрический контакт с рабочей поверхностью и низкое контактное сопротивление. Ленты применяются для экранирования электромагнитных помех, в цепях заземления и для отвода статического заряда.

Фольгированные ленты обладают способностью экранировать сигналы, излучаемые компонентами устройств, и предотвращать вредное воздействие этих сигналов на другие цепи. Типичной областью применения этих лент является экранирование дверей и стенок шкафов с электронными приборами, создание экранов вокруг отдельных электронных компонентов и кабелей.

Экранирующие ленты 3М позволяют упростить процедуру выявления и устранения неисправностей в экранировании. После того, как определено место утечки электромагнитных помех, эта утечка легко и эффективно устраняется с помощью экранирующей ленты. Ленты находят широкое применение при конструировании и испытаниях электронных приборов, а также в лабораториях контроля качества при изготовлении опытных образцов. Эффективность экранирования фольгированными лентами представлена на рис. 5.1.

Экранирующие ленты предлагают легкий путь устранения потенциально опасного статического заряда, накапливающегося на полупроводниковых приборах, ЭЛТ и периферийных устройствах компьютеров. Прочное крепление и прекрасная проводимость «сквозь адгезив» обеспечивают надежное заземление.

Экранирующие ленты компании 3М используются в качестве прослойки между обмотками трансформатора для уменьшения электростатического взаимодействия, а также наматываются с наружной стороны соленоидов, реле и других компонентов с целью предотвращения возникновения широкополосных электромагнитных помех.

Можно рассмотреть следующие конструкции экранирующих лент:
лент:

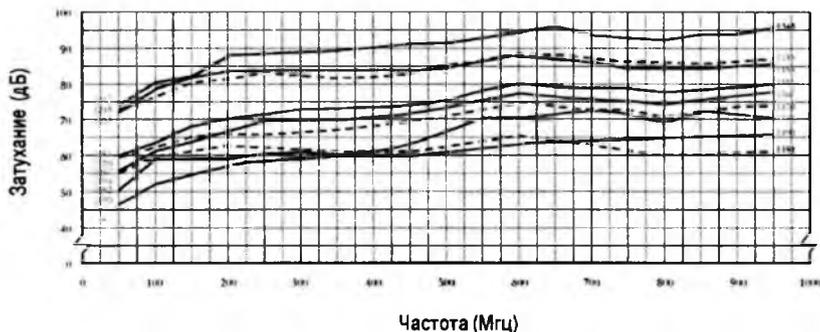


Рис. 5.1. Эффективность экранирования (затухание в дальней зоне). Типичные величины (ASTM-D-4935)

а) *Гладкие основы из фольги с проводящим адгезивом.* 3М ленты для экранирования электромагнитных помех с гладкой основой из алюминиевой (модель 1170), медной (модель 1181) и луженой медной фольги (модель 1183). Они обеспечивают надежный электрический контакт с рабочей поверхностью за счет свойств уникального адгезива. Проводящие частицы, равномерно распределенные в адгезиве, создают между основой и экранируемой поверхностью множество межсоединений с низким сопротивлением (см. рис. 5.2).

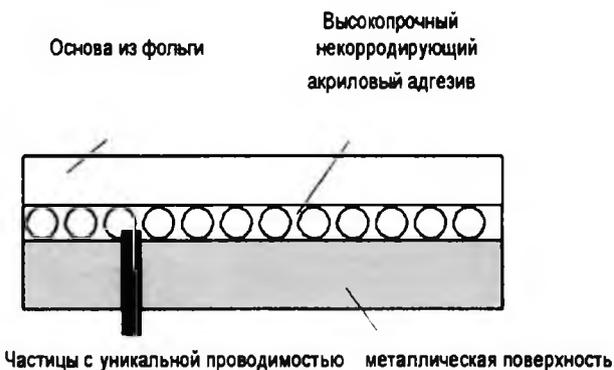


Рис. 5.2. Ленты для экранирования электромагнитных помех с гладкими основами из фольги с проводящим адгезивом

е) *Гладкая основа из фольги с непроводящим адгезивом.* Выпускаемая 3М лента модели 1194 с гладкой основой из медной фольги имеет такой же высококачественный устойчивый к действию растворителей акриловый адгезив, как и другие фольгированные ленты компании 3М. Высокая пригодность к пайке обеспечивает экономичность при выборе этой ленты в качестве экранирующего материала для разъемов и кабелей, для заземления, электростатического экранирования обмоток трансформатора и внешних витков соленоидов, а также для крепления контактов проводников на пленочно-фольговых конденсаторах.

ж) *Адгезив.* При изготовлении как проводящего, так и непроводящего адгезива, используется одна и та же бескислотная, коррозионно-стойкая акриловая смола.

5.4.2. ИНЖЕНЕРНЫЙ НАБОР ЭКРАНИРУЮЩИХ ЛЕНТ

Инженерный набор экранирующих лент. Инженерный набор удобен при конструировании и испытаниях электронных приборов, а также в лабораториях контроля качества при изготовлении опытных образцов. Данный набор включает девять рулонов лент: 1170, 1181, 1182, 1183, 1190, 1194, 1245, 1267 и 1345. Длина лент – 3,66 м, ширина – 19 мм. Основные технические параметры лент указаны на коробке. Среди них:

Проводящая тканевая лента с медно-никелевым покрытием CN 3190. Лента 3М™ CN 3190 Cu-Ni состоит из полиэфирной ткани с антикоррозионным медно-никелевым напылением и проводящим акриловым адгезивом, чувствительным к давлению. Лента поставляется с лайнером, отделяемым при монтаже.

CN 3190 применяется для тех же целей, что и фольгированные ленты, но ее необыкновенная прочность к разрывам, эластичность и легкий вес дают дополнительные преимущества. Одним из применений CN 3190 является производство электронных паспортов. Лента интегрируется в обложку паспорта и создает непрерывный экран, который не позволяет несанкционированно считывать данные паспорта в закрытом состоянии.

Экранирующие листы с высоким коэффициентом магнитной проницаемости (серия 1380). Экранирующий лист 1380 представляет

собой слоистую структуру – мягкая магнитная прослойка, заключенная между полимерными пленками, скрепленными каучуковым термоактивным чувствительным к давлению адгезивом. Несмотря на сложную конструкцию, этот материал очень тонкий, легкий и гибкий. Поставляется с отделяемым лайнером. Основные параметры экранирующих листов приведены в табл. 5.4.

Листы 1380 используются там, где необходимо превосходное магнитное экранирование на низких частотах. Типичные области применения - производство мобильных телефонов, персональных компьютеров, электронно-лучевых трубок и пр.

Алюминиевая лента, ламинированная полиэфирной пленкой с проводящим акриловым адгезивом AL-35FR. Лента AL-35FR обладает превосходной проводимостью «сквозь адгезив». Она состоит из мягкой алюминиевой основы, проводящего акрилового адгезива и тонкой эластичной полиэфирной пленки, защищающей основу и обеспечивающей ее электрическую изоляцию. Лента признана UL 510 как огнезащитная.

Таблица 5.4

Параметры экранирующих листов серии 1380

Общая толщина	0,3 мм
Толщина магнитного слоя	0,02 мм
Плотность магнитного потока	1, 23 Тл
Максимальная магнитная проницаемость (50 Гц)	100000
Плотность материала	3 7,3 г/см
Сопrotивление	1.2 мкОм.м

Поставляется с отделяемым лайнером. Используется для экранирования и защиты от электромагнитных помех в электронном оборудовании, компонентах, экранирующих комнатах и пр. Основные параметры ленты приведены в табл. 5.5.

Таблица 5.5

Основные параметры алюминиевой ленты, ламинированной полиэфирной пленкой с проводящим акриловым адгезивом AL-35FR

Общая толщина	0,06 мм
Толщина основы	0,037 мм
Адгезия к стали	4,4 Н/мм
Сопrotивление сквозь адгезив	$9,3 \cdot 10^{-6} \text{ Ом/мм}^2$

5.4.3. АБСОРБЕРЫ, ПОГЛОЩАЮЩИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗЛУЧЕНИЯ (СЕРИЯ АВ 5000)

Данные абсорберы - это специально сформированные полимерные материалы, которые отражают электромагнитное излучение и одновременно поглощают его, преобразуя в тепловую энергию. Таким образом, обеспечивается снижение уровня помех в широком диапазоне частот. Использование абсорберов рекомендовано в следующих случаях:

- для дополнительной защиты элементов печатных плат от электромагнитных помех при ограниченных возможностях по перепроектированию схем;
- при затруднительной локализации источников помех во внутренних системах;
- когда недостаточно места для установки объемных материалов для обеспечения электромагнитной совместимости;
- для улучшения характеристик электронных схем, антенн спутниковой связи, беспроводных устройств, радиочастотных меток и пр.

Спектр применений абсорберов включает мобильные телефоны, компьютеры, цифровые видеокамеры (снижение видео-шумов на цифровом преобразователе), фотоаппараты, USB-коннекторы (для улучшения скорости и качества передачи данных), радиочастотные устройства, системы уклонения от радаров в военной технике, технологии «стелс» (stealth) и пр.

На способность абсорбера к поглощению влияют такие факторы, как толщина полимера, качество контакта с основой, гладкость поверхности ос- новы, сила и частота электромагнитного излучения и пр. Поэтому перед применением абсорбера в конкретных изделиях необходимо провести стандартные тесты.

Таблица 5.6
Основные параметры экранирующей вспененной прокладки SF 2500

Цвет	Металлик
Общая толщина	0,53 мм
Усилие на разрыв	97,8 Н/10 мм
Максимальное удлинение	80 %
Адгезия к стали	2,6 Н/10 мм
Сопrotивление сквозь адгезию	$9,3 \cdot 10^{-6}$ Ом/мм ²

Экранирующая вспененная прокладка SF 2500. Представляет собой проводящую полиуретановую пену, ламинированную полиэфирной пленкой, с акриловым адгезивом. Поставляется с лайнером. Используется там, где наряду с превосходными экранирующими свойствами требуется амортизация ударов и защита от механических повреждений. Основные параметры экранирующей вспененной прокладки приведены в табл. 5.6.

eCAP состоит из токопроводящей ткани и слоя акрилового адгезива, в структуру которого внедрена трехмерная матрица из проводящих частиц. Эта матрица обеспечивает электропроводность уплотнителя в трехмерном пространстве: в плоскости адгезива – оси X и Y и сквозь толщину адгезива – ось Z. eCAP поглощает механические воздействия благодаря упругости и эластичности акрилового материала.

5.5. НАНО-МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ СПЕЦОБЪЕКТОВ

Рассмотрим некоторые примеры применения нанотехнологий для камуфляжа и средств маскировки. Прежде всего, можно упомянуть создание защитных и маскировочных покрытий на основе технологий, используемых в гибких дисплеях. Например, мобильные частицы пигмента, покрывающие поверхность скрываемого объекта, могут изменять свое положение или ориентацию, создавая новую окраску, подобно тому, что происходит при движении крыльев насекомых, когда восприятие окраски зависит от направления наблюдения. Такой «активный» камуфляж может применяться не только в обмундировании личного состава, но и для маскировки военной вычислительной техники. Уже сейчас методами фотоники можно создавать нити и ткани, поглощающие излучение в видимом и инфракрасном диапазонах, причём коэффициент отражения для такого покрытия можно регулировать в реальном времени. Такие покрытия могут одновременно создавать в других частотных диапазонах некоторые «отражательные паттерны». Эти узоры или образы можно будет видеть специальными устройствами по известному принципу «свой - чужой». Предполагается, что практическое применение подобных покрытий осуществится в ближайшие 5 лет.

Центральное конструкторское бюро специальных радиоматериалов занимается исследованием и применением ультрадисперсных и наноструктурных материалов больше 10 лет. Предприятие обладает лицензией МО РФ на деятельность в области создания средств защиты

информации и является аккредитованной испытательной лабораторией Восьмого управления Генерального штаба Вооружённых Сил РФ в области средств защиты информации. Совместно с Московским институтом стали и сплавов был разработан радиопоглощающий материал на основе макропористого носителя с частицами никеля размером 10 - 100 нм. В качестве носителя был выбран материал ТЗМК 10, который применялся на космическом аппарате «Буран». Энергия падающей электромагнитной волны преобразуется в тепловую за счёт колебаний частиц, при этом благодаря различному размеру последних поглощение осуществляется в широком диапазоне частот. Коэффициент отражения такого РПМ не хуже 15 дБ в диапазоне 8 - 30 ГГц. Разработан сверхширокодиапазонный радиопоглощающий материал на основе наноструктурного ферромагнитного микропровода (НФМП) в стеклянной изоляции. Данный материал МРПК-1Л в 2006 году принят на снабжение МО РФ. Основным радиопоглощающим элементом в нём является НФМП, представляющий собой тонкий металлический сердечник в стеклянной изоляции. Технология получения НФМП обеспечивает одновременное плавление металла, размягчение стеклянной трубки, окружающей навеску металла, и закалку получающегося композита со скоростью 10^6 град/с. В результате получается трёхслойный композит, состоящий из металлического проводника диаметром 1 - 30 мк, наноструктурного переходного слоя толщиной порядка 50 нм и стеклянной изоляции толщиной 2–30 мк. Благодаря разнице коэффициента термического расширения металла и стекла, а также наличию наноструктурного переходного слоя, материал металлического сердечника находится под воздействием гигантских напряжений (109 Па) и обладает уникальными электрофизическими характеристиками в СВЧ-диапазоне. Кроме этого НФМП обладает следующими преимуществами, которые до сих пор не могли быть реализованы в одной технологии:

- уникальные массогабаритные характеристики: 1 км НФМП весит 1 г;
- инертная стеклянная изоляция, позволяющая сочетать наполнитель с любой матрицей;
- возможность простыми технологическими приёмами менять электрофизические свойства НФМП в широком диапазоне (изменение: химического состава сплава; диаметра металлической жилы; толщины и химического состава стеклянной изоляции; соотношения диаметра металлической жилы и толщины изоляции и т. д.);
- возможность получения до 10 км НФМП за одну технологическую операцию.

Материал МРПК-1Л на основе НФМП обладает следующими характеристиками:

- рабочий диапазон длин волн 0,2–15 см;
- коэффициент отражения, не хуже 17 дБ;
- масса 1 м² 1 кг;
- рабочий диапазон температур от +60 до –60⁰ С.

Материал МРПК-1Л – самозатухающий, экологически безопасный, устойчив к воздействию влаги и горюче-смазочных материалов. Цвета окраски - любые типовые растительные тона (светло- и тёмно-зеленый, жёлтый и др.). Материал МРПК-1Л предназначен для:

- создания различных маскировочных устройств в виде чехлов для скрытия военной техники;
- оборудования безэховых камер;
- устранения нежелательного электромагнитного фона;
- обеспечения экологической электромагнитной безопасности биологических объектов;
- пассивной защиты от несанкционированного доступа к информации по радиоканалам. Материал МРПК-1Л обладает следующими преимуществами:
- сверхширокий рабочий диапазон длин волн;
- простота монтажа на стационарных объектах и военной технике;
- экологическая чистота.

На основе НФМП разработан модельный суперлёгкий материал с уникальными поглощающими и массогабаритными параметрами: коэффициент отражения не хуже 15 дБ в диапазоне 5 - 30 ГГц, толщина 5–6 мм, вес 1 м² 50 г. Ведутся работы по поиску технологии создания поглощающей «краски» с наполнителем из НФМП. На основе нано-структурного ферромагнитного микропровода разработан уголко-вый отражатель, который представляет собой лёгкую конструкцию, обеспечивающую высокий уровень отражения радиолокационного сигнала.

Конструктивное исполнение уголкового отражателя следующее:

- отражающая поверхность изготовлена из свето-прозрачного материала (стекло, пластик) с введённым в него нано-структурным ферро-магнитным микро-проводом (НФМП).

Основные отличия от известных металлических уголковых отражателей:

- малый вес;
- возможность управления диаграммой рассеяния;
- изготовление в свето-прозрачном варианте;
- работа в любых климатических условиях в сочетании с коррозионной стойкостью;
- устойчивость к вибрационным и ветровым нагрузкам;
- возможность сочетания со стандартными навигационными световыми знаками без существенного увеличения их стоимости.

Устройство может найти широкое применение при производстве средств точной имитации радиолокационного образа объектов ВВТ (создание ложных целей). Устройство позволяет обнаружить месторасположение объекта в любых погодных условиях. В сочетании со стандартным навигационным бакеном может служить для индикации фарватеров, подводных трубопроводов и других значимых объектов. НФМП также послужил основой для создания системы магнитных маркеров для кодирования и идентификации объектов – групп товаров, ценных бумаг, систем доступа, пластиковых карт и др. Такое кодирование применяется для защиты от подделки, при сортировке, в кодовых ключах, магнитных карточках. Магнитный маркер несёт неизменяемый и нестираемый код, который можно уничтожить только механически. Состав и объём информации устанавливаются при изготовлении метки диаметром 20 мк и длиной 5–7 мм. Основные преимущества магнитного маркера на основе НФМП:

- устойчивость магнитного маркера к внешним воздействиям и магнитным полям, т. к. он сохраняет свои свойства после воздействия температуры до 400°C ;
- коррозионная стойкость;
- устойчивость к экранированию: считываются маркеры на металлических поверхностях за металлическими экранами;
- устойчивость к механическим воздействиям: критический радиус изгиба НФМП составляет не больше 0,2 мм;
- малые физические размеры (20 мк) магнитного маркера дают возможность для скрытного его размещения.

Система идентификации, построенная на магнитных маркерах, относительно проста при высочайшем уровне защиты.

В 2009 году успешно проведена конструкторская разработка костюма оператора блокиратора радиоуправляемых взрывных устройств. Наличие нано-структурного ферромагнитного микропровода в составе ткани костюма обеспечивает снижение уровня падающего ЭМИ до 1000 раз. В настоящее время ведётся разработка экранирующих материалов и устройств, в том числе для защиты от несанкционированного доступа к информации по электромагнитному каналу, применяемых для защиты окопных проёмов выделенных помещений.

Разработаны новые пленочные и тканые поглотители, получаемые методом магнетронного напыления. Метод позволяет получать тонкие – до 5 нм – слои металлов и сплавов. Была разработана радиотехническая конструкция поглотителя, позволяющая эффективно поглощать или рассеивать падающую электромагнитную волну.

На основе этих материалов разработан и изготовлен чехол, обеспечивающий снижение уровня избыточного излучения мобильных телефонов в режиме ожидания и связи с базовой станцией. Такой чехол может быть использован для телефонов стандартов GSM-900, GSM-1800, GSM-1900, CDMA. Рабочий слой изготавливается из радиопоглощающего трикотажа и обеспечивает снижение уровня вредного воздействия побочного электромагнитного излучения в 20–40 раз.

Одной из последних разработок является защитно-маскировочный экран (ЗМЭ). Он предназначен для скрытия от средств разведки противника и защиты бронированной техники (ББТ) от современных средств поражения, действующих из верхней полусферы, в том числе и ВТО. ЗМЭ обеспечивает защиту укрываемой бронетехники комбинированным гибким покрытием на поверхности земли и в окопах от боеприпасов кумулятивного действия с головками самонаведения, управляемых и неуправляемых. ЗМЭ вызывает срабатывание взрывателей мгновенного действия на безопасных для защищаемой техники удалениях. Защитный маскировочный экран соответствует требованиям, предъявляемым к технике при ведении боевых действий в различных климатических условиях. Конструкция ЗМЭ позволяет снизить вероятность поражения ББТ, а также важных стратегических объектов военного и гражданского назначения (пункты управления, базы ВМФ, ВВС, склады вооружений, атомные электростанции и др.). Уникальность технического решения ЗМЭ обеспечивает возможность создания укрытий различной формы и размера. В настоящее время решается вопрос о принятии ЗМЭ на снабжение ВС МО РФ.

На основе плёночных материалов разработан современный лёгкий имитатор радиолокационной цели. Имитационное средство (ИС)

предназначено для воспроизведения радиолокационных демаскирующих признаков техники ПВО Сухопутных войск. ИС воспроизводит демаскирующие признаки, обнаруживаемые самолётными и космическими радиолокационными средствами разведки, а также радиолокационными системами наведения оружия. ИС техники войск ПВО используется для создания ложных позиций частей и подразделений ПВО Сухопутных войск и применяется совместно с табельными средствами оптической маскировки. Область применения ИС – создание ложных позиций вооружения и военной техники ПВО Сухопутных войск в боевой обстановке, в угрожаемый период, а также при проведении учений. ИС воспроизводит в радиозлектронной области (0,8...30 см) демаскирующие признаки реальных изделий в транспортном положении, выявляемые техническими средствами космической и воздушной радиолокационной разведки при любых углах визирования.

Кроме этого разработана технология изготовления экологически чистых экранирующих тканей для обеспечения медико-биологической защиты персонала и населения, работающего и проживающего в условиях вредного воздействия ЭМП различной частоты и интенсивности, а также для решения задач защиты информации.

5.6. ЭКРАНИРУЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ ПО ТЕХНОЛОГИИ СТЕЛС (STEALTH)

Технологии снижения заметности (англ. Stealth technology) - комплекс методов снижения заметности военной техники в радиолокационном, инфракрасном и других областях спектра обнаружения посредством специально разработанных геометрических форм и радиопоглощающих материалов и покрытий, что резко уменьшает радиус обнаружения и тем самым повышает выживаемость техники.

Принцип технологии СТЕЛС основан на том, что сигнал от РЛС за счет особенностей корпуса не отражается в сторону радара. Сейчас существуют два основных способа достижения этой цели:

- Поверхность техники выполняется угловатой формы, с прямыми поверхностями и острыми углами.
- Поверхность покрывается специальным, поглощающим радиоволным покрытием.

Как правило, применяют обе этих технологии. В сумме они обеспечивают максимальную невидимость от радиолокационных средств противника.

Следует отметить, что значительного поглощения радиоволн можно добиться только в сантиметровом диапазоне, и гораздо хуже в дециметровом. В силу физики распространения радиоволн сделать объект малозаметным в метровом диапазоне, когда длина волны сравнима с собственными размерами объекта, изменением его формы в принципе невозможно. Также невозможно добиться полного поглощения любого радиоизлучения, падающего на объект под произвольным углом. Поэтому главной целью при выборе формы является отражение волн в сторону от излучателя. Таким образом, часть сигнала поглощается специальными покрытиями, а остальная часть отражается в сторону, не позволяя радиоэхе вернуться к наблюдающей РЛС (что особенно эффективно против совмещённых приёмопередающих станций).

Технологии снижения заметности являются самостоятельным разделом военно-научной дисциплины «электронные средства противодействия», охватывают диапазон техники и технологий изготовления военной техники (самолётов, вертолётов, кораблей, ракет и т. д.).

По большинству машин, созданных с применением технологий снижения заметности, отсутствуют независимые данные по величине эффективной поверхности рассеяния в различных диапазонах, так как экспертная оценка этой информации может повысить их уязвимость. Часть данных о заметности подобных машин основана на теоретических оценках. Также существуют случаи намеренной дезинформации, завышающие, либо, наоборот, занижающие реальное значение защиты. Поэтому ко всем оценкам величин защиты малозаметных машин следует относиться с высокой степенью осторожности.

Историческая справка. 22 августа 1980 года оборонное ведомство США сделало сообщение о важном техническом открытии, имеющем большое военное значение - создании в США практически не обнаруживаемых радиолокаторами самолетов, разработанных по технологиям, получившим название “Стелс” (Stealth). Заявление было встречено как сенсация, хотя работы по уменьшению эффективной отражающей поверхности (ЭОП) велись давно.

В США задача разработки таких самолетов-невидимок была поставлена в 1941 году, а в Великобритании было найдено более простое на тот момент средство противодействия - дипольные отражатели. Однако в послевоенные годы в радиолокационных станциях (РЛС) стали

широко применяться устройства селекции движущихся целей на фоне мешающих отражений, а также автокомпенсаторы и другие средства защиты от активных помех. В итоге эффективность применения помех снизилась. Тогда действия авиации при преодолении системы противозушной обороны (ПВО) стали переводить на малые и предельно малые высоты, где интерференционное влияние Земли существенно снижает возможности РЛС по обнаружению. Ответом на это явилось использование в интересах ПВО бортовых РЛС дальнего радиолокационного обнаружения типа AWACS.

В итоге это вынудило разработчиков средств воздушного нападения ступить на давно известный, но не применявшийся из-за большой сложности и стоимости путь - снижение ЭОП. Важную роль в принятии решений по созданию малозаметных самолетов сыграло и уничтожение над территорией СССР в 1960 году американского самолета-разведчика U-2 фирмы LOCKHEED, что привело к разработке малозаметного самолета-разведчика SR-71. В итоге были созданы новые бомбардировщики и истребители с малой ЭОП, примерами которых являются стратегические бомбардировщики B-1B и B-2, истребитель-бомбардировщик F-117A. Заметим, что стоимость этих самолетов оказалась крайне высокой. F-117A в начале 90-х годов стоил более 40 миллионов долларов США, а B-2 – несколько сотен миллионов. Это даже приводило к курьезным ситуациям – для защиты «дорогой игрушки» B-2 в ходе налета требовалось несколько эскадрилий истребителей, которые сами демаскировали бомбардировщик.

Эффективность технологии СТЕЛС. В СССР, а затем и в Российской Федерации, задача снижения радиолокационной заметности самолетов превратилась в не менее актуальную задачу снижения заметности наземных объектов (в первую очередь — вооружения и техники). В настоящее время эта задача решается путем использования радиолокационных маскировочных покрытий (РЛМП), приобретаемых в других странах или разрабатываемых и производимых в республике. Кстати, наши собственные разработки отдельных радиопоглощающих материалов, демонстрирующиеся на выставках в последние годы, обладают высоким качеством при сравнительно низкой стоимости.

По принципу действия основная часть радиолокационных маскировочных покрытий, обеспечивающих преобразование энергии падающей электромагнитной волны в тепловую энергию, делится на интерференционные и поглощающие. В интерференционных покрытиях создаются такие условия, при которых падающая и отраженная волны

взаимно компенсируют друг друга. Кстати, это явление в оптическом диапазоне наблюдали практически все – пленка бензина на поверхности воды при солнечном освещении переливается различными цветами. Это связано с интерференцией многоспектрального «белого» света на пленке бензина со случайно изменяющейся толщиной, при которой компенсируются все спектральные компоненты кроме тех, которые мы видим как отражения определенного цвета. Поглощающие покрытия содержат специальные поглощающие компоненты (графит, порошки ферритов и пр.), а структура покрытий обеспечивает снижение отражений от границы раздела сред (воздух - покрытие).

Наряду с положительными свойствами радиолокационные маскировочные покрытия имеют и ряд существенных недостатков – узкополосность (обеспечение параметров только в определенном диапазоне волн), высокий уровень собственной удельной ЭОП, относительно высокую стоимость, низкую износоустойчивость, а в некоторых случаях и неудовлетворительные весогабаритные характеристики. Разработчики и производители РЛМП, как правило, «не рекламируют» этих недостатков, и создается иллюзия того, что специально изготовленное РЛМП – это «решение для всех времен и народов», за которое не грех заплатить достаточно большие деньги. При этом редко вспоминают об «адекватности» характеристик РЛМП условиям применения, заключающейся в ответе на вопрос – когда достигается полная маскировка? Прямой ответ прост – тогда, когда свойства объекта, покрытого РЛМП, полностью соответствуют радиолокационным свойствам местности, на которой объект находится. Игнорируя это, механически перенося требование «безэховости» на маскирующие покрытия и стремясь получить максимальное поглощение сигнала РЛС, забывают про «адекватность» – удельная эффективная отражающая поверхность (ЭОП) покрытия не должна быть меньше или больше удельной ЭОП местности. Например, покрытие не должно поглощать сигнал РЛС «больше, чем требуется» на этой поверхности, так как при «излишнем» поглощении на месте маскируемого объекта образуется «черная дыра», которую отлично видит радиолокатор противника, анализирующий как положительный (сигнал в анализируемой точке выше «местного» фона), так и отрицательный (сигнал ниже «местного» фона) контраст радиолокационных отметок. Из этого следует ясное требование к РЛМП – свойства покрытия должны соответствовать радиолокационным свойствам поверхности, на которой осуществляется маскировка.

Посмотрим на решение проблемы снижения радиолокационной (да и оптической в видимом и инфракрасном диапазонах) заметности

стационарных, передвижных и подвижных наземных объектов с позиции «эффективность – стоимость — доступность». В связи с этим, приведем два известных факта. Во-первых, известно, что дождь и пары воды существенно снижают дальность радиолокационной видимости из-за поглощения и отражения электромагнитных волн. Во-вторых, электромагнитные волны дециметрового, сантиметрового и миллиметрового диапазонов практически не проникают в воду и влажную землю, что исключает их использование для подводной и подземной радиолокации. В основе этих фактов лежит эффективное взаимодействие электромагнитных волн с молекулами воды. Таким образом, вода является эффективным поглотителем и отражателем в зависимости от ее концентрации, которая определяется формами ее присутствия (вода, влага в почве и растениях с различными концентрациями, пар).

Возникает естественный вопрос – какие же поглощающие свойства у возможных «подручных» маскирующих материалов? Для сантиметрового диапазона длин волн, в котором работают бортовые радиолокационные средства разведки, покрытие из влажного глинистого грунта толщиной (1-2) см обеспечивает поглощение в 10-100 раз (10-20 дБ), а 1 см воды – в 100 раз. Эти характеристики близки к характеристикам специальных многослойных покрытий, стоимость которых составляет десятки долларов за квадратный метр.

Таким образом, бытующее мнение о том, что снижение радиолокационной заметности объектов возможно только с использованием специальных дорогостоящих покрытий, является неверным и влечет за собой существенные неоправданные затраты.

Тканевые покрытия, изготовленные по технологии СТЕЛС (STEALTH). Как уже было отмечено, в Российской Федерации также уделяют большое внимание разработке тканевых покрытий, способных существенно снизить заметность объекта, на котором они используются.

К таким покрытиям можно отнести:

Адсорберы - специально сформированные полимерные материалы (см. п. 5.4. данной главы), которые отражают электромагнитное излучение и одновременно поглощают его, преобразуя в тепловую энергию. Они используются при экранировании технических устройств по технологии СТЕЛС (STEALTH). С помощью их обеспечивается снижение уровня помех в широком диапазоне частот.

Стеклопластики. Используются два метода изготовления:

- *Контактное формование стеклопластика.* Благодаря незначительным капиталовложениям, изготовление стеклопластика по технологии контактного формования находит широкое применение при изготовлении изделий из стеклопластика единичными экземплярами и малыми партиями.

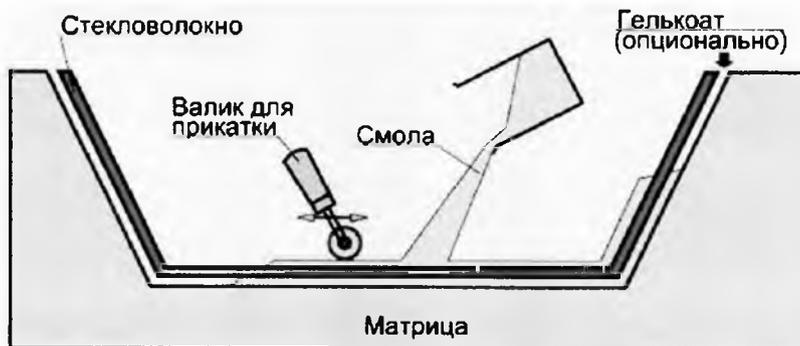


Рис. 5.4. Контактное формование стеклопластика

Суть метода изготовления стеклопластика контактным формованием состоит в следующем: на подготовленную определённым способом оснастку (матрицу) наносится защитно-декоративный слой – гелькоат. Методика нанесения гелькоата – вручную кистью или распылителем для гелькоата GS-120 (рис. 5.4). Гелькоат формирует наружную поверхность будущего изделия из стеклопластика. Гелькоаты имеют широкую палитру цветов, поэтому внешний вид изделия из стеклопластика может иметь практически любой цвет. Кроме того, гелькоат предохраняет изделие из стеклопластика от пагубного влияния ультрафиолета, химических активных сред, воздействия воды.

После высыхания гелькоата происходит изготовление стеклопластика (формовка изделия из стеклопластика). Вначале в матрицу укладывается предварительно раскроенный стеклянный материал: стеклоткань, стекломат или другой тип армирующего наполнителя, выбор которого зависит от требований, предъявляемых к изделию из стеклопластика. Затем, при помощи мягкого валика или кисти, стекломат или стеклоткань пропитывается связующим веществом – смесью полиэфирной смолы с отвердителем. В общепринятом смысле, стеклопластик – это композитный материал, состоящий из следующей смеси: полиэфирная смола, отвердитель, стеклоткань или стекломат.

Последний этап – прикатка еще не отвержденного стеклопластика (ламината) жестким валиком для удаления пузырьков воздуха из него. После отверждения стеклопластика, готовое изделие из стеклопластика извлекается из формы и подвергается механообработке: обрезка обляя - излишков стеклопластика или отвержденной полиэфирной смолы по краям изделия; высверливание отверстий и т. д.

- *Изготовление стеклопластика методом вакуумной инфузии.* Вакуумная инфузия - процесс, при котором с применением вакуумной пленки (мешка) создается разрежение в рабочей полости формы и за счет разницы в давлении происходит всасывание смолы и пропитка армирующих материалов.

Процесс производства изделий методом вакуумной инфузии проходит в несколько этапов: Первый этап – подготовительный. Это самый трудоёмкий и продолжительный этап, который может длиться несколько дней. Вначале проводят подготовку матрицы, её чистку, заполнение пор, нанесение разделяющего агента. Затем предварительно раскроенные стекломатериалы укладываются и фиксируются на матрице. После того, как армирующий материал уложен, прокладываются вакуумный канал, герметизирующий жгут, жертвенная ткань, сетка и канал для распределения смолы. Затем, на композицию укладывается вакуумный мешок и фиксируется по периметру клейким жгутом. Далее, после проверки герметичности всей системы и подключения вакуумной пампы, переходят ко второму этапу. Из системы откачивается воздух, и за счёт разницы давления в пакет подаётся смола, предварительно смешанная с катализатором. Смола равномерно пропитывает армирующий материал. После отверждения связующего проводится удаление плёнки и расформовка изделия (рис. 5.5).

Применение вакуума позволяет обеспечить равномерную пропитку ламината смолой, а также снизить вероятность образования пузырьков воздуха, влияющих на характеристики готового изделия.

Вакуумная пропитка смолой имеет ряд преимуществ по сравнению с ручным формованием:

- лучшее соотношение смолы и волокон (повышенная прочность);
- снижение содержание воздуха в ламинате (повышенная прочность);
- экономия смолы;
- уменьшение эмиссии вредных веществ.



Рис. 5.5. Метод вакуумной инфузии

С помощью стеклопластиков обеспечивается снижение уровня помех в широком диапазоне частот.

5.7. ОБЛАСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭКРАНИРУЮЩИХ ТКАНЕЙ

Благодаря разнообразию металлизированные ткани находят широкое применение в разных отраслях народного хозяйства:

- при изготовлении защитной одежды (костюмы, жилеты, накидки), используемой при проведении специальных и спасательных работ;
- при изготовлении защитной от ЭМИ спецодежды и утеплении верхней одежды для энергетиков, обслуживающих линии высоковольтных электропередач, и операторов ЭВМ, а также сотрудников аэродромных и корабельных служб;
- при оборудовании «безэховых» камер и кабин и «чистых» комнат, изготовлении защитных устройств, предотвращающих утечку информации из служебных помещений и одновременно препятствующих электромагнитному излучению;
- при изготовлении быстросъемных накидок и чехлов на объекты, приборы и конструкции, требующие защиты от электромагнитных и инфракрасных излучений;
- при изготовлении переносных или стационарных экранов для предотвращения облучения;

- при защите компьютерных систем управления путем экранирования корпусов и узлов радиоэлектронной аппаратуры, средств связи, отдельных приборов и устройств, в том числе электронных плат, для решения проблемы электромагнитной совместимости;
- при использовании ткани для снятия статического электричества.

Экранирующие ткани используются, в первую очередь, в средствах индивидуальной защиты (СИЗ), которые предназначены для предотвращения воздействия на организм человека ЭМИ с уровнями, превышающими предельно допустимые, когда применение иных средств невозможно или нецелесообразно. Они могут обеспечить общую защиту, либо защиту отдельных частей тела (локальная защита). Обобщенные сведения об индивидуальных средствах защиты от действия ЭМИ представлены в табл. 5.7.

К СИЗ, которые представляют собой инженерно-технические меры индивидуальной защиты от действия ЭМИ, относятся экранирующая одежда, изготовленная из обычного тканого волокна с металлизированной сеткой. В изготовлении ее используется металлизированная ткань, представляющая собой обычную хлопчатобумажную ткань, покрытую слоем металла или электропроводящей краской. Перспективным является и использование ткани для экранирующей одежды из проводящего полимера, электропроводность которого может увеличиваться с возрастанием напряженностей ЭМИ.

Кроме костюма или комбинезона, в комплект одежды входят экранирующий головной убор, специальная обувь, перчатки или рукавицы. При использовании комплекта защитной одежды все ее элементы должны быть надежно соединены проводником и заземлены через токопроводящую обувь или индивидуальное заземление. К индивидуальным средствам защиты от ЭМИ ПЧ относятся и индивидуальные съёмные экраны, изготавливаемые из сетки или металлизированного стекла.

Промышленность поставляет ряд комплектов одежды для защиты персонала электротехнических объектов от ЭМИ высокочастотного диапазона. Из наиболее известных следует отметить комплекты типа Эп-1 и Эи-2.

Экранирующие комплекты типа Эп-1, обеспечивающие защиту от воздействия электрического поля; от воздействия тока смещения, протекающего через тело человека, когда он находится в электрическом поле; от воздействия импульсного тока (разрядов) при прикосно-

вении к заземленным или изолированным предметам, частям оборудования, а также траве и мелкому кустарнику; от воздействия интенсивного электромагнитного излучения, возникающего при оперировании разъединителями; от воздействия возможной электротравмы при работе в зоне наведенного напряжения.

В состав экранирующих комплектов типа Эп-1 входят гальванически соединенные друг с другом элементы: экранирующая куртка с капюшоном; экранирующий полукombineзон; экранирующий накащик; экранирующие трикотажные перчатки; кожаные экранирующие ботинки.

Защитные свойства ткани, используемой в экранирующих комплектах типа Эп-2 представлены в табл. 5.7.

Таблица 5.7

Защитные свойства ткани в экранирующих комплектах типа Эп-2

Частотный диапазон, МГц	Коэффициент экранирования ткани, дБ
$50 \cdot 10^{-6}$	90
До 10	90
10-500	90-80
500-20000	80-60

Экранирующие комплекты типа Эи-2 предназначены для исключения вредного воздействия ЭМП радиочастот на организм пользователя. Они создают замкнутую оболочку (индивидуальную клетку Фарадея) с эффективными проводящими уплотнениями в соединительных швах, а также между элементами комплекта, затрудняющими проникновение ЭМП радиочастот внутрь экранированного пространства.

Экранирующий комплект типа Эи-2 представляет собой полностью замкнутую пространственную конструкцию, препятствующую проникновению излучения, вредного для пользователя.

Комплект изготовлен из специальной экранирующей ткани, выполненной по технологии гальванического нанесения электропроводящего слоя на тканевую основу. Ткань, выполненная по данной технологии, обладает не только высокими электрической проводимостью и коэффициентом экранирования в широком диапазоне частот, но и

хорошими воздухопроницаемостью и стойкостью к истиранию в течение длительного срока эксплуатации при внешних механических воздействиях.

Комплекты типа Эи-2 выполнены по ТУ-8572-003-49352590-2001, разработанными ЗАО «НПО Энергоформ». В состав комплекта входят следующие элементы: экранирующий комбинезон; экранирующий головной убор (шлем) с экраном для лица; экранирующие трикотажные перчатки; кожаные экранирующие ботинки; пояс с монтерской сумкой для инструментов.

Технические характеристики представлены в табл. 5.8.

Таблица 5.8

Защитные свойства экранирующего комплекта типа Эп-2

Частотный диапазон, МГц	Коэффициент экранирования ЭМП комплектом, дБ
40-80	15
80-300	25
300-22000	30

При принятии стратегии развития в нашей стране лёгкой промышленности до 2020 г. было принято во внимание отставание от мирового производства в области создания экранирующих тканей с высокими потребительскими качествами.

Работа в области развития лёгкой промышленности будет ориентирована на формирование принципиально нового подхода к проектированию и выпуску текстиля с разнообразными оригинальными рисунками, выработанными способом ткачества. Упор делается на создание наукоёмкой инвариантной информационной технологии создания эксклюзивного текстиля. Эта технология базируется на быстром компьютерном проектировании, подготовке к выработке и выпуску малых партий эксклюзивных тканей, как на современном, полностью автоматизированном, так и на модифицированном традиционном ткацком оборудовании. При таком подходе художественное проектирование и оформление тканых изделий приобретают важнейшее значение, так как ориентируются на интересы конкретного потребителя. В результате появляется возможность делать выпуск экономически оправданными и

эстетически востребованными не только традиционно большие партии текстиля, но и малые эксклюзивные.

Актуальность исследований связана и с потребностью разработки тканей со специальными свойствами: экранирующими и информационно кодированными.

Разработанный в настоящее время ассортимент тканей может использоваться при производстве карманных вставок для мобильного телефона в школьной форме, мужских и женских костюмах, спецодежды, защищающей от ЭМИ, экранирования физиотерапевтических кабин. В настоящее время экранирующие ткани нашли применение даже при создании космических антенн.

5.8. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАТУХАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ТКАНЬЮ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В работе исследовалось экранирование электромагнитных волн различных диапазонов тканью специального назначения. Нарботка ткани осуществлялась при использовании в основе и в утке комбинированной электропроводящей пряжи линейной плотности 50 текс, полученной в лаборатории кафедры ПНХВ УО «ВГТУ» на модернизированной прядильно-крутильной машине ПК-100МЗ.

Электропроводящая пряжа состоит из сердечника в виде полиэфирной комплексной нити и электропроводящего элемента, покрывающего элемента, в виде полиэфирного волокна, и закрепляющего компонента, в виде полиэфирной комплексной нити.

Процентное содержание компонентов комбинированной электропроводящей пряжи линейной плотности 50 текс представлены в табл. 5.9.

Физико-механические показатели комбинированной электропроводящей пряжи, полученной по разработанной технологии, представлены в табл. 5.10.

Таблица 5.9

Процентное содержание компонентов комбинированной электропроводящей пряжи линейной плотности 50 текс

Показатель	Медная микропро-волокна	Комплек-сная поли-эфирная нить	Комплек-сная поли-эфирная нить	Поли-эфирная мычка
Линейная плотность, текс	18	5,2	5,2	21,6
Процентное содержание, %	36	10,4	10,4	43,2

Таблица 5.10

Физико-механические показатели комбинированной электропроводящей пряжи линейной плотности 50 текс

Наименование показателя	Значение
Коэффициент вариации по линейной плотности, %	3
Абсолютная разрывная нагрузка, сН	700
Коэффициент вариации по разрывной нагрузке, %	4
Разрывное удлинение, %	14-16
Коэффициент вариации по разрывному удлинению	6,25
Диаметр пряжи, мм	0,5

На ткацком станке СТБ2-180 была наработана ткань переплетением с саржей. Физико-механические показатели ткани представлены в табл. 5.11.

Таблица 5.11

Физико-механические свойства экранирующей ткани

Показатели	Размерность	Значения
Воздухопроницаемость	дм ³ /м ² ·с	600
Коэффициент вариации	%	5,29
Поверхностная плотность	г/м ²	216,36
Разрывная нагрузка полоски ткани 50х200 мм по основе	Н	400
Разрывное удлинение полоски ткани 50х200 мм по основе	%	20
Плотность готовой ткани по основе по утку	нит/дм	170,0 230,0

В условиях аккредитованной лаборатории РУПП «БелГИМ» (г. Минск) на поверенной испытательной установке. Нарботанная ткань исследовалась на способность экранировать электромагнитные волны.

Ослабление ЭМИ, вносимое образцом, $\mathcal{E}_{оп}$, дБ, определялось в соответствии с формулой:

$$\mathcal{E}_{оп} = 10 \lg \frac{P_{изм}}{P_{э}}, \text{ дБ} \quad (5.1)$$

где $P_{э}$ - эталонная плотность потока энергии, мкВт/см²; $P_{изм}$ - измеренная плотность потока энергии, мкВт/см².

Ослабление ЭМИ, вносимое образцом, σ , %, определялось с помощью формулы:

$$\sigma = \frac{P_{э} - P_{изм}}{P_{э}} \cdot 100, \quad (5.2)$$

где $P_{\text{Э}}$ - эталонный уровень мощности электромагнитного поля, мкВт; $P_{\text{изм}}$ - измеренный уровень мощности ЭМП, мкВт. Результаты измерения ЭМП, вносимого образцом ткани, представлены в табл. 5.12.

Таблица 5.12
Результаты измерения ЭМП, вносимого образцом ткани

Частота, ГГц	Эталонное ЭМП		ЭМП за образцом	
	Уровень мощности $P_{\text{Э}}$, мкВт	Плотность потока энергии $P_{\text{изм}}$, мкВт/см ²	Уровень мощности, $P_{\text{изм}}$, мкВт	Плотность потока энергии $P_{\text{изм}}$, мкВт/см ²
1,2	8860	33,18	7,6	0,03
2	7670	42,05	10,95	0,06
4	6460	48,03	2,4	0,02
5,64	467	8,65	0,4	0,007
8	1280	23,1	0,93	0,02
11,5	703	14,26	0,47	0,01

На рисунке рис. 5.6 представлена графическая зависимость экранирования образца ткани в % в зависимости от частоты электромагнитных волн в гигагерцах, построенная на основании формулы (5.2).

Анализируя зависимость экранирования ЭМИ от частоты электромагнитных волн можно отметить, что образец экранирует ЭМИ различных диапазонов частот, не пропуская более 99% электромагнитных волн.

На рис. 5.7 представлена графическая зависимость ослабления ЭМИ, вносимого образцом ткани в дБ, построенная на основании формулы (5.1).

При анализе графической зависимости рис. 5.7, установлено, что ослабление ЭМИ, вносимое образцом ткани из электропроводящей пряжи, полученной на машине ПК-100МЗ, на всех диапазонах превышает допустимое значение 25 дБ.

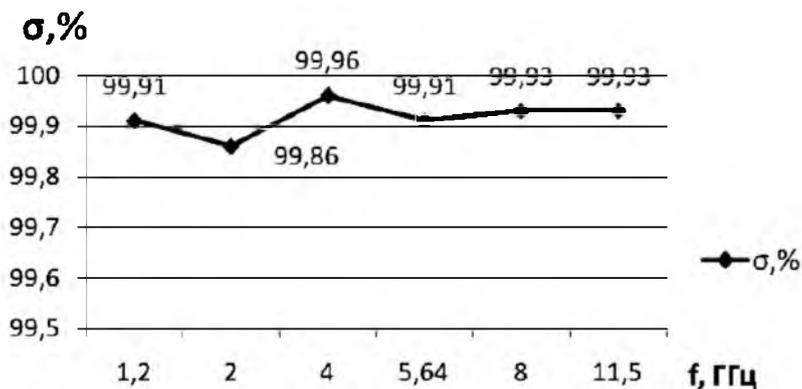


Рис. 5.6. Диаграмма измерения ослабления ЭМИ тканью, %

Максимальное значение ослабления ЭМИ образец ткани показал на частотах 4 ГГц, 5,64 ГГц и 11,5 ГГц. Эталонный уровень мощности ($P_{Э}$) на частоте 2,0 ГГц составляет 7670 мкВт, а уровень мощности за образцом ($P_{изм}$) – 10,95 мкВт, следовательно, ослабление уровня мощности ($P_{изм}$) данного образца на исследуемых диапазонах частот составило 700 раз, а на частоте 4,0 ГГц 2692 раза.

После проведённых исследований установлено, что ткань, состоящая из электропроводящей пряжи, защищает от ЭМИ, не пропускающая более 99% электромагнитных волн на диапазонах частот от 1,2 ГГц до 11,5 ГГц.

При написании четвёртой главы использованы материалы, опубликованные в [5.1-5.7].

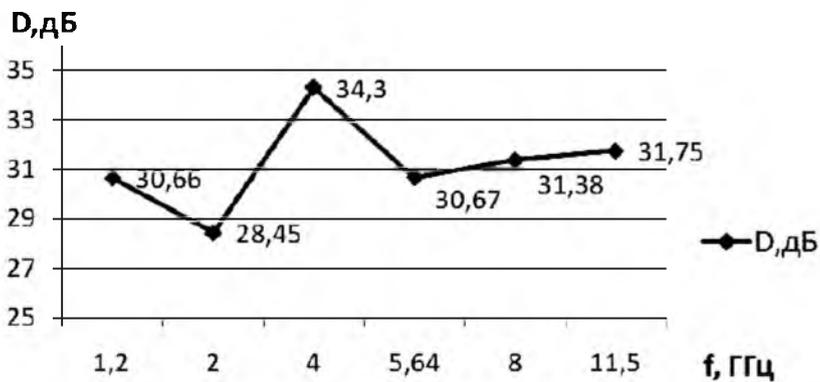


Рис. 5.7. Зависимость ослабления ЭМИ, вносимого образцом ткани

ГЛАВА 6. МАТЕРИАЛЫ ЗАЩИТЫ ОТ ФОТОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

6.1. ГЕОМЕТРИЯ ШИРОКОГО ПУЧКА. ПРОСТРАНСТВЕННО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАССЕЯННОГО В СРЕДЕ ИЗЛУЧЕНИЯ

При измерениях полей фотонного излучения в реальных задачах наряду с нерассеянным первичным излучением источника регистрируют рассеянные в среде фотоны. Под рассеянными понимаются фотоны, претерпевшие однократное или многократное (двух- и более кратное) рассеяние.

В геометрии этих задач (рис. 6.1) детектор наряду с непроявившимися со средой фотонами (фотоны 1) регистрирует однократно (фотоны 2) и многократно (фотоны 3 и 4) рассеянные фотоны; 5-9 - фотоны, которые не достигают детектора из-за поглощения в веществе (фотоны 5, 6), из-за направления траектории за защитой не на детектор (фотоны 7, 8) и из-за отражения от среды (фотоны 9).

Как ранее указывалось, в диапазоне энергии фотонов от 20 кэВ до 10 МэВ (сюда включаются фотоны радионуклидов и реакторного излучения) основными процессами взаимодействия с веществом являются фотоэлектрический эффект, комптоновское рассеяние и образование электронно-позитронных пар.

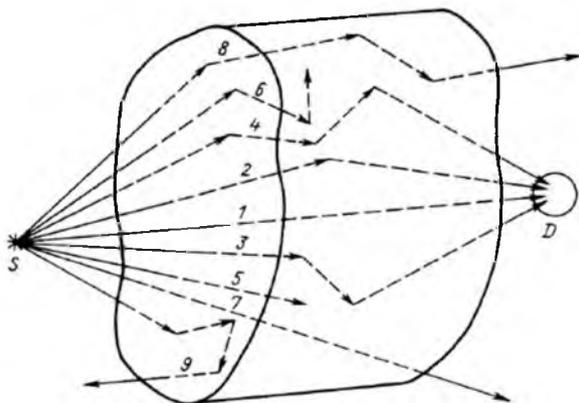


Рис. 6.1. Траектории фотонов, типичные для геометрии широкого пучка: S - источник; D - детектор

Напомним, что при указанных процессах взаимодействия кроме рассеянных фотонов источника в среде образуется следующее вторичное фотонное излучение: а) аннигиляционное излучение, обусловленное рекомбинацией замедленных до низких энергий позитронов, образованных в эффекте образования пар, и аннигиляцией позитронов в полете; б) флуоресцентное излучение, обусловленное переходом электронов на вакантные места в электронной оболочке; в) тормозное излучение, образующееся при замедлении фотоэлектронов, электронов и позитронов пар, комптоновских электронов и электронов Оже. Фотоны вторичного излучения на рис. 6.1 не показаны.

Геометрию, при которой детектор регистрирует нерассеянное и рассеянное первичное и вторичное излучение, называют *геометрией широкого пучка («плохой» геометрией)*.

Рассеянное в среде излучение источника и вторичное излучение обычно учитывают введением в закон ослабления излучения в геометрии узкого пучка множителя - *фактора накопления* фотонного излучения.

Если обозначить G_1 некоторый функционал, описывающий поле нерассеянного первичного излучения, а G_2 - поле рассеянного первичного и вторичного и нерассеянного вторичного излучения, то фактор накопления по данному регистрируемому эффекту

$$B_G = (G_1 + G_2) / G_1 = 1 + G_2 / G_1 \geq 1 \quad (6.1)$$

Таким образом, фактор накопления равен кратности превышения характеристик поля нерассеянного и рассеянного первичного и вторичного излучения над характеристиками поля нерассеянного первичного излучения или, иными словами, характеризует отношение показания детектора при измерении в геометрии широкого пучка к показанию детектора при измерении в геометрии узкого пучка.

Проанализируем сначала закономерности формирования пространственно-энергетического распределения плотности потока фотонов в среде, пренебрегая образованием вторичного излучения. Как будет показано в конце этого параграфа, такое допущение часто оказывается приемлемым и не вносит существенных изменений в характеристики поля излучения. Для однозначности анализ формирования поля излучения проводится на примере рассчитанных методом моментов

пространственно-энергетических распределений плотности потока рассеянных фотонов точечных изотропных моноэнергетических источников с энергией E_0 , равной 0,5; 1; 2; 3; 4; 6; 8 и 10 МэВ (для воды также с энергией $E_0 = 0,255$ МэВ) в бесконечной однородной гомогенной среде из воды, алюминия, железа,

Разделим источники на две группы по энергии испускаемых фотонов. К первой группе отнесем источники с $E_0 \leq E_{мин}$, где $E_{мин}$ - энергия, при которой коэффициент ослабления излучения имеет минимум. К второй группе отнесем источники с $E_0 > E_{мин}$. Напомним, что для воды, алюминия, железа, олова, вольфрама, свинца и урана $E_{мин}$ примерно равна 51; 21; 9; 4,6; 3,5; 3,4; 3,3 МэВ соответственно.

Сформулируем некоторые основные качественные закономерности формирования поля рассеянного излучения для источников первой группы

$$(E_0 \leq E_{мин});$$

1. Особенностью энергетических спектров является установление сравнительно постоянной формы спектра рассеянного излучения

для данной среды при расстояниях от источника $d \geq (3 \div 4) / \mu$.

Отмеченная закономерность не выполняется обычно при E , близкой к E_0 . Объясняется это тем, что после нескольких рассеяний энергия и направление фотона слабо коррелируют с характеристиками источника и энергетический спектр в значительной степени обусловлен фотонами, рассеянными вблизи источника. В этих случаях можно говорить о наличии квазиравновесия.

2. Относительная потеря энергии при комптоновском рассеянии уменьшается с уменьшением энергии фотонов. Это приводит к тому, что фотоны имеют тенденцию интенсивно накапливаться по мере сни-

жения их энергии. Следовательно, плотность потока энергии фотонов на единичный энергетический интервал в «чистом» комптоновском рассеивателе должна увеличиваться с уменьшением E . Однако в реальных средах в области рассматриваемых энергий имеет место фотоэлектрическое поглощение, которое препятствует интенсивному накоплению рассеянных фотонов.

Конкуренция двух процессов - накопления рассеянных вследствие комптоновского эффекта фотонов и фотопоглощения - обуславливает появление пиков (максимумов) в области низких энергий на кривых энергетических распределений плотности потока энергии для легких и средних элементов (вода, алюминий, железо). Эти максимумы тем менее заметны, чем больше атомный номер материала среды Z и чем сильнее, следовательно, фотоэлектрическое поглощение. Например, даже для железа при сравнительно большом удалении от источника пик едва заметен. Для более тяжелых сред, таких, как олово, вольфрам и свинец, максимум в области низких энергий исчезает из-за сильного фотопоглощения. Пики в энергетических распределениях плотности потока энергии расположены вблизи энергий, где отношение сечения рассеяния к полному наибольшее. Сечение фотоэлектрического эффекта при этом составляет еще небольшую часть полного сечения.

3. Зависимость энергетического распределения плотности потока энергии рассеянных фотонов от атомного номера материала среды Z можно качественно объяснить следующим образом. В области средних значений E_0 коэффициент поглощения энергии для данной среды, нормированный на $\mu_{en} (E_0 = 1 \text{ МэВ})$, для всех энергий E возрастает с увеличением Z . Поэтому $I(d, E)$, умноженная на $4\pi d^2 \exp(\mu d)$, при фиксированных значениях μd и E имеет большие абсолютные значения для более легких сред. В нашем примере в области энергий $E \geq 0,5 \text{ МэВ}$ при $\mu d = \text{const}$ и

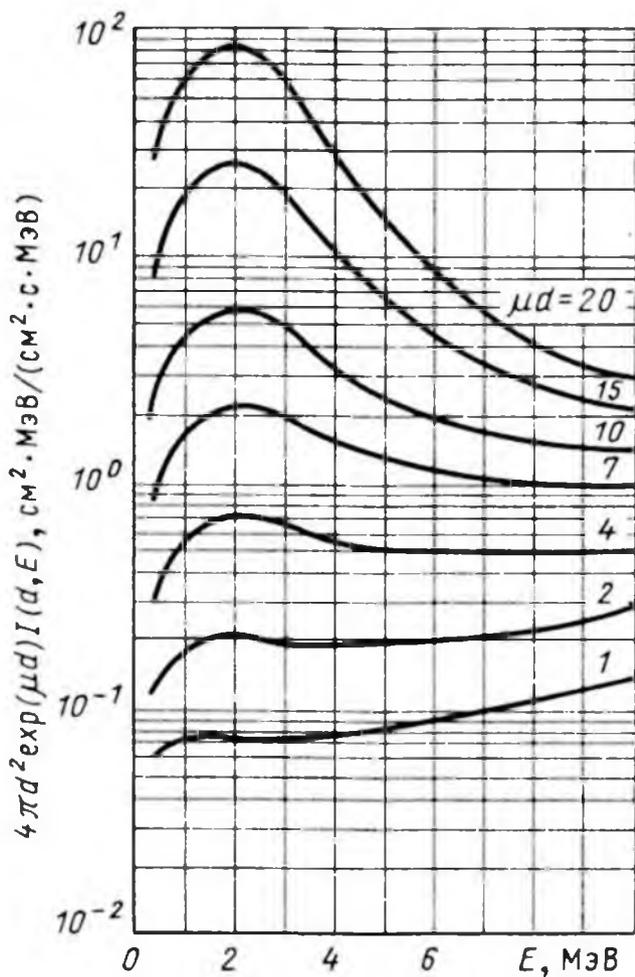


Рис. 6.2. Пространственно-энергетическое распределение плотности потока энергии рассеянных фотонов $I(d, E)$ точечного изотропного источника с $E_0 = 10$ МэВ и выходом 1 фотон/с в бесконечной среде из вольфрама для различных расстояний от источника μd

$E = const$ значения величины $4\pi d^2 \exp(\mu d) I(d, E)$ для сред с малыми и средними значениями Z (вода, алюминий, железо) совпадают, что качественно объясняется зависимостью коэффициентов поглощения энергии от E . Будучи представлены в виде $\mu_{en}(E) / \mu_{en}(E_0)$, они при $E \geq 0,5$ МэВ для воды, алюминия и железа практически совпадают.

При высокой энергии в зависимостях $\mu_{en}(E) / \mu_{en}(E_0)$ от E наблюдается обратная картина зависимости $\mu_{en}(E) / \mu_{en}(E_0)$ от Z при $Z < 82$ по сравнению с рассмотренным выше примером для источника с энергией $E_0 = 1$ МэВ. Здесь с возрастанием Z $\mu_{en}(E) / \mu_{en}(E_0)$ сначала уменьшается, затем при $Z > 82$ начинает медленно возрастать.

Для источников второй группы ($E_0 > E_{мин}$) фотоны, рассеянные до энергии $E_{мин}$, являются наиболее проникающими и существенно влияют на форму энергетического спектра, формируя широкий максимум в районе энергий, близких к $E_{мин}$. С увеличением толщины среды максимум становится все более явно выраженным и квазиравновесного состояния спектров с увеличением μd не наблюдается (рис. 6.2).

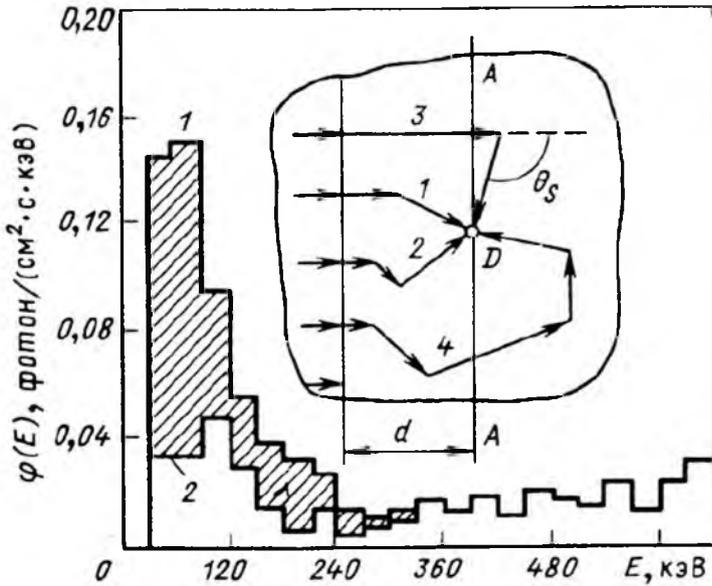


Рис. 6.3. Энергетическое распределение плотности потока рассеянных

фотонов $I(d, E)$ плоского моно-направленного источника (нормальное падение излучения) с $E_0 = 0,661$ МэВ и выходом 1 фотон/(см²·с) при прохождении через слой воды толщиной $\mu d = 2$ в бесконечной (1) и в барьерной (2) геометрии (заштрихована добавочная часть энергетического распределения при переходе от барьерной геометрии к бесконечной). На рисунке показана геометрия задачи. Расчет методом Монте-Карло

Приведенные данные относились к бесконечной геометрии среды. При переходе к барьерной геометрии изменение спектров наблюдается в области низких энергий. В бесконечной геометрии (см. геометрию на рис. 6.3) регистрируются фотоны 1 и 2, рассеянные последний раз перед попаданием в детектор левее границы выделяемого в бесконечной среде барьера (плоскость AA), и фотоны 3 и 4, рассеянные

перед попаданием в детектор правее границы барьера. При переходе к барьерной геометрии не регистрируются фотоны 3 и 4. Максимальная энергия фотона, приходящего в детектор после однократного взаимодействия правее плоскости АА, не превышает энергию однократного

рассеяния на угол $\theta_s \approx 90^0$. Для рассматриваемого на рис. 6.3 примера эта энергия $E_{s1}(\theta_s = 90^0) = 0,289$ МэВ.

Таким образом, изменения в спектре при переходе от бесконечной геометрии к барьерной затрагивают область энергий $E < 0,289$ МэВ. В действительности, как будет ясно из следующего параграфа, детектор в бесконечной среде регистрирует также некоторое число фотонов, рассеянных перед детектированием правее плоскости АА с энергией, большей 0,289 МэВ. Эти фотоны обусловлены многократным

рассеянием на тот же суммарный угол рассеяния θ_s . В рассмотренном примере предполагалось, что заднее по отношению к источнику полупространство не влияет на формирование поля излучения в точке детектирования. Так бывает, когда $\mu d \geq 1,5$.

Рассмотрим теперь роль вторичного излучения (аннигиляционного, тормозного и флуоресцентного) в формировании энергетического распределения фотонов, анализируя результаты расчетов распространения фотонов плоского моно-направленного моно-энергетического

источника разной энергии E_0 от 0,1 до 8 МэВ, падающих нормально на одну из границ барьера из различных материалов толщиной $\mu d = 10$. Расчеты выполнены в предположении, что источники вторичного излучения изотропны и их излучение генерируется в начале пробега электронов или позитронов.

В энергетических распределениях источники вторичного излучения могут обуславливать появления немонотонности формы спектра.

При рассмотрении вторичного излучения целесообразно выделить две группы энергий источников E_0 : а) $E_0 > 2$ МэВ, где вторичное излучение определяется тормозным и аннигиляционным излучением; б) $E_0 < 0,5$ МэВ, где важным становится флуоресцентное излучение.

Следуя такому разделению энергии источников, рассмотрим сперва влияние на энергетическое распределение аннигиляционного и тормозного излучения. В спектре регистрируемого излучения выделим две области, границу между которыми примем равной $E = 0,511$ МэВ.

В области энергий $E > 0,511$ МэВ вторичное излучение полностью определяется тормозным излучением. Форма спектра для различных сред различается. Для свинца без учета вторичного излучения спектр содержит гладкий максимум, кроме спектров для небольших значений E_0 ($E_0 = 2$ МэВ), где этот максимум не наблюдается. Учет тормозного излучения несколько смещает максимум в область более низких энергий. В железе с уменьшением энергии наблюдается медленный спад потока фотонов. Добавление тормозного излучения приводит к почти «белому» спектру - спектру плотности потока энергии фотонов, равномерно распределенному по всему диапазону рассматриваемых энергий. В воде вклад в спектр фотонов тормозного излучения не превышает нескольких процентов.

При $E = 0,511$ МэВ в спектре наблюдается пик, обусловленный добавлением к потоку фотонов аннигиляционного излучения. Форма спектра в области энергий $E < 0,511$ МэВ обуславливается конкуренцией фотоэлектрического эффекта и комптоновского рассеяния. Большое сечение фотоэффекта для свинца приводит к сильному поглощению фотонов и резкому спаду рассеянного первичного и тормозного излучения уменьшением энергии. Поэтому форма спектра здесь главным образом определяется однократно рассеянными фотонами аннигиляционного излучения. Фотонов с энергией, меньшей E_{s1} в спектре практически нет. В железе спад при E_{s1} не сильно выражен, а в воде он вообще не наблюдается, это подтверждает, что вклад однократно рассеянного аннигиляционного излучения не является здесь доминирующим.

Таким образом, вторичное аннигиляционное и тормозное излучение ведет к смягчению спектра. Наиболее сильно эти эффекты проявляются для наиболее тяжелых материалов.

Для источников фотонов с энергией $E_0 < 0,5$ МэВ для сред с высокими атомными номерами, таких, например, как свинец или уран, вклад от вторичного излучения определяется в основном флуоресцентным излучением.

Учет флуоресцентного излучения естественно изменяет спектр только при энергиях, меньших средней энергии KX -излучения.

Резкий скачок (уменьшение сечения) при энергии, равной энергии связи электрона на K -оболочке атома (K -скачок), приводит к резкому максимуму в спектре при этой энергии. Затем идет уменьшение плотности потока энергии с уменьшением энергии детектирования до средней энергии KX -излучения \bar{E}_{KX} . Учет флуоресцентного излучения приводит к резкому скачку в спектре при этой энергии. Энергетическое распределение при энергии ниже \bar{E}_{KX} определяется практически интенсивным флуоресцентным излучением. Сильное поглощение в области низких энергий обуславливает то, что флуоресцентные фотоны вряд ли переживают более одного рассеяния. Резкий спад плотности потока энергии при E_{s1} подтверждает эту закономерность.

С увеличением энергии источника E_0 до 0,3 МэВ роль флуоресцентного излучения уменьшается. Однако спектр ниже \bar{E}_{KX} все еще определяется флуоресцентным излучением.

Таким образом, эффект флуоресцентного и аннигиляционного излучения ограничен областями с энергией фотонов $E \leq \bar{E}_{KX}$ и $E \leq 0,511$ МэВ соответственно, тормозное излучение дает вклад по всему энергетическому спектру.

Проанализированные выше изменения в энергетическом спектре за счет источников вторичного излучения ведут к возрастанию характеристик поля излучения.

Вклад аннигиляционного излучения в дозу, возрастающий с увеличением E_0 , для $E_0 = 8$ МэВ на глубине 7 длин свободного пробега (д. с. п.) в свинце составляет 11, в воде 4,2%.

Роль тормозного излучения возрастает с увеличением E_0 и Z . Для $E_0 = 8$ МэВ тормозное излучение увеличивает дозу излучения за пластиной толщиной 10 д. с. п. из свинца на 39, из железа на 11, из воды на 4,9%.

Флуоресцентное излучение, роль которого резко уменьшается с возрастанием E_0 , особенно значительно проявляется в тяжелых средах, когда E_0 близка к энергии K -скачка. Например, флуоресцентное излучение на выходе из свинцовой пластины толщиной 10 д. с. п. для $E_0 = 0,1$ МэВ ведет к увеличению дозового фактора накопления в 32 раза. Однако уже для энергии источника 0,5 МэВ и выше флуоресцентным излучением с погрешностью до нескольких процентов (в свинце толщиной 8 д. с. п. с погрешностью до 2%) можно пренебречь.

6.2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКО-УГЛОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАССЕЯННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ГРАНИЦЕ СРЕДЫ

Для решения многих задач необходимо знать не только пространственную характеристику поля излучения за защитой, но и более детальную информацию об энергетическо-угловых характеристиках рассеянного излучения на границах среды. Это необходимо, например, при расчете факторов накопления ограниченных источников или ограниченных защит для точек, удаленных от поверхности защиты, при решении многих задач распространения излучений через неоднородности в защитах и т. п.

Информация по энергетическо-угловому распределению рассеянного фотонного излучения на границе среды получена экспериментально или расчетным путём методом Монте-Карло.

Рассмотрим, прежде всего, характерные особенности формирования энергетического распределения рассеянного излучения, детектируемого под разными углами θ , отсчитываемыми от нормали к границе среды, на примере точечных изотропных (рис. 6.4,а), плоских моно-направленных (рис. 6.4,в) и плоских изотропных (рис. 6.4,з) источников.

Энергетическо-угловые распределения рассеянного излучения в виде примера для приведенных на рис. 6.4, а, в, з геометрий показаны на рис. 6.5. Как видно из данных рис. 6.5, в области низких энергий в энергетическо-угловых характеристиках для легких и средних по атомному номеру сред имеют место пики (максимумы), положение которых по энергии соответствует положению и в проинтегрирован-

ных по углу детектирования, энергетических распределениях. Этот максимум обусловлен конкуренцией процессов комптоновского рассеяния и фотоэлектрического поглощения (на рис. 6.5, *д, е* максимумы для рассеивателя из воды «растворились» в достаточно широкой энергетической группе спектра 0-100 кэВ). Для тяжелых сред (например, для свинца) максимум не наблюдается из-за «выедания» этой части спектра за счет фотоэффекта.

Введем понятие *пороговой энергии спектра излучения* (нижняя граница) $E_{пор}$. Если за $E_{пор}$ принять значение энергии, ниже которой число фотонов не превышает 5% общего их числа в энергетическом распределении, то такой границей для воды, алюминия, железа и свинца будут энергии 0,05; 0,08; 0,12 и 0,29 МэВ соответственно.

Для точечных изотропных и плоских моно-направленных источников (рис. 6.5, *а-з*) характерно также появление максимума в высокоэнергетической части спектра. Положение этого пика соответствует

энергии фотона, однократно рассеянного на угол рассеяния θ_s в направлении на детектор (рис. 6.4, *а-в*) (для точечного изотропного источника имеется в виду однократное рассеяние на минимальный угол θ_s).

Интересно отметить, что для точечных изотропных и плоских мононаправленных источников в дифференциальных энергетических распределениях имеют место фотоны с энергией, большей энергии фотона

после однократного комптоновского рассеяния E_{s1} на угол θ_s (рис. 6.4). Появляются эти фотоны вследствие многократного рассеяния

на тот же суммарный угол θ_s . Изменение энергии фотона при однократном рассеянии, выраженное через длину волны, определяется зависимостью (6.1). Тогда, разложив $\cos\theta_s$ в ряд, получим

$$\Delta\lambda_1 = \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{k+1} \frac{1}{(2k)!} \theta_s^{2k} \quad (6.2)$$

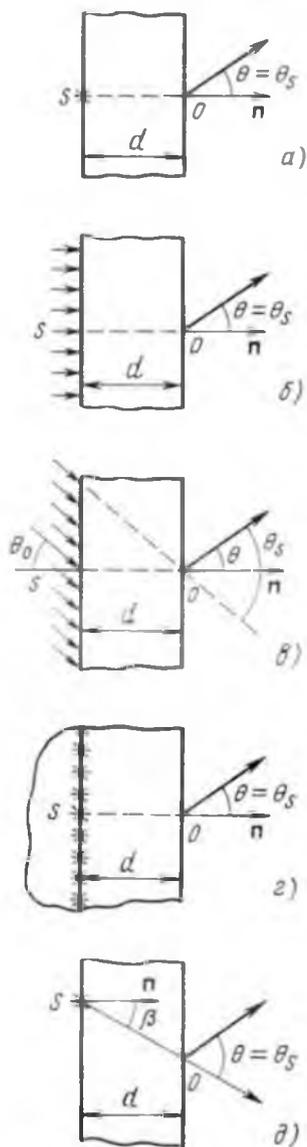


Рис. 6.4. Геометрия задач по исследованию энергетического-углового распределения рассеянного фотонного излучения:

S - источник; θ - угол детектирования; θ_s - угол рассеяния

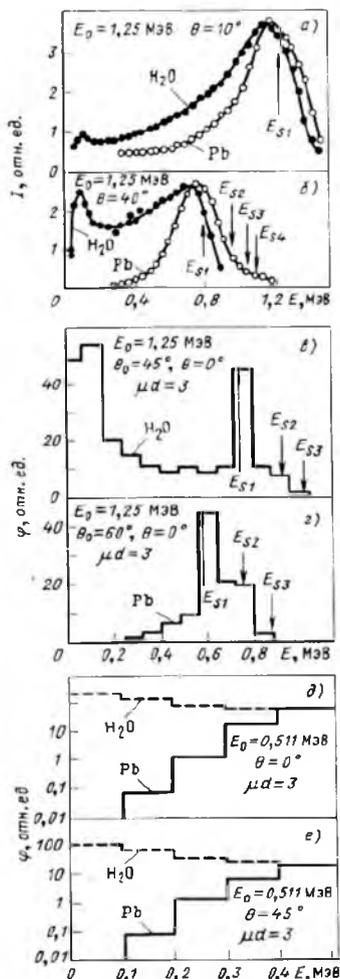


Рис. 6.5. Энергетическо-угловое распределение характеристик поля рассеянных фотонов: точечного изотропного (а, б), плоского мононаправленного (в, г) и плоского изотропного фотонного излучения на границе среды для n -геометрий задач, показанных а, в, г соответственно. Распределения на рис. а, б нормированы вблизи энергии однократного рассеяния E_{s1} , на рис. д, е - для энергетической группы 400-511 кэВ. На рис. а, б - экспериментальные, на остальных - расчётные данные

При n рассеяниях на одинаковый угол θ_s / n длина волны изменится на величину

$$\Delta\lambda_n = n \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{k+1} \frac{1}{(2k)!} \left(\frac{\theta_s}{n} \right)^{2k} < \Delta\lambda_1 \quad (6.3)$$

В предельном случае при $n \rightarrow \infty$ $\Delta\lambda_n \rightarrow 0$

Следовательно, энергия фотонов при многократном рассеянии на суммарный угол θ_s больше энергии однократно рассеянных на тот же угол фотонов. Например, при однократном рассеянии на угол $\theta_s = 60^\circ$ фотона с энергией $E_0 = 1,25$ МэВ энергия $E_{s1} = 0,56$ МэВ, при двукратном рассеянии каждый раз на угол $\theta_{s/2} = 30^\circ$ $E_{s2} = 0,75$ МэВ, а при трехкратном рассеянии каждый раз на угол $\theta_{s/3} = 20^\circ$ $E_{s3} = 0,86$ МэВ.

С увеличением $E_0 \geq 2$ МэВ в энергетических распределениях появляются максимумы, обусловленные аннигиляционными фотонами.

При решении практических задач широко применяются угловые плотности потока энергии рассеянного фотонного излучения.

Рассмотрим, прежде всего, угловое распределение однократно рассеянных в среде фотонов на примере плоского мононаправленного источника (п. м.). Пусть нормально к барьеру толщиной d падают фотоны плоского мононаправленного моноэнергетического источника с энергией фотонов E_0 и мощностью пучка первичных фотонов по энергии I^s , отнесенной к единичной площади источника. Тогда очевидно, что плотность потока энергии фотонов, однократно рассеянных на угол $\theta_s = 0$, за барьером толщиной d (рис. 6.4, б)

$$\begin{aligned}
 I^{n.m.однокр} (E_0, d, \theta) &= \\
 &= \int_0^d I_s n_a Z \sigma_{pac} (E_0, \theta) e^{-\mu x} e^{\frac{\mu_{s1}(d-x)}{\cos \theta}} dx = \\
 &= I_s n_a Z \sigma_{pac} (E_0, \theta) \cos \theta \frac{e^{-\mu x} - e^{-\frac{\mu_{s1}d}{\cos \theta}}}{\mu_{s1} - \mu \cos \theta}, \quad (6.4)
 \end{aligned}$$

где n_a - число атомов в единице объема; Z - атомный номер материала рассеивателя; $\sigma_{pac}(E_0, \theta)$ - дифференциальное микроскопическое сечение рассеяния энергии фотонов на угол θ на один электрон; μ, μ_{s1} - коэффициенты ослабления фотонов источника и однократно рассеянных на угол θ соответственно; x - глубина рассеивателя, измеряемая по нормали к поверхности среды.

Формулу (6.4) легко записать, если учесть, что $I_s e^{-\mu x}$ - плотность потока энергии фотонов на глубине x ; $n_a Z$ - число электронов в единице объема; $n_a Z \sigma_{pac}(E_0, \theta) = \Sigma_{pac}(E_0, \theta)$ - дифференциальное макроскопическое сечение рассеяния энергии фотонов с энергией E_0 на угол θ ; $I_s e^{-\mu x} \Sigma_{pac}(E_0, \theta)$ - энергия фотонов, однократно рассеянных в единичный телесный угол в направлении θ на глубине x в единицу времени в единице объема среды, а $e^{\frac{\mu_{s1}d}{\cos \theta}}$ учитывает ослабление рассеянных фотонов в среде.

В виде примера угловое распределение однократно рассеянного излучения, рассчитанное по формуле (6.4), и полного рассеянного излучения в зависимости от θ для плоского мононаправленного источ-

ника показано на рис. 6.6. В этих расчетах $\sigma_{рас}(E_0, \theta)$ принималось равным сечению комптоновского рассеяния.

Рассмотрим ниже формулы для описания угловых характеристик рассеянного фотонного излучения источников с различным угловым распределением излучения. Формулы получены исходя из анализа закономерностей формирования поля рассеянного излучения и экспериментальной и расчетной информации для источников с $E_0 = 0,145-7,0$ МэВ при толщине среды от 1,5-2 до 7 длин свободного пробега.

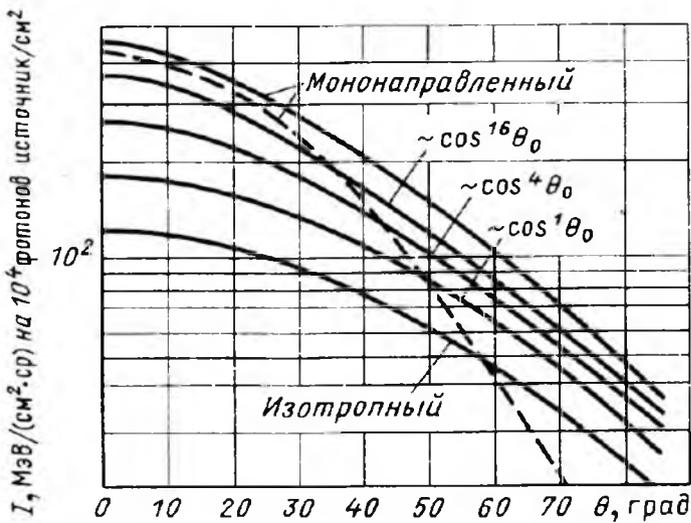


Рис. 6.6. Угловое распределение плотности потока энергии рассеянного фотонного излучения за барьером из железа толщиной $3/\mu$ для плоских источников с энергией $E_0 = 0,661$ МэВ с угловым распределением фотонов вида $[(n+1)/(2\pi)] \cos^n \theta$; штриховая линия - угловое распределение однократно рассеянного излучения мононаправленного источника при $\theta_0 = 0^\circ$

Плоский изотропный источник (п. и.) Угловая плотность потока энергии рассеянных фотонов, покидающих барьер через единичную площадку вблизи точки O , расположенной на внешней по отношению к источнику поверхности барьера, в единичный телесный угол в направлении θ для плоского изотропного источника (см. рис. 6.4,з) может быть рассчитана по формуле

$$I^{n.u.}(E_0, d, \theta) = C^{n.u.} \cos^{k-1} \theta, \quad (6.5)$$

где $C^{n.u.} = I_s (B_3^{n.u.} - 1) k E_1(\mu d) / (2\pi)$ - нормировочный множитель, определяемый из условия нормировки рассеянного излучения на границе среды; I_s - энергия, испускаемая с единицы поверхности плоского изотропного источника в единицу времени в полупространство в направлении защиты; $E_1(\mu d)$ - интегральная показательная функция; $B_3^{n.u.}$ - энергетический фактор накопления плоского изотропного источника для точки O на внешней границе среды; $k = 1, 1(\mu d)^{0,8 + \lg(0,1 E_0)(1,6/Z + 0,02)}$, где E_0 - энергия, МэВ; Z - атомный номер материала рассеивателя.

Приведенный нормировочный множитель $C^{n.u.}$ легко определить, если проинтегрировать выражение (6.5) по телесному углу 2π

$$I^{n.u.}(E_0, d) = \int_0^{2\pi} d\psi \int_0^{0,5\pi} I^{n.u.}(E_0, d, \theta) \sin \theta d\theta$$

и приравнять полученное выражение $I_s E_1(\mu d) (B_3^{n.u.} - 1)$.

В отличие от точечного изотропного и плоского мононаправленного источников, рассмотренных ниже, в угловом распределении плотности потока энергии рассеянного фотонного излучения плоского изотропного источника с увеличением толщины материала защиты не устанавливается равновесия.

С увеличением d функция $I^{n,m}(E_0, d, \theta)$ в зависимости от угла θ становится все более анизотропной, так как вероятность поглощения растет быстрее для фотонов, детектируемых под большими углами θ . Анизотропия увеличивается также с увеличением энергии источника E_0 и атомного номера материала защиты Z .

Плоский моно-направленный источник. Рассмотрим случай порцеального падения фотонов на барьер ($\theta_0 = 0^\circ$). Угловую плотность потока энергии рассеянного фотонного излучения в этом случае (рис. 7.4,б) можно описать зависимостью

$$I^{n,m}(E_0, \theta_0 = 0^\circ, d, \theta) = \sum_{i=1}^n (-1)^{i-1} C_i^{n,m} \exp(-\theta / \theta_i^{n,m}) \quad (6.6)$$

где $C_i^{n,m}$ и $\theta_i^{n,m}$ - нормировочные множители и характеристические углы для i -го члена суммы; значения $\theta_i^{n,m}$ с погрешностью до 10% не зависят от d при $d \geq (1,5 \div 2) / \mu$.

Для $E_0 \leq 2$ МэВ погрешность аппроксимации не превышает 10%. если в разложении удержать два члена ($n = 2$)

$$I^{n,m}(E_0, \theta_0 = 0^\circ, d, \theta) = C_1^{n,m} \exp(-\theta / \theta_1^{n,m}) - C_2^{n,m} \exp(-\theta / \theta_2^{n,m}) \quad (6.7)$$

Для энергий $2 \text{ МэВ} < E_0 \leq 7 \text{ МэВ}$ угловое распределение с той же погрешностью аппроксимируется рядом из трех членов ($n = 3$):

$$\begin{aligned}
 I^{n..m} (E_0, \theta_0 = 0^0, d, \theta) = & \\
 = C_1^{n..m} \exp(-\theta / \theta_1^{n..m}) - C_2^{n..m} \exp(-\theta / \theta_2^{n..m}) + & \\
 + C_3^{n..m} \exp(-\theta / \theta_3^{n..m}) & , \quad (6.8)
 \end{aligned}$$

Первый член правой части выражений (6.6)-(6.8) определяет рассматриваемую зависимость в области углов $\theta \geq 15-30^\circ$, второй учитывает особенность в поведении плотности потока энергии рассеянного излучения в области углов $0^\circ \leq \theta \leq 15-30^\circ$, третий вводит поправку при углах $\theta \geq 60-70^\circ$.

В диапазоне углов $15-30^\circ \leq \theta \leq 60-70^\circ$ формулы (6.6)-(6.8) ввиду малости второго и третьего членов суммы переходят в хорошо известную и часто приводимую в литературе зависимость вида

$$I^{n..m} (E_0, \theta_0 = 0^0, d, \theta) = C^{n..m} \exp(-\theta / \theta^{n..m}) , \quad (6.9)$$

где $\theta^{n..m} \approx \theta_1^{n..m}$

Нормировочные множители в (6.6)-(6.9) при известных характеристических углах $\theta_i^{n..m}$ могут быть определены (см. рекомендуемую литературу).

При наклонном падении фотонов ($\theta_0 \neq 0$) (см. рис. 6.4,в) в угловых характеристиках плотности потока энергии рассеянного фотонного излучения за барьерами имеет место азимутальная симметрия, растущая с увеличением угла θ_0 , при этом максимум в угловом распределении наблюдается при углах $\theta_{\text{макс}} \leq \theta_0$.

Угловое распределение плотности потока энергии рассеянного излучения при $d \geq (1,5 \div 2) / \mu$ в неплохом приближении аппроксимируется зависимостью, подобной (6.6):

$$\begin{aligned}
 I^{n,m}(E_0, \theta_0, d, \theta', \psi) &= \\
 &= \sum_{i=1}^n (-1)^{i-1} C_i^{n,m}(E_0, \theta_0, d; \psi) \exp(-\theta' / \theta_i^{n,m})
 \end{aligned}
 \tag{6.10}$$

где θ' отсчитывается от направления $\theta_{\text{макс}}$.

При $d \geq 3 / \mu$ $\theta_i^{n,m}$ практически не зависят от толщины среды.

Плоский источник с произвольным угловым распределением фотонов (п. п.). Для плоских источников с промежуточным угловым распределением фотонов между моно-направленным и изотропным - с угловым распределением излучения вида $[(n+1)/(2\pi)] \cos^n \theta_0$ - плотность потока энергии рассеянного излучения на границе среды может быть представлена суммой соответствующих величин для плоских моно-направленных и изотропных источников, взятых с некоторыми весами:

$$\begin{aligned}
 I^{n,n}(E_0, d, \theta) &= p_1 I^{n,m}(E_0, \theta_0 = 0^0, d, \theta) + \\
 &+ p_2 I^{n,u}(E_0, d, \theta)
 \end{aligned}
 \tag{6.11}$$

Величины $I^{n,n}(E_0, d, \theta)$ и $I^{n,m}(E_0, \theta_0 = 0^0, d, \theta)$ нормированы на одну и ту же мощность источника.

Коэффициенты p_1 и p_2 находятся из соотношения для плотности потока энергии нерассеянного фотонного излучения на границе среды

$$\begin{aligned}
 I^{n,n}(E_0, d) &= p_1 I_0^{n,m}(E_0, \theta_0 = 0^0, d) + \\
 &+ p_2 I_0^{n,u}(E_0, d)
 \end{aligned}
 \tag{6.12}$$

и очевидного соотношения

$$p_1 + p_2 = 1 \quad (6.13)$$

Соотношение (6.12) можно записать в виде

$$p_1 I_0^{n,n} (E_0, \theta_0 = 0^0, d) / I^{n,n} (E_0, d) + p_2 I_0^{n,n} (E_0, d) / I^{n,n} (E_0, d) = 1 \quad (6.14)$$

Так как закон ослабления в защите нерассеянного фотонного излучения источников вида $[(n+1)/(2\pi)] \cos^n \theta_0$ известен, нетрудно получить для целого n вместо соотношения (6.14) выражение вида

$$\frac{p_1 \exp(-\mu d)}{(n+1)E_{n+1}(\mu d)} + \frac{p_2 E_1(\mu d)}{(n+1)E_{n+1}(\mu d)} = 1 \quad (6.15)$$

где $E_i(\mu d)$ - интегральная показательная функция i -го порядка.

Решая систему уравнений (6.13) и (6.15), находим

$$\left. \begin{aligned} p_1 &= \frac{(n+1)E_{n+1}(\mu d) - E_1(\mu d)}{\exp(-\mu d) - E_1(\mu d)}; \\ p_2 &= 1 - p_1. \end{aligned} \right\} \quad (6.16)$$

В практических расчетах рекомендованный выше подход к определению поля излучения можно использовать, если реальное угловое распределение достаточно хорошо аппроксимируется функцией пропорциональной $\cos^n \theta_0$ хотя бы при $0^\circ \leq \theta_0 \leq 60^\circ$, так как фотоны, входящие в защиту под углами $\theta_0 \geq 60^\circ$, не вносят существенного вклада в поле излучения за защитой. При углах $\theta_0 > 60^\circ$ аппроксимирующая функция может более существенно отличаться от реального распределения, особенно при достаточно больших значениях n .

Для гетерогенных барьеров зависимость плотности потока энергии рассеянного фотонного излучения от угла детектирования для плоских источников при толщине последнего слоя $d \geq (1,5 \div 2) / \mu$

имеет ту же форму, что и для гомогенного барьера такой же полной оптической толщины, выполненного из материала последнего слоя защиты. Нормировочные множители при этом следует определять по факторам накопления для гетерогенной защиты (см. п. 6.5).

Для рассмотренных плоских источников более анизотропным является угловое распределение плотности потока энергии рассеянного фотонного излучения моно-направленного источника (рис. 6.6).

Точечный изотропный источник (т. и.). Угловое распределение плотности потока энергии рассеянного излучения в направлении θ в диапазоне углов $0^\circ \leq \theta \leq 75^\circ$ за барьерами толщиной $d \geq 1,5 / \mu$ (см. рис. 6.4,а) может быть описано с погрешностью до 15% зависимостью

$$I^{T.И} (E_0, d, \theta) = \sum_{i=1}^n (-1)^{i-1} C_i^{T.И} \times \exp(-\theta / \theta_i^{T.И}) / \sin \theta \quad (6.17)$$

где $\theta_i^{T.И}$ - характеристические углы, с погрешностью 10% не зависящие от толщины барьера; $C_i^{T.И}$ - нормировочные множители.

Для изотропных источников при $E_0 < 2,75$ МэВ в разложении достаточно удержать два члена ($n = 2$):

$$I^{T.И} (E_0, d, \theta) = (C^{T.И} / \sin \theta) \times \left[\exp(-\theta / \theta_1^{T.И}) - \exp(-\theta / \theta_2^{T.И}) \right] \quad (6.18)$$

при этом $C_1^{T.И} = C_2^{T.И} = C^{T.И}$. Смысл двух членов в правой части тот же, что и в формуле (6.7).

Как и для плоского моно-направленного источника, при углах наблюдения $\theta \geq 15 \div 30^\circ$ (6.18) переходит в хорошо известное и часто приводимое в литературе выражение вида

$$I^{T.I}(E_0, d, \theta) = (C^{T.I} / \sin \theta) \exp(-\theta / \theta^{T.I}), \quad (6.19)$$

где $\theta^{T.I} \approx \theta_1^{T.I}$.

Зависимость вида (6.19) сохраняется для угловых плотностей потока энергии рассеянного фотонного излучения в геометрии рис. 6.4, до значений β по крайней мере 65° , если θ изменяется в диапазоне углов $10-140^\circ$.

Влияние связи электронов в атоме на перенос низкоэнергетического γ - излучения. Учет связи электронов в атоме при рассеянии фотонов (см. п. 6.2) в диапазоне небольших энергий приводит к значительному увеличению плотности потока рассеянного излучения в области небольших углов рассеяния.

Для когерентного рассеяния $\mu = \mu_{s1}$, где μ и μ_{s1} - коэффициенты ослабления фотонов источника и однократно рассеянных на угол θ фотонов соответственно.

При увеличении энергии фотонов вклад когерентного рассеяния все более резко спадает с ростом угла θ . Это связано с зависимостью форм-фактора от угла.

Наращение числа фотонов, приходящих в детектор под большими углами, для когерентного и комптоновского рассеяния обусловлено значительным увеличением соответствующей области рассеяния: при рассеянии на большие углы участвуют большие площади поверхности барьера.

Следует отметить, что фактор накопления зависит от всех условий задачи: регистрируемого эффекта; характеристик источника (энергетического состава, геометрии и углового распределения излучения); характеристик защитной среды (геометрии защиты, в том числе ее толщины, порядкового номера материала среды, компоновки защиты); взаимного расположения источника, защиты и детектора. Все отмеченные зависимости фактора накопления представляют предмет специального исследования и в рамках настоящего пособия не рассматрива-

ются. Наибольшее накопление происходит при увеличении протяженности источника, от углового распределения излучения источника и от толщины защиты.

Кроме того факторы накопления существенно зависят от характера среды: гомогенная среда или гетерогенная. Рассмотрение этого вопроса также выходит за пределы нашего пособия (подробнее см. в справочной литературе, приведенной в библиографических источниках).

6.3. ПРИБЛИЖЕННЫЕ СПОСОБЫ УЧЁТА РАССЕЯННОГО ФОТОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В МАТЕРИАЛЕ ИСТОЧНИКА И ЗАЩИТЫ

Учет рассеянного фотонного излучения в материале источника. В большинстве объемных радиоактивных источников (кроме газонаполненных) происходит процесс поглощения и рассеяния фотонов материалом самого источника. Поэтому выходящее из него излучение имеет спектр, резко отличающийся от спектра первичного излучения. Этот процесс существенно изменяет функционал поля излучения как внутри, так и за пределами источника. Рассмотрим два приближенных способа учета рассеянного фотонного излучения в материале источника.

Первый способ: с помощью аналитического представления факторов накопления. Способ трудоёмок и малоэффективен, так как при рассмотрении используются формулы для расчёта рассеянного излучения от точечного изотропного источника в бесконечной среде, или на поверхности полубесконечной среды с точностью до краевого эффекта.

Второй способ: с помощью гамма-метода. Данный метод основан на принципе лучевого равновесия: внутри бесконечно протяженного

источника с равномерно распределенной удельной мощностью q_m

МэВ/(с·кг) [или q_v МэВ/(с·м³)], в результате завершения всех процессов поглощения и рассеяния каждый элемент массы или объема поглощает столько энергии фотонов, сколько он ее и излучает.

Гамма-метод наиболее часто применяют к таким легко-атомным протяженным средам, как атмосферный воздух или вода, равномерно загрязненные радионуклидами, а также почва с содержанием естественных радиоактивных веществ, урановые шахты и т. д.

Следует оговорить условия применения рассмотренных здесь приближенных методов расчета поля излучения объемных источников с учетом рассеянного излучения. Во-первых, эти методы нельзя применять в том случае, если источник экранирован. Дело в том, что рассеянные фотоны имеют значительно меньшую энергию, чем первичные, как говорят, они более «мягкие». Следовательно, их проникающая способность значительно меньше - они поглощаются в первых слоях защиты. Более строгое решение требует знания спектра рассеянного в источнике излучения. Во-вторых, чтобы соблюдался закон лучевого равновесия, размеры источника должны превосходить 3-4 длины свободного пробега во всех направлениях от точки детектирования. В-третьих, он применим для легко-атомных сред (верхней части периодической системы элементов Д. И. Менделеева).

Учет рассеянного излучения фотонов в материале защиты.

Рассмотрим два способа расчета поля фотонного моноэнергетического излучения за защитой толщиной μd с учетом рассеянного излучения. Проиллюстрируем их на примерах протяженных источников.

Первый способ: с помощью аналитического представления факторов накопления. Рассмотрим функцию ослабления излучения бесконечного плоского изотропного источника. Используя фактор накопления в форме суммы двух экспонент, получим значение интенсивности I за защитой с учетом рассеянного излучения

$$I = \frac{q_s}{2} [A_1 E_1(\mu' d) + (1 - A_1) E_1(\mu'' d)] \quad (6.20)$$

где $\mu' = (1 + \alpha_1) \mu$; $\mu'' = (1 + \alpha_2) \mu$. Как и для учета рассеянного излучения в источнике, достоинство этого метода состоит в сохранении вида интегрируемых функций, рассчитанных без учета рассеянного излучения и с его учетом. Заметим при этом, что приведенные в

справочной литературе коэффициенты α_1, α_2 и A_1 не зависят от толщины защиты μd (или размеров источника $\mu_s r$).

Если обозначить $G(\mu d)$ обобщенную функцию нерассеянного в защите излучения, то численное значение фактора накопления

протяженного источника $B_{n,u}$ по этому методу можно рассчитать из соотношения

$$B_{n,u} = \frac{A_1 G(\mu'd) + (1 - A_1) G(\mu''d)}{G(\mu d)} \quad (6.21)$$

Заметим, что данный способ может быть применен и для объемных поглощающих источников. Но это возможно лишь при условии, что спектр фотонов, выходящих из объемного источника излучения, определен.

Второй способ: с помощью эквивалентной толщины ослабления.

Обозначим G_0 и $G(\mu d)$ обобщенные функции, характеризующие поле перассеянного излучения протяженного источника без защитного экрана и после экрана толщиной μd .

Кратность ослабления $k(\mu d)$ нерассеянного излучения точечного источника можно записать в форме

$$k(\mu d) = \frac{G(0)}{G(\mu d)} \quad (6.22)$$

В этом методе Д. П. Осановым и Е. Е. Ковалевым предложено определять эквивалентную толщину защиты μl для точечного изотропного источника, ослабляющую излучение в то же число раз, из соотношения

$$k(\mu d) = \exp(\mu l) \quad (6.23)$$

откуда

$$\mu l = \ln \left[\frac{G(0)}{G(\mu d)} \right] \quad (6.24)$$

Тогда фактор накопления протяженного источника $B(E_0, \mu l, Z)$ можно определить, используя для этого табличные значения фактора накопления точечного источника, но с входным па-

раметром μ , определяемым формулой (6.24). Преимущество этого способа учета рассеяния излучения в защите перед предыдущим состоит в том, что здесь отпадает необходимость вводить фактор накопления в подинтегральное выражение функции ослабления. В этом способе рассеянное в защите излучение учитывается умножением функции ослабления на определенный фактор накопления.

Используя фактор накопления протяженных источников, следует учитывать степень точности, которая необходима при проектировании защиты. Как показал анализ, эффект протяженности источника в худшем случае (на близких расстояниях) увеличивает фактор накопления в 1,35 раза. Для наиболее часто используемых условий проектирования это различие лежит в пределах 1,05-1,07. Поэтому при оценочных расчетах указанное приближение обычно приемлемо. Кроме того, необходимо иметь в виду, что литературные данные о численных значениях факторов накопления обычно относятся к бесконечной среде и, следовательно, включают эффект «бесконечности» среды. С другой стороны, эффект «барьерности» для легких сред уменьшает фактор накопления по сравнению с бесконечной геометрией. Таким образом, эти два эффекта в значительной степени компенсируют друг друга. Поэтому можно считать достаточно оправданной распространенную практику применения факторов накопления точечных источников в бесконечной среде в расчетах барьерной защиты из легких сред для протяженных источников.

6.4. ЗАЩИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ОТ ФОТОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Ослабление излучения в защите зависит от вида излучения, характеристик источника, взаимного расположения источника и защищаемого объекта и от свойств материала защиты. Большое значение при проектировании оптимальной защиты (по массе, размерам и стоимости) от излучения ядерно-технических установок отводится обоснованному выбору защитного материала. Надо отметить, что невысокая стоимость материала защиты еще не означает невысокой стоимости защиты в целом. Обладая плохими защитными свойствами защита может оказаться громоздкой, потребовать больших затрат на сооружение, ухудшить условия эксплуатации установки.

Рассмотрим защитные материалы, применяемые для защиты от гамма-излучения радионуклидов, рентгеновского и тормозного излучения. Основные требования к защитным материалам от фотонного излучения следующие:

- максимально возможная плотность и атомный номер, чтобы обеспечить наибольшее ослабление первичных и вторичных фотонов;
- низкая наведенная радиоактивность защиты - при защите от фотонов больших энергий, которые испытывают в материале защиты фотоядерные взаимодействия;
- высокая механическая прочность материала защиты и хорошие конструктивные свойства;
- неизменность защитных свойств с течением времени;
- невысокая стоимость.

Не всегда удается подобрать природный материал, который удовлетворял бы всем требованиям, поэтому создаются искусственные защитные материалы, например, такие, как различные бетоны, гетерогенные среды.

Для защиты от фотонов выбор защитного материала в большой степени определяется типом установки: стационарная или передвижная. В передвижных установках используют свинец, сталь, медь, вольфрам, чугун. Для защиты стационарных источников излучения применяют более дешевые материалы: кирпич, бетон, баритобетон, песок, землю.

С повышением энергии фотонов их ослабление за счет фотоэффекта уменьшается и в области энергий более 600-700 кэВ ослабление фотонов определяется в основном рассеянием. Поэтому с повышением энергии фотонов уменьшается преимущество использования свинца перед другими материалами в отношении массы и габаритов сооружаемой защиты. В некоторых случаях для защиты от фотонов высоких энергий более целесообразно использовать вещество с меньшим эффективным атомным номером, чем свинец. Стоимость такой защиты может быть много ниже при несущественном увеличении размеров.

Пример 1. Для рентгеновского излучения с энергией 200 кэВ используется защитный слой из свинца толщиной 4 мм. Найти эквивалентный слой защиты из железа и вес защиты из свинца и железа.

Решение. С помощью номограмм на рис. 12.3 и 12.5 [6.6] находим, что толщина эквивалентного слоя из железа равна 60 мм. Вес 1 м² защиты из свинца равен 45,4 кг, а вес такого же по площади слоя защи-

ты из железа равен 472 кг, т. е. более чем в 10 раз больше веса свинцовой защиты.

Пример 2. Для тормозного излучения с максимальной энергией $E_{\max} = 6$ МэВ используется защитный слой из свинца толщиной 100 мм. Найти эквивалентный слой защиты из железа и вес защиты из свинца и железа.

Решение. С помощью номограмм на рис. 13.12 и 13.15 [6.6] находим, что толщина эквивалентного слоя из железа равна 180 мм. Вес 1 м² защиты из свинца равен 1134 кг, а вес такого же по площади слоя защиты из железа равен 1415 кг, т. е. всего примерно на 25 % больше веса свинцовой защиты.

В плоских защитных ограждениях от фотонного излучения большой энергии следует заменять свинец более легкими и дешевыми материалами и такая замена не приводит к значительному возрастанию габаритов и массы. Но в защите шаровой формы замена свинца более легкими материалами значительно увеличивает габариты и массу, так как толщина (радиус R) защиты возрастает обратно пропорционально плотности материала защиты. Поэтому объем и масса защиты увеличиваются $\sim R^3$, т. е. обратно пропорционально плотности в третьей степени. В этом случае целесообразно делать гетерогенную защиту, например свинец внутри, железо снаружи.

Пример 3. Необходимо изготовить сферический контейнер для защиты от излучения ⁶⁰Cs с внутренней воздушной полостью диаметром 20 мм (для размещения источника).

Если контейнер изготовить полностью из свинца, то толщина защитной стенки контейнера должна равняться 160 мм. Вес такого контейнера равен 230 кг.

Если для такого же ослабления использовать чугуны, то вес контейнера возрастет более чем в 2 раза и составит 500 кг.

Но если защиту сделать гетерогенной: внутри свинец толщиной 90 мм, а снаружи железо толщиной 127 мм, то при том же ослаблении вес защиты будет 300 кг, но зато свинца потребуется всего 45 кг.

При расчете защиты из какого-либо материала иногда предварительно определяют необходимую толщину свинцовой защиты для заданных условий работы, а затем, используя свинцовый эквивалент, находят эквивалентную толщину защитного слоя из данного материала.

ла. *Свинцовый эквивалент* - толщина свинца в миллиметрах, ослабляющая мощность поглощенной дозы в воздухе так же, как и данный слой защитного материала. С улучшением защитных свойств материала его свинцовый эквивалент растет. Как следует из примеров 1 и 2, свинцовый эквивалент материала растет с увеличением энергии излучения.

Защитные свойства материала и свинца надо сравнивать по кратности ослабления дозы. Принимается, что толщина d_x материала должна ослаблять мощность дозы прямого излучения в той же степени,

что и толщина свинца d_{Pb} . С учетом факторов накопления условие одинаковой кратности ослабления имеет вид

$$\dot{H}_0 \cdot \exp(-\sum_x d_x) B_x = \dot{H}_0 \cdot \exp(-\sum_{Pb} d_{Pb}) B_{Pb}, \quad (6.21)$$

где \dot{H}_0 - мощность дозы без защиты, B - дозовый фактор накопления. Из равенства (6.21) легко получить

$$d_x = \frac{1}{\sum_x} \left(\sum_{Pb} d_{Pb} + \ln \frac{B_x}{B_{Pb}} \right). \quad (6.22)$$

Если можно пренебречь разницей факторов накопления, то из (6.22) получаем более простое (но и менее точное) выражение

$$d_x = \frac{\sum_{Pb} d_{Pb}}{\sum_x}. \quad (6.23)$$

Например, по соотношению (7.23) при защите от гамма-излучения ^{137}Cs бетонной стене толщиной 400 мм соответствует свинцовая защита толщиной 57 мм. Чем больше свинцовый эквивалент материала, тем больше его защитные свойства.

Для моноэнергетического излучения толщину защитного слоя из различных материалов можно рассчитать также по кратности ослабления с помощью универсальных таблиц Гусева. Для некоторых радионуклидов определить эквивалентные толщины различных материалов можно с помощью номограмм для расчета защиты (см. [6.6, 6.8]). У рентгеновского излучения для этих целей можно использовать соответствующие номограммы [6.2, 6.4]. Кроме этого, для рентгеновского и

тормозного излучения пересчет эквивалентных толщин можно выполнить с помощью номограмм для расчета защиты (см. [6.6, 6.12, 6.13]).

Если два вещества имеют примерно одинаковые эффективные атомные номера, но различную плотность (например, бетон, кирпич, штукатурка), то для нахождения толщины защиты из второго вещества (при известной толщине первого) можно использовать условие равенства массовых толщин:

$$d_1 \rho_1 = d_2 \rho_2, \text{ откуда имеем:}$$
$$d_2 = d_1 \rho_1 / \rho_2. \quad (6.24)$$

При сооружении защитных ограждений следует уделять внимание тому, чтобы в них не было отверстий и каналов, которые ослабляют защиту. Технологические каналы необходимо проектировать таким образом, чтобы кратность ослабления излучения в местах их размещения была не ниже расчетной.

Рассмотрим теперь свойства и особенности применения некоторых материалов в качестве защиты от фотонов.

Свинец ($\rho = 11,34 \text{ г/см}^3$). Свинец - один из лучших материалов для ослабления фотонного излучения. Он применяется всегда, когда при надежной защите требуется минимальная масса и габариты. Свинец применяют в виде полос или листов различной толщины, в виде специальных свинцовых кирпичей. Из свинца легко отливать различные защитные контейнеры. К недостаткам свинца относятся его плохие конструкционные свойства. Этот материал мягкий с высокой ползучестью, особенно при высокой температуре.

Свинцовое стекло ($\rho = 3,4 - 4,6 \text{ г/см}^3$). Свинцовое стекло применяют в тех случаях, когда защита должна быть прозрачна для видимых лучей. Толщина свинцового стекла может быть от 10 до 25 мм. При этом свинцовые эквиваленты стекла равны: 10 мм стекла ~ 2,5 мм Pb; 15 мм стекла ~ 4 мм Pb; 20 мм ~ 5 мм Pb; 25 мм ~ 6,5 мм Pb.

Свинцовая резина ($\rho = 3,3 - 5,8 \text{ г/см}^3$). Свинцовая резина при толщине около 3 мм и плотности $4,5 \text{ г/см}^3$ эквивалентна по толщине 1 мм свинца. Следует иметь в виду, что резина со временем дает трещины, поэтому необходимо периодически проверять ее защитные свойства.

Вольфрам ($\rho = 17 - 19 \text{ г/см}^3$). Вольфрам применяют в виде порошка, пропитанного медью и спеченного при высокой температуре. Плотность при этом снижается до $15-16 \text{ г/см}^3$. Количество меди по весу в таких сплавах составляет обычно до 8 %. Поскольку стоимость вольфрамовых сплавов велика, то их целесообразно применять в портативных передвижных установках. Вольфрамовые сплавы используют для защиты от излучения высокой энергии в особо ответственных установках. Из них изготавливают диафрагмы, радиационные головки, коллиматоры гамма-дефектоскопов и терапевтических установок, использующих ионизирующее излучение.

Черные металлы (сталь $\rho = 7,5 - 7,8 \text{ г/см}^3$, чугун $\rho = 7,2 \text{ г/см}^3$). Их используют в основном как конструкционный материал в местах, где требуется повышенная прочность: для изготовления подвижных стальных дверей, корпуса установки. Защита из стали от фотонного излучения на 30 % тяжелее эквивалентной свинцовой защиты, но это компенсируется гораздо лучшими конструктивными качествами стали.

Барит ($\rho = 2,7 - 3,2 \text{ г/см}^3$) - это минерал с высоким содержанием BaSO_4 . Он входит в состав баритовой штукатурки или баритобетона. Баритобетон - хороший материал для защиты от излучения с энергией меньше 400 кэВ. Недостаток баритобетона состоит в том, что он со временем дает большую усадку и трескается.

Бетон (обычный (*портландский*) бетон $\rho = 2,1 - 2,4 \text{ г/см}^3$). Бетон - наиболее широко распространенный и сравнительно дешевый защитный материал от фотонного излучения. Бетон целесообразно применять для стационарной защиты. Для энергий фотонов более 400 кэВ разница в толщине защиты из баритобетона и обычного бетона невелика, но прочность и надежность сооружений из обычного бетона значительно выше. Защитные свойства бетона ухудшаются при температуре более $100 \text{ }^\circ\text{C}$, что связано с выделением связанной цементом воды. Но при высоких температурах используют термостойкие (*серпентитовые*) бетоны ($\rho = 2,3 \text{ г/см}^3$).

Изменяя состав бетона, можно в достаточно широких свойствах менять его защитные свойства. Повышают плотность бетона, заменяя гравий более тяжелыми материалами: железной рудой, стальной дро-

бую, баритом и другими металлическими заполнителями. Такой бетон называют тяжелым бетоном. Плотность тяжелого бетона изменяется от $\rho = 3 \text{ г/см}^3$ до $\rho = 6 \text{ г/см}^3$, что значительно увеличивает его защитные свойства, но при этом возрастает и стоимость такого бетона.

Кирпич ($\rho = 1,4 - 1,9 \text{ г/см}^3$). Часто защиту более выгодно делать из строительного кирпича: красного или белого. При этом необходимо, чтобы раствор полностью закрывал зазор между кирпичами и имел плотность не меньше плотности кирпича. Небольшая плотность и трудности, связанные с контролем при строительстве, приводят к тому, что кирпич редко используется в качестве основной защиты.

Как отмечено выше, чем выше энергия излучения, от которой необходимо защищаться, тем выгоднее использовать в качестве защиты более легкие и дешевые материалы. Ориентировочно можно считать, что для устройства стационарной защиты при излучении с энергией до 300.. 400 кэВ наиболее выгодным материалом является барит в виде баритовой штукатурки или баритобетона [6.1]. В этой области энергий стены и перекрытия можно выполнять из баритобетона, а для защиты дверей использовать листовой свинец. Следует отметить, что стены из баритобетона не выдерживают больших нагрузок, а усиление защиты стен с помощью листового свинца нерентабельно, ввиду большой стоимости.

Для энергий более 400 кэВ защитные стационарные сооружения целесообразно изготавливать из обычного железобетона как наиболее надежного и прочного материала. В этой области энергий возникает большая проблема защиты дверных проемов. Для их защиты необходимо использовать стальные или чугунные плиты, а для снижения толщины сооружать лабиринт с бетонными стенами, исключая попадание первичного и однократно рассеянного излучения в дверной проем.

ГЛАВА 7. МАТЕРИАЛЫ ЗАЩИТЫ ОТ α И β ИЗЛУЧЕНИЙ

7.1. ЗАЩИТА ОТ ВНЕШНИХ ПОТОКОВ α - ЧАСТИЦ

α - Частицы - это положительно заряженные ядра гелия, испускаемые радиоактивными нуклидами с большим массовым числом. При этом радиоактивном превращении в основном ядре на две единицы

уменьшается заряд и на четыре - масса, например ${}_{86}^{222}\text{Rn}^{\alpha} \rightarrow {}_{84}^{218}\text{Po}$

и ${}_{84}^{238}\text{U}^{\alpha} \rightarrow {}_{92}^{234}\text{Th}$. α - Частицы испускаются также при взаимодействии нейтронов с некоторыми ядрами, в том числе легко-атомными,

например ${}_{3}^{6}\text{Li}(n, \alpha){}_{1}^{3}\text{H}$ и ${}_{13}^{27}\text{Al}(n, \alpha){}_{11}^{24}\text{Na}$. α - Частицы присутствуют также в космическом пространстве. За небольшим исключением энергия α - частиц радионуклидов лежит в диапазоне от 4 до 10 МэВ. В этой области основным видом потерь энергии при взаимодействии их с веществом являются ионизационные потери на неупругие столкновения со связанными электронами атомов среды.

α - Частицы обладают очень высокой ионизирующей способностью и поэтому теряют свою энергию на поглощение в сравнительно тонких слоях защиты. Ионизационные потери заряженных частиц, в том числе и α -

частиц $(-dE / dx)_{\text{ион}}$, прямо пропорциональны числу электронов в единице объема поглотителя и обратно пропорциональны энергии.

α - Частицы имеют линейный спектр излучения. Как и все заряженные моноэнергетические частицы, α - частицы в поглотителе ослабляются не по экспоненциальному закону. В этом состоит их существенное отличие от нейтральных частиц - моноэнергетических фотонов и нейтронов, для которых в «узком пучке» характерна экспоненциальная форма ослабления в защите.

Защиту от внешних потоков α - частиц рассчитывают по максимальной длине пробега $R_{\alpha} = R_{cp}$, где R_{cp} - средняя длина пробега в приближении непрерывного замедления

$$R_{\alpha} = R_{cp} = \int_0^{E_{\alpha}} \frac{dE}{\left| -dE / dx \right|_{\text{ион}}} \quad (7.1)$$

Расчетные значения R_{α} приведены в справочной литературе. В качестве примера в табл. 7.1 приведены пробеги α - частиц в воздухе, биологической ткани и алюминии.

Таблица 7.1

Максимальные пробеги α - частиц R_{α} , и экстраполированные пробеги $R_{\text{экс}}$ моноэнергетических электронов

Энергия частиц E_0 МэВ	R_{α} α - частиц, мкм			$R_{\text{экс}}$ электронов, см		
	Воздух	Биологическая ткань	Al	Воздух	Биологическая ткань	Al
0,1	$1,13 \cdot 10^3$	1,03	0,95	10,5	0,0124	0,00481
0,5	$3,9 \cdot 10^3$	2,94	2,56	135	0,16	0,0585
1,0	$4,99 \cdot 10^3$	5,06	4,05	341	0,40	0,15
2,0	$9,66 \cdot 10^3$	10,4	7,38	789	0,93	0,34
4,0	$2,37 \cdot 10^4$	26,2	16,5	1690	2,00	0,73
6,0	$4,37 \cdot 10^4$	48,8	28,8	2613	3,09	1,13
10,0	$1,02 \cdot 10^5$	112	61,6	4440	5,24	1,92

Для определения максимального пробега α - частиц используют приближенные эмпирические соотношения. Так, для расчетов R_{α} , см, в воздухе в диапазоне энергий $E_0 = 4 \div 7$ МэВ применяют формулу Гейгера (при $t = 15$ °C и давлении 1013 гПа [760 мм рт. ст.]).

$$R_{\alpha} \approx 0,32 E_{\alpha}^{1,5} \quad (7.2)$$

а для любого вещества с массовым числом A - формулу Брегга

$$R_{\alpha} \approx 10^{-4} \sqrt{AE_{\alpha}^3 / \rho}, \quad (7.3)$$

где R_{α} - максимальный пробег, см; ρ - плотность вещества, г/см³.

Пробег α -частиц очень мал. Так, в воздухе для энергий α -частиц $E_{\alpha} = 5,5$ МэВ (${}^{222}_{86}\text{Rn}$), $R_{\alpha} \approx 4$ см, а в биологической ткани $R_{\alpha} = 43$ мкм, т.е. меньше толщины слоя эпидермиса (70 мкм). Однако для энергии $R_{\alpha} = 7,7$ МэВ (${}^{214}_{84}\text{Po}$) пробег α -частиц в биологической ткани $R_{\alpha} = 77$ мкм и, следовательно, достигает чувствительных клеток базального слоя. Максимальный пробег в воздухе даже для энергии $E_{\alpha} = 10$ МэВ составляет около 10 см.

Таким образом, защита от внешних потоков α -частиц, испускаемых радионуклидами, не представляет проблемы. Они полностью экранируются слоем 10 см воздуха, тонкой (до 60 мкм) фольгой, тонким листом пластика или стекла, хирургическими перчатками, одеждой и обувью.

Радионуклиды как α -излучатели опасны прежде всего как источники внутреннего облучения. Обычно их опасность примерно на два порядка превосходит опасность внутреннего облучения β^{-} , γ -излучателями. Соответственно все производные характеристики (допустимые концентрации в воздухе и воде, допустимые уровни загрязнения почвы и продуктов питания) для α -излучающих радионуклидов значительно ужесточены по сравнению с β^{-} , γ -излучателями. При необходимости защита органов дыхания достигается путем использования средств индивидуальной защиты (см. п. 7.3).

7.2. ЗАЩИТА ОТ ВНЕШНИХ ПОТОКОВ ЭЛЕКТРОНОВ И ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В данном пункте рассматриваются вопросы защиты от β^- - частиц, испускаемых радиоактивными ядрами. Они могут нести или отрицательный заряд (и тогда их называют β^- - частицами), или положительный (β^+ - частицы). Их принято называть обобщенным термином β - частицы. Следует отметить два основных свойства β - частиц:

- они имеют непрерывный спектр излучения от 0 до максимальной величины $E_{\beta,0}$ в отличие от моноэнергетических электронов конверсии;

- максимальная энергия β - частиц для большинства радионуклидов не превосходит 5 МэВ. В диапазоне этих сравнительно небольших энергий β^- - частицы при взаимодействии с веществом теряют свою энергию в основном на ионизацию и возбуждение атомных электронов (эти два процесса принято называть ионизацией) и на образование тормозного фотонного излучения, также с непрерывным спектром.

Процесс взаимодействия электронов с веществом подробно описан в [7.1]. Здесь остановимся лишь на некоторых соотношениях, которые используются для решения практических задач защиты от внешнего потока β - частиц и тормозного излучения.

Одной из характеристик всех заряженных частиц (в том числе и электронов) является их пробег в веществе. Поскольку β - частицы имеют непрерывный спектр излучения, имеющего различную проникающую способность в веществе, «пробег для всего спектра» не имеет физического смысла. Поэтому формулы для пробега, полученные чаще всего эмпирическим путем, приводятся обычно для моноэнергетических электронов.

Следует различать средний, экстраполированный и максимальный пробеги.

Средний пробег R_{cp} , г/см², определяется из соотношения

$$R_{cp} = \int_0^{E_0} \frac{dE}{|-dE / dx|}, \quad (7.4)$$

где $|-dE / dx|$ - полные энергетические потери, рассчитываемые по формулам [7.5]. Их численные значения для различных сред приводятся в справочной литературе.

Зависимость относительной доли электронов, прошедших поглотитель, от его толщины приведена на рис. 7.1. Выделим долю электронов

$T(x)$, прошедших до глубины x_m , соответствующей средней точке прямолинейного участка кривой прохождения. Тогда экстраполированный пробег $R_{экс}$ будет соответствовать глубине, где касательная в точке x_m пересекает ось x .

В диапазоне энергий 0,03-3 МэВ экстраполированный пробег $R_{экс}$ с погрешностью не выше 10% может быть рассчитан по эмпирической формуле

$$R_{экс}(E_0, \theta_0, Z) = a \left(\sqrt{1 + 25E_0^2} - 0,9865 \right), \quad (7.5)$$

где θ_0 - угол падения пучка электронов на поглотитель ($0 \leq \theta_0 \leq 60^\circ$); Z - атомный номер поглотителя; коэффициент $a = (0,161 \cos(\theta_0 / 2)) / Z^{0.2}$; E_0 - энергия моноэнергетических электронов, или максимальная энергия β -частиц, МэВ.

В более широком диапазоне моноэнергетических электронов с E_0 от 4 до 30 МэВ при нормальном падении на поглотитель расчет $R_{экс}$ проводится по приближенной формуле

$$R_{\text{экс}}(E_0, Z) = 0,565 \left(\frac{125}{Z+112} \right) E_0 - 0,123 \left(\frac{175}{Z+162} \right). \quad (7.6)$$

Для электронов с $E_0 \geq 3$ МэВ отношение

$$\frac{R_{\text{экс}}}{R_{\text{ср}}} = \left(0,69 + 0,51 \sqrt{\frac{Zmc^2}{E_0}} \right)^{-1}, \quad (7.7)$$

где $mc^2 = 0,511$ МэВ - энергия покоя электрона. Значение $R_{\text{экс}} / R_{\text{ср}}$ возрастает с увеличением энергии электронов.

Для защиты от внешнего потока электронов используется их максимальный пробег $R_{\text{макс}}$, его численное значение на 15-25 % превосходит $R_{\text{экс}}$. Существует несколько приближенных эмпирических формул для $R_{\text{макс}}$ типа $R_{\text{макс}} = AE_0 - B$, где A и B - постоянные коэффициенты. Например, максимальный пробег β -частиц $R_{\text{макс}}$ в г/см² Al в диапазоне энергий $0,5 \leq E_0 \leq 3$ МэВ описывается формулой

$$R_{\text{макс}} \approx 0,52E_0 - 0,09; \quad (7.8)$$

для $E_0 > 2,5$ МэВ

$$R_{\text{макс}} \approx 0,530E_0 - 0,106. \quad (7.9)$$

Для грубых оценок максимального пробега β -частиц до практически полного поглощения используют также приближенные формулы:

$$\left. \begin{array}{l} \text{в мм алюминия } R_{\text{макс}}^{\text{Al}} \approx 2,5E_0; \\ \text{в м воздуха } R_{\text{макс}}^{\text{возд}} \approx 4,5E_0. \end{array} \right\} \quad (7.10)$$

В отсутствие защитных экранов плотность потока β - частиц точечного непоглощающего источника $\varphi(0)$, см⁻² с⁻¹, на расстоянии R , см, рассчитывается по формуле

$$\varphi(0) = \frac{A\eta}{4\pi R^2}, \quad (7.11)$$

где A - активность, Бк; η - абсолютный выход частиц на один распад ядра.

При наличии поглотителя толщиной x , г/см², для β - частиц справедлива экспоненциальная форма ослабления в виде

$$\varphi(x) = \varphi(0)\exp(-\alpha x), \quad (7.12)$$

где $\varphi(x)$ - плотность потока после толщины поглотителя (включая воздух) x , г/см²; α - в см²/г.

$$\alpha = 15,5E_{\beta,0}^{-1,41}$$

где $E_{\beta,0}$ - граничная энергия β - спектра.

Значения предельно допустимых плотностей потоков электронов и β - частиц для стандартного времени облучения персонала приведены в НРБ – 76-87. Таким образом, формула (7.11) позволяет не только рассчитывать плотность потока от β - частиц в вакууме, но и оценить защиту временем, количеством и расстоянием. На рис. 7.1 даны значения мощности поглощенной дозы от β - частиц на различной глубине биологической ткани при контактном загрязнении кожи радиоактивными веществами, а на рис. 7.3 - удельные эквивалентные дозы электронов и β - частиц. С помощью (7.15), (7.16) и рис. 7.1 могут быть рассчитаны флюенсы и допустимые плотности потоков электронов и β - частиц, соответствующие установленной эквивалентной дозе.

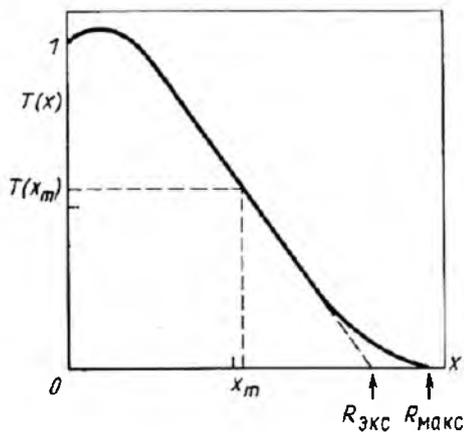


Рис. 7.1. Зависимость относительной доли электронов, прошедших поглотитель, от его толщины

Пробег β - частиц в биологической ткани невелик и значительная часть их поглощается в слое эпидермиса 40-70 мкм. Тем не менее большие потоки β - частиц могут привести к очень серьезному повреждению кожных покровов - так называемым лучевым ожогам. Биологический эффект облучения β - частицами усугубляется воздействием тормозного излучения, возникающего при взаимодействии электронов с веществом.

Защита от тормозного излучения β - частиц. Электроны и позитроны, а также моноэнергетические конверсионные электроны и электроны Оже, отклоняясь (испытывая торможение) в электрическом поле ядра, испускают непрерывный спектр фотонов, которые принято называть тормозным излучением. Выход интенсивности Y , МэВ/част. тормозного излучения при полном поглощении моноэнергетических электронов в материале с атомным номером Z в диапазоне 3 МэВ определяется следующим эмпирическим соотношением [7.4]:

$$Y(E_0) \approx c \cdot 10^{-4} Z E_0^n, \quad (7.13)$$

где значения коэффициента C и показателя степени n приведены в табл. 7.2. Для сложных химических соединений поглощающего материала Z определяется по формуле

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^l \alpha_i Z_i^2}{\sum_{i=1}^l \alpha_i Z_i}, \quad (7.14)$$

где α_i - доля общего числа атомов соединения, имеющая атомный номер Z_i ; l - число элементов в химическом соединении. При тех же условиях для β - частиц с непрерывным спектром $n(E_0)$ формула выхода тормозного излучения принимает вид [7.1, 7.3]

$$Y_\beta = \int_0^{E_{\beta,0}} Y(E_0) n(E_0) dE_0, \quad (7.15)$$

где $E_{\beta,0}$ - граничная энергия β -частиц.

Таблица 7.2

Значения коэффициентов C и n для различных материалов с атомным номером Z

Z	C	n
4	3,5	2,16
13	3,5	2,02
26	3,3	1,91
50	3,2	2,07
79	3,0	1,90

Форма спектра тормозного излучения мопознергетических электронов может быть рассчитана в приближении их непрерывного замедления

$$N(E_0, E_\gamma) = \int_{E_\gamma}^{E_0} \frac{\sigma_{\text{торм}}(E, E_\gamma) dE}{\left| \frac{dE(E)}{dx} \right|}, \quad (7.16)$$

где E_0 - энергия первичных электронов; E_γ - изменяющаяся от 0 до E_0 энергия фотонов тормозного излучения.

Формулы расчета дифференциального сечения тормозного излучения электронов $\sigma_{\text{торм}}$ и полные энергетические потери по треку $\left| -dE(E')/dx \right|$ приведены в [7.2].

Если активность радионуклида непоглощающего источника обозначить A , то спектр тормозного излучения от β -частиц можно представить в форме

$$N(E_\gamma) = \int_0^{E_{\beta,0}} A n(E_0) N(E_0, E_\gamma) dE_0. \quad (7.17)$$

Расчет защиты от тормозного излучения производится по тем же методам, как и расчет защиты рентгеновского излучения, т. е. дифференцированно для каждого энергетического интервала с последующим использованием метода конкурирующих линий.

7.3. ЗАЩИТА ОТ ВНЕШНЕГО β -ИЗЛУЧЕНИЯ

При работе близко к источникам излучения или помещении, в котором сконцентрированы инертные газы, кожа может быть подвергнута β -излучению. Эта доза может быть уменьшена одной или сочетанием следующих мер:

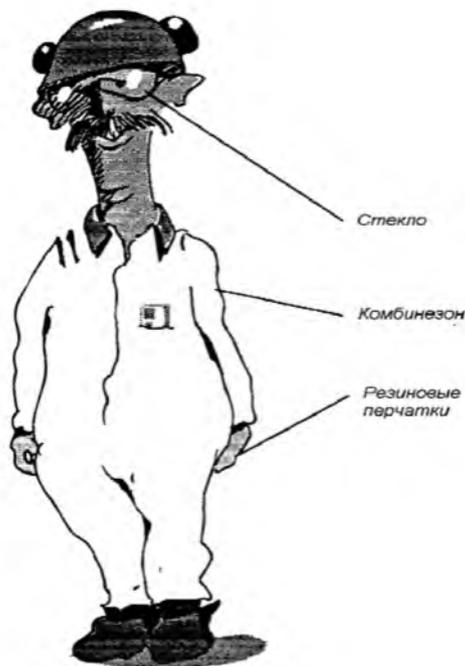


Рис. 7.2. Использование защитной одежды как защиты от излучения

- Использование защиты расстоянием.
- Использование защитной одежды. Дополнительный комбинезон уменьшает дозу на кожу в семь раз, стекла защищают глаза, резиновые перчатки защищают руки (см. рис. 7.2).
- Экранирование источника, методом укрытия его защитным материалом.
- Ограничение времени работы.

ГЛАВА 8. МАТЕРИАЛЫ ЗАЩИТЫ ОТ НЕЙТРОНОВ

8.1. ПРОСТРАНСТВЕННО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НЕЙТРОНОВ В СРЕДАХ

В зависимости от характера распространения нейтронов в средах можно выделить следующие группы материалов: 1) легкие водородсодержащие (водород, вода, полиэтилен) - эффективные замедлители нейтронов; 2) легкие, не содержащие водорода (углерод, карбид бора), используемые при технических или технологических ограничениях на введение в защиту водородсодержащих сред; 3) материалы, состоящие из элементов со средним атомным номером (бетон, породы, минералы); 4) тяжелые материалы (железо, свинец, молибден, вольфрам, титан) для снижения потоков фотонов (улучшают свойства защиты от быстрых нейтронов благодаря высоким сечениям неупругого рассеяния этих элементов); 5) металл-водородсодержащие среды.

Водород. Как материал защиты водород не представляет большого практического интереса, но как элемент он является хорошим замедлителем нейтронов и главным компонентом в большинстве защит от нейтронов. Обусловлено это тем, что ядро водорода – протон - имеет примерно такую же массу, как и нейтрон, и в каждом акте упругого рассеяния на водороде нейтрон теряет в среднем половину своей энергии. Это определяет большой интерес к изучению поля нейтронного излучения в водороде.

Барьерная защита из водорода обладает наилучшими защитными свойствами от нейтронов, отнесенными к единице массы.

Информация о пространственно-энергетическом распределении нейтронов в водороде получена расчетами методом моментов. Были изучены пространственно-энергетические распределения быстрых ней-

тронов $\varphi(d, E, E_0)$ от точечных изотропных источников нейтронов

с энергией E_0 , равной 2, 4, 6, 8, 10, 12 и 14 МэВ, и источника нейтронов деления в бесконечной среде из водорода плотностью $\rho = 0,111$ г/см³ (соответствует парциальной плотности водорода в воде) для различных расстояний между источником и детектором d .

Для пространственно-энергетического распределения нейтронов моноэнергетических источников характерны следующие закономерности:

1. Энергетические распределения рассеянных нейтронов - плавные функции энергии нейтронов, слабо зависящие от d .
2. Энергетическое распределение плотности потока рассеянных быстрых нейтронов близко к постоянному.
3. При увеличении толщины защиты из водорода наблюдается смягчение спектра.
4. В любой точке детектирования, кроме непосредственной окрестности источника, число рассеянных нейтронов больше числа нерассеянных. Вместе с тем следует отметить, что после взаимодействия с атомом водорода нейтрон обладает значительно меньшей длиной свободного пробега и поэтому невелика вероятность того, что он уйдет далеко от места своего первого столкновения. Поэтому спектр нейтронов на большом расстоянии определяется главным образом нейтронами, которые проникли в окрестность точки детектирования, не подвергшись столкновению с атомами водорода.

Распределения нейтронов от источника деления характеризуются следующими закономерностями:

1. С увеличением расстояния между источником и детектором увеличивается средняя энергия нейтронов и, следовательно, наблюдается ужесточение спектра.
2. При высокой энергии ($E \geq 12$ МэВ) спектр нейтронов изменяется подобно изменению спектра нерассеянных нейтронов.

Для расчета поля нейтронов в чистом водороде можно использовать приближенный метод решения кинетического уравнения «рассеяние прямо вперед». Если принять, что сечение водорода $\sum_H(E)$ изменяется с энергией по закону $1/E$, плотность потока нейтронов от точечного изотропного источника единичной мощности с начальной энергией E_0 на расстоянии d от источника определяется зависимо-

$$\varphi(d) = \left[1 / (4\pi d^2) \right] \times$$

$$\times \exp \left[- \sum_H (E_0) d \right] \left[1 + \sum_H (E_0) d \right] \quad (8.1)$$

$$\left[1 + \sum_H (E_0) d \right]$$

Множитель $\left[1 + \sum_H (E_0) d \right]$ представляет собой числовой фактор накопления нейтронов.

Рассчитанные таким простым способом факторы накопления нейтронов хорошо совпадают с результатами точного расчета методом моментов. Хорошее согласие этих данных говорит о возможности использования метода «рассеяние прямо вперед» для практических расчетов.

Для точечного изотропного источника мощностью q_0 с произвольным энергетическим распределением вида $p(E_0)$ плотность потока нейтронов в водороде можно рассчитать из соотношения [8.2]

$$\varphi(d) = \left[q_0 / (4\pi d^2) \right] \int p(E_0) \exp d \left[- \sum_H (E_0) d \right] \times$$

$$\times \left[1 + \sum_H (E_0) \right] dE_0$$

Вода - наиболее часто используемый в защите водородсодержащий материал. Это обусловлено высокой ядерной плотностью водорода в воде (при $\rho = 1 \text{ г/см}^3$ $6,66 \cdot 10^{22}$ ядер/см³), невысокой стоимостью, легкодоступностью, способностью заполнять все отведенное для нее пространство без образования щелей, пустот, раковин в защите. Обычно для защиты применяют дистиллированную воду. Воду используют также как эталонную среду для отработки методики измерений или расчетов.

Характеристики ослабления нейтронного излучения в воде рассчитаны и измерены достаточно полно.

Как и для водорода, пространственно-энергетическое распределение быстрых нейтронов $\varphi(d, E, E_0)$ от точечных изотропных источников нейтронов с энергией E_0 , равной 2, 4, 6, 8, 10, 12 и 14

МэВ, и источника нейтронов деления в бесконечной водной среде плотностью $\rho = 1 \text{ г/см}^3$ для расстояний между источником и детектором d до 60-120 см определено методом моментов. Моноэнергетические источники при этом задавались треугольным импульсом.

Энергетические спектры плотности потока нерассеянных нейтронов в воде для точечного изотропного источника нейтронов деления ^{235}U показаны на рис. 8.1. Спектры нормализованы к постоянной величине в максимуме. При возрастании расстояния от источника энергетический спектр нерассеянных нейтронов становится жестче, максимум спектра сдвигается в область более высоких энергий. Форма спектра при этом становится симметричной.

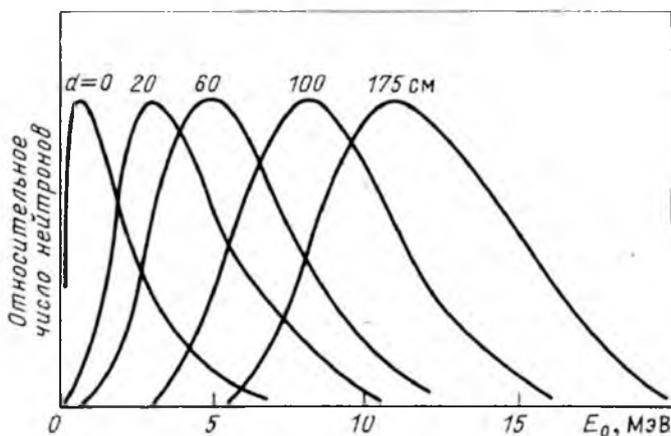


Рис. 8.1. Относительное распределение нерассеянных нейтронов от точечного изотропного источника нейтронов деления ^{235}U на различных расстояниях в воде d

Сопоставление данных расчетов и сечений кислорода и водорода показывает, что основную роль в распространении нейтронов в воде играют столкновения на водороде. Некоторое небольшое различие в форме спектра в водороде и воде для источника нейтронов деления объясняется резонансной структурой сечения для кислорода при энергии 1,3-4 МэВ. Однако нерегулярности в спектре на воде не приводят к

заметному изменению средней энергии, которая близка к средней энергии спектра для чистого водорода.

Результаты экспериментальных исследований для моноэнергетических источников и источников нейтронов деления хорошо согласуются (погрешность 10-20 %) с расчетными данными.

Для пространственно-энергетического распределения моноэнергетических источников характерны следующие закономерности:

1. Начиная с небольших расстояний от источника, устанавливается практически постоянное энергетическое распределение рассеянных нейтронов. В области энергий $E < 0,5$ МэВ форма спектра, начиная с расстояний около 10 см, практически не зависит от d и E_0 . Для энергии в диапазоне $2 \text{ эВ} < E \leq 330 \text{ кэВ}$ спектр может быть рассчитан по формуле [8.3]

$$\varphi(d, E, E_0) = \frac{C(E_0, d)}{E \sum_H(E)} \quad (8.2)$$

где $C(E_0, d)$ - постоянная, зависящая от d и E_0 ; $\sum_H(E)$ - полное сечение взаимодействия нейтронов с энергией E на водороде.

Используя зависимость вида (9.2) и значение $\varphi(d, E, E_0)$, например, для $E = 0,33$ МэВ (нижняя граница энергии, для которой рассчитаны энергетические спектры), можно определить

$$\varphi(d, E, E_0) = \varphi(d, E = 0,33 \text{ МэВ}) \times \frac{0,33 \sum_H(E = 0,33 \text{ МэВ})}{E \sum_H(E)} \quad (8.3)$$

2. С расстояния от источника 1-1,5 длины свободного пробега энергетическое распределение в полубесконечной (источник на границе среды) и бесконечной средах совпадает.

3. С расстояния d , большего 1,5-2 длин свободного пробега нейтронов источника, характер функции ослабления для детектируемых нейтронов различных энергетических групп практически не изменяется.

4. Полученная подробная информация о поле нейтронного излучения точечных изотропных моноэнергетических источников в водороде и воде может быть использована для вычисления пространственно-энергетического распределения нейтронов для источника с любым

энергетическим распределением нейтронов $p(E_0)$ по формуле

$$\varphi[d, E, p(E_0)] = \int_{\text{спектр источника}} \varphi(d, E, E_0) p(E_0) dE_0 \quad (8.4)$$

Вместо воды в качестве водородсодержащей среды может быть использован полиэтилен. В 1 см^3 полиэтилена плотностью $0,92 \text{ г/см}^3$ содержится $7,92 \cdot 10^{22}$ ядер водорода, т. е. примерно на 19 % больше, чем в воде. Поэтому для достижения одного и того же ослабления нейтронов по толщине требуется полиэтилена меньше, чем воды.

Среди гидридов металлов известны соединения с ядерной плотностью водорода ρ_H , близкой к ρ_H воды. Это гидриды титана TiH_n , циркония ZrH_n , ванадия VH_n , кальция CaH_2 , лития LiH , магния MgH_2 . Гидрид кальция бурно реагирует с водой, разлагается на воздухе; активно реагирует с водой также и гидрид лития; менее активен гидрид магния. Поэтому вряд ли LiH , CaH_2 и MgH_2 могут найти широкое применение в защите.

Углерод. Отметим три особенности формирования поля излучения в углероде:

1. Поток рассеянных нейтронов низкой энергии (меньше примерно 1 МэВ и особенно ниже 10 кэВ), умноженный на $4\pi d^2$, с увеличением d увеличивается до толщин 25-30 г/см², а затем убывает.

Это объясняется тем, что требуется значительная толщина слоя углерода, прежде чем достаточное количество нейтронов замедлится до низких энергий.

2. После начальных возмущений устанавливается равновесный спектр в графите.

3. Графит - единственный материал, в котором вклад в поле излучения нейтронов тепловых энергий во много раз превышает вклад нейтронов других групп.

Железо. Особенностью многих сред со средними и большими атомными номерами (никель, свинец и др.) является наличие неупругого рассеяния нейтронов при энергии выше 0,5-1,5 МэВ. К этим средам относится железо, для которого энергетический порог неупругого рассеяния $E_{II}=0,85$ МэВ. При энергиях $E > E_{II}$ имеет место большой сброс энергии при неупругом рассеянии. В таких случаях энергетическое распределение плотности потока нейтронов имеет подъем в области энергий ниже E_{II} .

Для источника нейтронов деления деформация спектра с увеличением толщины защиты при энергиях выше 3-4 МэВ незначительна: спектр практически совпадает со спектром нейтронов источника. В значительной степени это объясняется тем, что для материалов со средними и большими атомными номерами при энергиях выше 2-3 МэВ сечение неупругого рассеяния, которым определяется замедление нейтронов, слабо зависит от их энергии.

Характерным для железа является наличие сравнительно небольшого провала в сечении при энергии 0,5-1,0 МэВ и большого «антирезонанса» в сечении при энергии около 24 кэВ. Отмеченные особенности железа обуславливают возрастание длины релаксации нейтронов с уменьшением энергетического порога детектора.

Смеси легких и тяжелых ядер. Для средних и тяжелых ядер длина релаксации быстрых нейтронов часто бывает меньше длины релаксации промежуточных и тепловых нейтронов. Это приводит к нежелательному интенсивному накоплению низкоэнергетических нейтронов с увеличением толщины защиты. Добавление к этим средам легких ядер (обычно водородсодержащих веществ) приводит к уменьшению длины релаксации нейтронов низких групп. Например, при объемной концентрации железа в железозводной смеси около 82 % длины релаксации быстрых, тепловых и промежуточных нейтронов совпа-

дают. Такие металловодные смеси и гидриды металлов представляют собой эффективные защитные композиции в силу удачного сочетания хорошо замедляющих свойств водорода во всем энергетическом диапазоне нейтронов с большими величинами сечения неупругого рассеяния быстрых нейтронов для многих металлов, обеспечивающих значительные сбросы энергии при неупругом рассеянии нейтронов.

8.2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКО-УГЛОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАССЕЯННОГО НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ГРАНИЦЕ СРЕДЫ

Граница среды оказывает значительное влияние на форму углового распределения плотности потока нейтронов: внутри защитных барьеров оно более изотропно из-за вклада в поле излучения нейтронов, многократно рассеянных от последующих слоев материала. Эта закономерность особенно заметно проявляется для тяжелых материалов, таких, как свинец или железо, обладающих значительными альбедами быстрых нейтронов.

С увеличением угла θ нейтронного излучения происходит некоторое смягчение спектров рассеянных нейтронов, что обусловлено упругим (для карбида бора) и неупругим (для вольфрама) рассеянием быстрых нейтронов на ядрах материалов защитных барьеров.

С увеличением энергии детектируемых нейтронов их угловое распределение становится более анизотропным.

Угловое распределение плотности потока рассеянных быстрых нейтронов с энергией $E > 0,7-1$ МэВ плоского моно-направленного источника нейтронов реактора за защитой, отнесенное к единичному телесному углу, в диапазоне углов детектирования $15 \div 20^\circ \leq \theta \leq 75-80^\circ$ (θ - угол между нормалью к защите и направлением на детектор) аппроксимируется зависимостью, подобной зависимости для фотонов:

$$\varphi(d, \theta, E) = C(d, E) \exp \left[-\theta / \theta^{П.М}(d, E) \right], \quad (8.5)$$

где $\theta^{П.М}$ - характеристический угол, зависящий в общем случае от толщины защиты d и энергии детектируемых нейтронов; начиная с некоторой толщины защиты, большей одной-двух длин релаксации

детектируемых нейтронов в среде, $\theta^{П.М}$ слабо зависит от d ; $C(d, E)$ - нормировочный множитель.

Как показывает анализ, $\theta^{П.М} \approx 40-60^\circ$ для не водородсодержащих сред и $\theta^{П.М} \approx 30^\circ$ - для водородсодержащих. Угол $\theta^{П.М}$ существенно зависит от энергии детектируемых нейтронов. С уменьшением энергии угловое распределение становится более изотропным, например для не водород-содержащих сред при энергии вблизи области тепловых нейтронов $\theta^{П.М} \approx 100^\circ$.

Множитель $C(d, E)$ можно определить из нормировочного выражения

$$\varphi(d, E) = \varphi_0(d, E) [B_q(d) - 1] = \int_0^{2\pi} d\psi \int_0^{0,5\pi} C(d, E) \exp(-\theta / \theta^{П.М}(d, E)) \sin \theta d\theta, \quad (8.6)$$

где $\varphi(d, E)$, $\varphi_0(d, E)$ - плотность потока рассеянных и нерассеянных нейтронов с энергией, большей E , за защитой толщиной d , $B_q(d)$ - числовой фактор накопления нейтронов данной энергетической группы. Из этого выражения определяем

$$C(d, E) = \frac{\varphi_0(d, E) [B_q(d) - 1]}{2\pi \theta^{П.М}(d, E)} \times \frac{1 + [\theta^{П.М}(d, E)]^2}{\theta^{П.М}(d, E) - \exp[-\pi / (2\theta^{П.М}(d, E))]} \quad (8.7)$$

Для углов детектирования $\theta^0 \leq \theta \leq 80 \div 90^\circ$ при детектировании нейтронов в энергетическом интервале ΔE и тех же условиях задачи с погрешностью 10-15 %

$$\varphi(d, \theta, \Delta E) = C(d, \Delta E) \sum_{i=1}^2 (-1)^{i-1} A_i(d, \Delta E) \times \exp(-\theta / \theta_i^{П.М}(d, \Delta E)), \quad (8.8)$$

где $C(d, \Delta E)$ - нормировочный множитель; $A_i(d, \Delta E)$ - численные параметры ($A_1 + A_2 = 1$); $\theta_i^{П.М}$ - характеристические углы; A_i и $\theta_i^{П.М}$ в наиболее общем виде зависят для данного материала защиты от энергии детектируемого излучения ΔE и толщины защиты.

Однако начиная с некоторой толщины защиты $d_{мин}$ они слабо зависят от d . Первый член формулы (8.8) определяет угловое распределение в области $\theta \geq 20^\circ$, второй - учитывает особенности в поведении плотности потока нейтронов при $\theta \leq 20^\circ$. Нормировочный множитель $C(d, \Delta E)$ определяется так же, как и $C(d, E)$ в формуле (8.5).

8.3. МЕТОД ДЛИН РЕЛАКСАЦИИ

Анализ имеющейся в литературе экспериментальной и расчетной информации показывает, что пространственное распределение плотности потока (мощности дозы) нейтронов с достаточно хорошей для практических расчетов точностью после исключения геометрического ослабления удастся описать простой экспоненциальной зависимостью вида

$$\varphi(d) = \varphi_0 \exp(-d / L), \quad (8.9)$$

где φ_0 - характеристика поля нейтронов в точке детектирования без защиты; L - длина релаксации нейтронов в среде, в общем случае зависящая от энергии нейтронов источника, толщины слоя материала, компоновки и геометрии защиты, энергии детектируемых нейтронов и

других условий задачи. В большинстве случаев L не зависит от толщины лишь в определенном диапазоне изменения d , поэтому ее определяют для отдельных участков защиты, в пределах которых ослабление нейтронов может быть описано экспоненциальной зависимостью с постоянным значением L . В таких случаях плотность потока (мощность дозы) нейтронов определяют по формуле

$$\varphi(d) = \varphi_0 \exp\left(-\sum_{i=1}^m \Delta d_i / L_i\right), \quad (7.10)$$

где Δd_i - толщина защиты i -го участка, для которого L принята равной L_i ; m - число участков, на которые разбита защита по толщине.

В литературе имеется обширная информация о длинах релаксации, полученная расчетом и экспериментально с различными источниками для разных защитных сред [8.1].

В общем случае ход кривой ослабления на начальном участке на расстоянии от источника $(2 - 3)L$ может отличаться от экспоненциального. Это отличие можно учесть введением в зависимость вида (8.9)

или (8.10) коэффициента f , характеризующего отклонение от экспоненциальной формы кривой ослабления на начальных расстояниях от источника (табл. 8.2). Для источников нейтронов деления часто $f \approx 1$

С учетом коэффициента f плотность потока нейтронов, например моноэнергетического точечного изотропного источника мощностью q_0 за защитой толщиной d , когда источник и детектор находятся с разных сторон защиты на одной нормали к ее поверхности, может быть определена из соотношения

$$\varphi(d) = \frac{q_0 f}{4\pi d} \exp\left(-\sum_{i=1}^m \Delta d_i / L_i\right). \quad (8.11)$$

Для иеомоноэнергетического источника со спектром вида

$$\varphi(d) = \frac{q_0}{4\pi d} \sum_j f_j \exp\left(-\sum_i \Delta d_i / L_{ji}\right) p(E_0), \quad (8.12)$$

где $p(E_0)$ - доля нейтронов источника в энергетическом интервале от E_{0j} до $E_{0j} + \Delta E_{0j}$; f_j - коэффициент для энергии $E_{0j} + 0,5\Delta E_{0j}$; L_{ji} - длина релаксации для нейтронов с энергией $E_{0j} + 0,5\Delta E_{0j}$ на толщине защиты i -го участка.

Для защит, представляющих собой смесь тяжелых и легких ядер, L часто можно оценить из соотношения

$$1/L = (c_L / L_L) + (c_T / L_T), \quad (8.13)$$

где L_L и L_T - длина релаксации легкого и тяжелого компонентов соответственно; c_L и c_T - относительная объемная концентрация легкого и тяжелого компонентов соответственно ($c_L + c_T = 1$).

8.4. СЕЧЕНИЕ ВЫВЕДЕНИЯ

Концепция *сечения выведения* широко используется для вычисления мощностей дозы быстрых нейтронов в водород-содержащих средах. Этот метод является одним из наиболее простых и продуктивных методов решения большого круга задач прохождения нейтронов через защиту.

Физической предпосылкой концепции сечения выведения является то, что процессы взаимодействия (исключая рассеяние на малые углы) с ядрами тяжелых элементов в водородсодержащей среде (количество которой больше некоторого минимально требуемого) могут рассматриваться как поглощение.

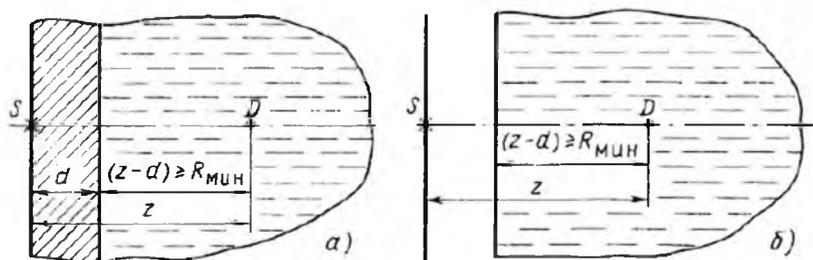


Рис. 8.2. Геометрия эксперимента по определению сечения выведения для гетерогенных сред

Для объяснения этого явления следует вспомнить, что сечение водорода в рассматриваемой области энергии увеличивается с уменьшением энергии нейтронов, а также имеет место большой сброс энергии нейтрона при рассеянии на водороде. В результате при неупругом рассеянии резко уменьшается вероятность того, что нейтрон достигнет точки детектирования. Аналогичная картина происходит и при упругом рассеянии на большие углы, когда увеличивается путь нейтронов до точки детектирования.

Концепция сечения выведения основана на том, что в большинстве водородсодержащих сред при выполнении некоторых условий влияние других вводимых в защиту материалов, ослабляющих быстрые нейтроны, можно учесть введением простого экспоненциального

множителя типа $\exp(-\sum_{rem} d)$, где \sum_{rem} - сечение выведения; d - толщина слоя вводимого вещества.

Для грубой оценки сечения выведения можно воспользоваться приближенной формулой

$$\sum_{rem}(E) = \sum(E) - 2\pi \int_{-1}^{+1} \sum_s(E, \mu_s) \mu_s d\mu_s \quad (8.14)$$

где $\sum(E)$ - полное сечение; $\sum_s(E, \mu_s)$ - дифференциальное сечение упругого рассеяния нейтронов с энергией E на угол $\arccos \mu_s$; μ_s - косинус угла упругого рассеяния.

Впервые методика сечения выведения была разработана для источника нейтронов деления, а в дальнейшем успешно использована для решения задач с источниками нейтронов произвольного спектра.

В наиболее общем виде сечение выведения зависит от энергии нейтронов и условий эксперимента: способа введения изучаемого вещества в водородсодержащую среду, геометрии и углового распределения излучения источника и др.

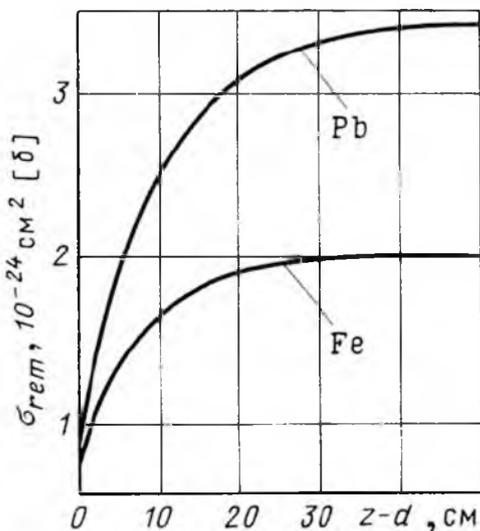


Рис. 8.3. Зависимость сечения выведения от $z-d$ для точечного изотропного источника нейтронов деления, помещенного в центре сферы из железа или свинца с толщиной стенок d , которая покрыта сферическим слоем полиэтилена толщиной $z-d$, для $E_{пор} = 302 \text{ кэВ}$

Различают сечение выведения для гетерогенных сред (вещество вводится в водородсодержащую среду вблизи источника) и гомогенных сред (вещество равномерно распределяется в водородсодержащем материале).

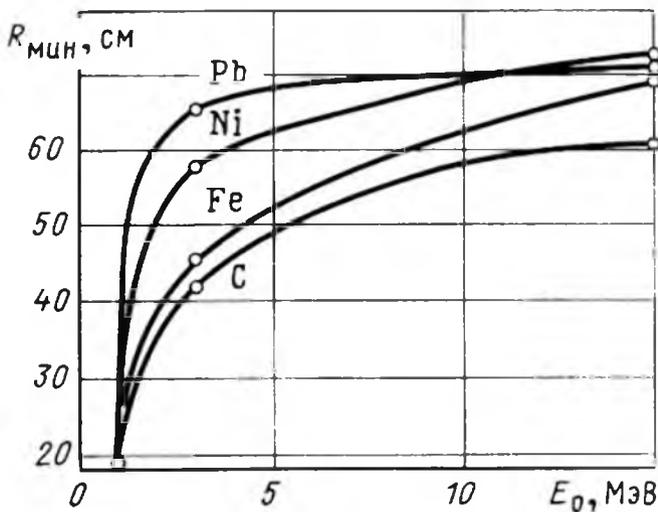


Рис. 8.4. Зависимость $R_{мин}$ от энергии нейтронов источника E_0 для различных материалов (точки - экспериментальные значения)

Сечение выведения для гетерогенных сред. Использование методики сечения выведения для гетерогенных сред требует, чтобы между введенной вблизи источника пластиной и детектором находилось некоторое минимальное количество водородсодержащего вещества,

определяемое расстоянием $R_{мин}$ (рис. 8.2,а). Если при этом условии в водородсодержащую среду (например, в воду) вблизи источника поместить пластину из тяжелого вещества, то закон ослабления мощности дозы быстрых нейтронов этой пластиной представится в виде

$$\dot{D}(z, d) = \dot{D}_H(z - d) \exp\left(-\sum_{rem} d\right), \quad (8.15)$$

где $\dot{D}(z, d)$ - мощность дозы быстрых нейтронов на расстоянии z от источника; $\dot{D}_H(z - d)$ - мощность дозы быстрых нейтронов в

водородсодержащем материале толщиной $z-d$ без пластины;
 \sum_{rem}^{-1} - сечение выведения, см⁻¹; d - толщина пластины, см. Под

$\dot{D}(z, d)$ и $\dot{D}_H(z-d)$ можно понимать также полную мощность дозы нейтронов всех энергий, так как в водородсодержащих средах, начиная с толщины примерно в две длины релаксации, устанавливается практически постоянный дозовый состав излучения. Кроме того, нейтроны низких энергий дают небольшой вклад в полную дозу ней-

тронов (см. п. 8.5); R_{min} соответствует толщине $z-d$, при которой

\sum_{rem} становится постоянным и не увеличивается с дальнейшим

увеличением $z-d$ (рис. 8.3). Обычно величине R_{min} для источника нейтронов деления соответствует слой 4,5 - 6,5 г/см² водорода, что эквивалентно, например, 40-60 см воды или 35-50 см полиэтилена. Таким

образом, R_{min} характеризует минимальное количество водородсодержащей среды, при котором возмущением пластиной спектра можно

пренебречь; R_{min} зависит от энергии нейтронов источника E_0 , материала пластины и эффективного порога детектирования. С уменьшени-

ем энергии источника в пределах $1 \text{ МэВ} \leq E_0 \leq 15 \text{ МэВ}$ (рис. 8.4) и

увеличением энергетического порога детектирования $E_{пор} R_{min}$ уменьшается.

Экспериментальные исследования с моноэнергетическими источниками нейтронов и источниками нейтронов спектра деления показали, что сечение выведения слабо зависит от толщины пластины до пяти длин релаксации.

Для определения \sum_{rem} проводят две серии измерений мощности дозы: в чистой водородсодержащей среде (обычно в воде) (рис. 8.2,б) и в водородсодержащей среде с введенной пластиной изучаемого материала (рис. 8.2,а).

Мощность дозы нейтронов от точечного изотропного источника единичной мощности для измерений в чистой водородсодержащей среде может быть определена по формуле

$$\dot{D}_H(z-d) = \frac{C g_H(z-d)}{4\pi z^2}, \quad (8.16)$$

где $g_H(z-d)$ - функция, характеризующая ослабление нейтронов источника за счет взаимодействий в водородсодержащей среде (без учета геометрического ослабления); C - постоянная.

При введенной пластине толщиной d мощность дозы определяется соотношением

$$\dot{D}_H(z,d) = \frac{C g_H(z-d) g_{nl}(d)}{4\pi z^2}. \quad (8.17)$$

Так как измерения проводятся в условиях, когда $z-d \geq R_{мин}$, то $g_{nl}(d) = \exp(-\sum_{rem} d)$ и, следовательно,

$$\begin{aligned} \dot{D}_H(z-d) / \dot{D}_H(z,d) &= \\ &= 1 / g_{nl}(d) = \exp\left(\sum_{rem} d\right). \end{aligned} \quad (8.18)$$

Тогда

$$\sum_{rem} = (1/d) \ln \left[\dot{D}_H(z-d) / \dot{D}_H(z,d) \right]. \quad (8.19)$$

В экспериментах малая чувствительность дозиметров затрудняет измерение мощности дозы быстрых нейтронов на достаточно больших расстояниях в водородсодержащей среде. Поэтому о $\dot{D}_H(z-d)$ и $\dot{D}_H(z,d)$ судят обычно по плотности потоков тепловых нейтронов $\varphi_H(z-d)$ и $\varphi_H(z,d)$, регистрируемых в этих же точках, например, пропорциональным счетчиком, наполненным газом BF_3 . Такое представление возможно, так как кривая зависимости φ тепловых

нейтронов от расстояния до источника с большой точностью параллельна кривой мощности дозы быстрых нейтронов, особенно на больших расстояниях от источника нейтронов. В этом случае

$$\sum_{rem} = (1/d) \ln \left[\varphi_H(z-d) / \varphi_H(z,d) \right] \quad (8.20)$$

Измерения \sum_{rem} для пакетов, состоящих из набора пластин разных материалов, чередующихся различными способами, показали, что сечения выведения обладают свойством аддитивности.

Закон ослабления нейтронов заданного спектра набором пластин различных материалов можно представить в виде

$$\dot{D} \left(z, \sum_{i=1}^m d_i \right) = \dot{D}_H \left(z - \sum_{i=1}^m d_i \right) \exp \left[- \sum_{i=1}^m \left(\sum_{rem,i} d \right) \right] \quad (8.21)$$

где m - число пластин из различных материалов; $\sum_{rem,i}$ и d_i - сечение выведения и толщина слоя вещества i -го компонента соответственно.

Сечение выведения, $\text{см}^2/\text{г}$, для сложных по химическому составу сред можно рассчитать по формуле

$$\sum_{rem} = 0,01 \sum_{i=1}^n \left(\sum_{rem,i} \eta_i \right) \quad (8.22)$$

где n - число различных химических элементов в среде; $\sum_{rem,i}$ и d_i - сечение выведения, $\text{см}^2/\text{г}$, и массовое содержание, %, i -го элемента соответственно.

Свойство аддитивности сечения выведения используют, в частности, при введении в экспериментальные результаты поправок на влияние оболочек, в которые заключены материалы. Этот же принцип используется при определении \sum_{rem} одного из компонентов материала в химическом соединении или в простой механической смеси.

Например, из измеренного \sum_{rem} для соединения C_2F_3Cl по известным \sum_{rem} углерода и фтора было найдено \sum_{rem} для хлора.

Таблица 8.1

Сечения выведения для нейтронов спектра деления,

$$10^{-24} \text{ см}^2 [\sigma]$$

Элемент	σ_{rem}	Элемент	σ_{rem}	Элемент	σ_{rem}
<i>Li</i>	$1,01 \pm 0,05$	<i>F</i>	$1,29 \pm 0,06$	<i>Cu</i>	$2,04 \pm 0,11$
<i>Be</i>	$1,07 \pm 0,06$	<i>Al</i>	$1,31 \pm 0,05$	<i>Zr</i>	$2,36 \pm 0,12$
<i>B</i>	$0,97 \pm 0,10$	<i>Cl</i>	$1,2 \pm 0,8$	<i>Pb</i>	$3,53 \pm 0,30$
<i>C</i>	$0,81 \pm 0,05$	<i>Fe</i>	$1,980,08$	<i>Bi</i>	$3,49 \pm 0,35$
<i>O</i>	$0,99 \pm 0,10$	<i>Ni</i>	$\pm 1,890,10$	<i>U</i>	$3,6 \pm 0,4$

В приведенных соотношениях предполагалось, что \sum_{rem} определено для данного спектра нейтронного излучения источника, обычно спектра нейтронов деления. Однако часто представляется интересным оценить \sum_{rem} для других источников нейтронов, например (α, n) - источников. Кроме того, даже спектр нейтронов реактора, особенно в области энергий $E_0 \leq 3 \div 4$ МэВ, обычно значительно отличается от спектра нейтронов деления. В этих случаях для расчета дозы нейтронов необходимо знать зависимость сечения выведения от энергии источника $\sum_{rem} = \sum_{rem}(E_0)$.

В табл. 8.1 приведены значения \sum_{rem} для источника нейтронов деления: они были определены при измерениях с дисковым конвектором нейтронов деления.

Анализ результатов расчётов показывает, что в диапазоне $E_0 \geq 3$ МэВ для промежуточных и тяжелых ядер зависимость \sum_{rem} от энергии сравнительно слабая; для легких ядер она более существенна и должна учитываться.

По известной зависимости $\sum_{rem} = \sum_{rem}(E_0)$ можно записать закон ослабления мощности дозы нейтронов для произвольного дозового спектра нейтронов источника вида $p(E_0)$:

$$\begin{aligned} \dot{D}(z, d) = & \int p(E_0) \dot{D}_H(z-d, E_0) \times \\ & \times \exp\left[-\sum_{rem}(E_0)d\right] dE_0, \end{aligned} \quad (8.23)$$

где $\dot{D}_H(z-d, E_0)$ - мощность дозы нейтронов в водородсодержащей среде от источника с энергией E_0 .

Эффективное сечение выведения для любого сложного спектра вида $p(E_0)$ можно определить по формуле

$$\begin{aligned} \exp\left(-\sum_{rem,эф}d\right) = & \\ = \frac{\int p(E_0) \dot{D}_H(z-d, E_0) \exp\left[-\sum_{rem}(E_0)d\right] dE_0}{\int p(E_0) \dot{D}_H(z-d, E_0) dE_0} \end{aligned} \quad (8.24)$$

Зависимость массового сечения выведения $\sum_{rem,m}$, см²/г, от атомного номера Z и атомной массы A материала для источника нейтронов деления можно записать в виде эмпирических выражений:

$$\left. \begin{array}{l} \text{для } Z \leq 8 \quad \sum_{rem,m} = 0,19Z^{-0,743}, \\ \text{для } Z > 8 \quad \sum_{rem,m} = 0,125Z^{-0,565} \end{array} \right\} \quad (8.25)$$

или

$$\sum_{rem,m} = 0,206A^{-1/3}Z^{-0,294} \approx 0,206(AZ)^{-1/3} \quad (8.26)$$

Оценить $\sum_{rem,m}$, см²/г, для источника нейтронов деления можно также из соотношений при

$$A > 10 \sum_{rem,m} = 0,21A^{-0,58} \quad (8.27)$$

или

$$\sum_{rem,m} \approx (2/3) \overline{\sum_{tot,m}}, \quad (8.28)$$

где $\overline{\sum_{tot,m}}$ - среднее значение полного массового сечения взаимодействия нейтронов для энергий 6-8 МэВ.

Используя приведенные выше зависимости для практически важного случая точечного изотропного источника нейтронов, излучающего q_0 нейтр./с с дозовым спектром вида $p(E_0)$, мощность дозы нейтронов на расстоянии Z от источника в водородсодержащей среде, в которой между источником и детектором вблизи источника введен слой материала толщиной d с сечением выведения $\sum_{rem}(E_0)$, можно определить из соотношения

$$\begin{aligned} \dot{D}(z,d) = \frac{Cq_0}{4\pi z^2} \int_{E_{0,мин}}^{E_{0,макс}} p(E_0) g_H(z-d, E_0) \times \\ \times \exp\left[-\sum_{rem}(E_0)d\right] dE_0, \end{aligned} \quad (8.29)$$

где $E_{0,макс}$ и $E_{0,мин}$ - максимальная и минимальная энергия нейтронов источника; C - константа.

Для источника нейтронов деления интегрирование правой части выражения (8.29) заменяется использованием $g_H(z-d)$ и \sum_{rem} для источника нейтронов деления:

$$\dot{D}(z, d) = \frac{Cq_0}{4\pi z^2} g_H(z-d) \exp\left(-\sum_{rem} d\right) \quad (8.30)$$

Расчет мощности дозы объемного источника, например активной зоны ядерного реактора, сводится к интегрированию выражений вида (8.29) или (9.30) по всему объему источника V . Мощность дозы нейтронов в этом случае, например, при равномерном распределении источника по объему V со спектром нейтронов источника вида $p(E_0)$ определяется выражением

$$\begin{aligned} \dot{D}(z, d) = & \int_{E_{0, \min}}^{E_{0, \max}} \int_V \frac{Cq_{V_0}}{4\pi z^2} p(E_0) g_H\left(z - \sum_{i=1}^m d_i, E_0\right) \times \\ & \times \exp\left\{-\sum_{rem} d\right\} \left[-\sum_{i=1}^m \left[\sum_{rem, j} (E_0) d_i\right]\right] dE_0 dV \quad (8.31) \end{aligned}$$

где m - число различных материалов (кроме водородсодержащей среды) на пути нейтронов по лучу, соединяющему элементарный объем dV и точку детектирования; q_{V_0} - удельная объемная мощность источника; Z - расстояние от элемента dV до точки детектирования.

В особую группу можно объединить σ_{rem} , определенные для коллимированного источника, - так называемые *коллимированные сечения выведения* (табл. 8.2). При измерениях в воду между источником нейтронов деления и исследуемой пластиной вещества помещали по-

дый коллиматор длиной 1,5 м. Измерения проводили с помощью детектора тепловых нейтронов в воде на расстояниях 40-80 см за пластиной по оси коллиматора. В этих измерениях нейтроны источника были направлены перпендикулярно пластине, поэтому отклонение от заданного первоначального направления при взаимодействии с материалом пластины могло только увеличить длину их пути до детектора. Для изотропного источника, используемого в описанных выше экспериментах, часть нейтронов после упругих соударений в пластине могла с большей вероятностью достигнуть точки детектирования. Поэтому коллимированные \sum_{rem} несколько больше, чем сечения выведения изотропных источников.

Сечение выведения для гомогенных сред. Закон ослабления мощности дозы нейтронов гомогенной смесью водорода с тяжелыми компонентами при концентрации водорода в смеси более некоторого минимального количества можно записать с использованием сечения выведения для гомогенных сред в виде [8.6]

$$\dot{D}(z) = \dot{D}_H(z) \exp \left[- \sum_{i=1}^n (\sigma_{rem,i} (N_A / A_i) \rho_i z) \right], \quad (8.32)$$

где $\dot{D}(z)$ - мощность дозы нейтронов на расстоянии Z от источника в гомогенной среде; $\dot{D}_H(z)$ - мощность дозы нейтронов на расстоянии Z от источника в чистом водороде с эквивалентной объемной плотностью; $\sigma_{rem,i}$ - микроскопическое сечение выведения i -го компонента; N_A - число Авогадро; A_i и ρ_i - атомная масса и парциальная плотность i -го компонента соответственно.

Таблица 8.2

Коллимированные σ_{rem} для нейтронов спектра деления, 10^{-24} см²
 $[\sigma]$

Элемент	Образец	σ_{rem}	Элемент	Образец	σ_{rem}
<i>Li</i>	<i>LiH</i>	1,34 ± 0,04	<i>Cl</i>	<i>CCl₄</i>	1,91 ± 0,08
	<i>Li</i>	1,57 ± 0,03	<i>Ti</i>	<i>Ti</i>	2,20 ± 0,07
<i>Be</i>	<i>Be</i>	1,40 ± 0,04		<i>TiH</i>	1,87
<i>B</i>	<i>B₄C</i>	1,21 ± 0,02	<i>Fe</i>	<i>Fe</i>	2,26 ± 0,04
<i>C</i>	Графит	От 1,00 ± 0,03 до 1,20 ± 0,02	<i>Ni</i>	<i>Ni</i>	2,32 ± 0,04
			<i>Cu</i>	<i>Cu</i>	2,45 ± 0,05
<i>F</i>	Тефлон	1,50 ± 0,05	<i>Cd</i>	<i>Cd</i>	2,85 ± 0,07
<i>Na</i>		1,60 ± 0,20	<i>W</i>	Меллори- 1000	3,87 ± 0,11
<i>Al</i>	<i>Al</i>	1,61 ± 0,03	<i>Pb</i>	<i>Pb</i>	4,00 ± 0,07
<i>S</i>	<i>S</i>	1,83 ± 0,13	<i>Bi</i>	<i>Bi</i>	3,95 ± 0,08

Сечение выведения $\sum_{rem, \phi f}$ для сложного спектра в этом случае можно определить из выражения

$$\begin{aligned} & \exp\left(-\sum_{rem, \phi f} z\right) = \\ & = \frac{\int p(E_0) \dot{D}_H(z, E_0) \exp\left(-\sum_{rem} (E_0) z\right) dE_0}{\int p(E_0) \dot{D}_H(z, E_0) dE_0}, \end{aligned} \quad (8.33)$$

где $p(E_0)$ - дозовый спектр излучения источника.

Различие в сечениях гомогенной и гетерогенной сред лежит практически в пределах экспериментальных погрешностей их определения (5-10%). Этому расхождению можно дать физическое объяснение. Когда измерения проводятся в гомогенной среде, некоторые «выводящие» ядра располагаются вблизи детектора, и соударения, которые в случае пластины привели бы к выведению нейтрона, здесь могут не привести к такому эффекту. Поэтому и сечение выведения гомогенных сред несколько меньше сечения выведения слоя.

Заметим, что для смесей воды (водорода) и элементов с небольшими и средними значениями Z использование \sum_{rem} гомогенных сред возможно при объемном содержании воды 15-18% или массовом содержании водорода в смеси около 0,3%.

Использование сечений выведения в расчете неводородсодержащей защиты от нейтронов. Для нейтронов деления длина релаксации, измеренная детектором с эффективным энергетическим порогом около 3 МэВ в «чистой» среде, не содержащей водорода, в пределах погрешности измерений (примерно 10%) совпадает с длиной релаксации, рассчитанной для данной «чистой» среды на основании сечения выведения гетерогенной среды. Этот вывод справедлив не только для элементарных сред, но и для сред со сложным химическим составом.

Сечения выведения можно использовать для описания ослабления нейтронов источника деления с энергией более 3 МэВ в данном веществе, например задавать ослабление верхней группы нейтронов с энергией, большей 3 МэВ, при многогрупповых расчетах.

Возможность использования сечения выведения для расчета не содержащих водорода защит имеет качественное объяснение. В самом

деле, расстояние $R_{мин}$ в водородсодержащей среде уменьшается с увеличением энергетического порога детектирования. Это может быть объяснено тем, что наибольшее искажение спектра нейтронов за пластиной введенного вещества происходит в области низких энергий. Чем выше порог детектора, тем более вероятно, что детектор будет регистрировать только такие нейтроны, спектр которых практически не искажен. В принципе существует такой порог детектора, выше которо-

го спектр нейтронов практически не искажается даже на очень малых расстояниях от пластины в водородсодержащей среде, т. е. $R_{\text{мин}}$ стремится к нулю. Таким образом, увеличение энергетического порога детектирования эквивалентно замене водородсодержащей среды. Для случая, когда спектр источника нейтронов близок к спектру деления, эффективный энергетический порог детектора для «чистой» среды равен примерно 3 МэВ.

8.5. ДОЗОВЫЙ СОСТАВ НЕЙТРОНОВ В ЗАЩИТНЫХ СРЕДАХ

Достаточно точное экспериментальное определение энергетического распределения нейтронов во всем диапазоне энергий от тепловых до быстрых нейтронов - сложная задача. Часто экспериментатор определяет поведение в защите нейтронов отдельных групп, например быстрых или тепловых. Наибольшие трудности возникают при определении спектров и потоков промежуточных нейтронов. Поэтому нередко на основании экспериментальных данных о плотности потока или мощности дозы нейтронов какой-либо энергетической группы приходится оценивать эффективность используемой защиты в целом с учетом нейтронов всех энергий.

Дозовый состав нейтронного излучения в зависимости от толщины гомогенной защиты из различных материалов исследован достаточно хорошо.

Мощность эквивалентной дозы определяют исходя из данных о пространственно-энергетическом распределении нейтронов по формуле [8.5]

$$\dot{H}_i(d) = \int_{E_{i,H}}^{E_{i,B}} \varphi(d, E) \delta_H(E) dE, \quad (8.34)$$

где $\delta_H(E)$ - коэффициент перехода от φ к \dot{H} , зависимость которого от энергии показана на рис. 1.6; $E_{i,H}$ и $E_{i,B}$ - нижняя и верхняя границы энергетической группы нейтронов.

Полная мощность эквивалентной дозы нейтронов

$$\dot{H}(d) = \sum_i \dot{H}_i(d) \quad (8.35)$$

При выполнении расчетов нейтроны, как правило, классифицируют по энергетическим группам: тепловые ($E \leq 1$ эВ), медленные ($1 \text{ эВ} < E \leq 10^2 \text{ эВ}$), промежуточные ($10^2 \text{ эВ} < E \leq E_{Гр}$), быстрые ($E > E_{Гр}$). В различных задачах граничная энергия быстрых и промежуточных нейтронов может меняться.

В литературе рассмотрены подобные задачи для другого разбиения на энергетические группы для источников нейтронов деления и ряда практически важных сред, в том числе для различных сортов бетона и камнебетонов.

Рассмотрим особенности дозового распределения нейтронного излучения в некоторых средах.

Вода. Распределения мощности эквивалентной дозы нейтронов различных энергетических групп точечных изотропных источников в воде показывают, что начиная с толщины водной защиты до $2L$, где L - длина релаксации быстрых нейтронов, дозовый состав нейтронного излучения остается неизменным, так как устанавливается равновесный спектр нейтронов в среде. Поэтому вклады нейтронов отдельных энергетических групп в полную мощность эквивалентной дозы могут быть использованы для данного вида источника при любой толщине водной защиты, большей $2L$.

Вклад в полную мощность эквивалентной дозы \dot{H} в воде от тепловых и медленных нейтронов меньше, чем от быстрых и промежуточных. Этот вклад изменяется от 3 % для энергии нейтронов источников $E_0 = 14$ МэВ до 16% для $E_0 = 2$ МэВ.

Существенное влияние на распределение \dot{H} нейтронов между промежуточной и быстрой энергетическими группами оказывает выбор $E_{Гр}$. Например, при переходе от $E_{Гр} = 0,5$ МэВ к $E_{Гр} = 2,0$

МэВ вклад в \dot{N} от быстрых нейтронов для источника спектра деления уменьшается примерно в 1,5 раза, в то время как \dot{N} промежуточных нейтронов увеличивается примерно в 5 раз.

Для $E_{Гр} = 0,5$ МэВ определяющими полную мощность эквивалентной дозы в воде с погрешностью до 15% являются быстрые нейтроны: при $E_{Гр} = 2,0$ МэВ вклады в полную мощность эквивалентной дозы от быстрых и промежуточных нейтронов становятся соизмеримыми и неучет одной из групп может исказить примерно в 2 раза полную мощность эквивалентной дозы в воде.

Углерод. В отличие от воды, в которой с толщины защиты примерно $2L$ устанавливается равновесный спектр, в углероде такого равновесия не наблюдается и вклад отдельных энергетических групп в полную мощность эквивалентной дозы зависит от толщины среды. Однако начиная с толщины слоя углерода 5060 г/см² полная мощность эквивалентной дозы от источника нейтронов.

Железо. Полная мощность эквивалентной дозы нейтронов в железной защите с расстояния 50-60 см практически полностью определяется промежуточными нейтронами. Из-за трудностей регистрации промежуточных нейтронов определять \dot{N} нейтронов в железе экспериментально сложно.

Бетон. В бетоне полная мощность эквивалентной дозы нейтронов определяется тепловыми, промежуточными и быстрыми нейтронами. Причем, как и для большинства защитных сред, вклад в полную мощность эквивалентной дозы для быстрых и промежуточных нейтронов существенно зависит от выбора граничной энергии между этими группами, и если при $E_{Гр} = 0,5$ МэВ \dot{N} быстрых нейтронов примерно в 1,6 раза превышает \dot{N} промежуточных для источника нейтронов деления, то при $E_{Гр} = 1,5$ МэВ промежуточные нейтроны дают при-

мерно в 4,5 раза больший вклад в полную мощность эквивалентной дозы по сравнению с быстрыми нейтронами.

Универсальной для решения большого круга задач для источников с различным энергетическим распределением является информация о дозовом составе излучения для моноэнергетических источников. По дозовым распределениям нейтронов в данном материале для широкого набора моноэнергетических источников данной геометрии и угло-

вого распределения излучений с энергией E_0 можно определить дозовое распределение нейтронов в этом материале для источников нейтронов с произвольным энергетическим распределением. Так, исходя из дозовых распределений нейтронов для точечных изотропных моноэнергетических источников в воде можно рассчитать дозовые характеристики для (α, n) -источников нейтронов по эквивалентной дозе.

Анализ дозовых распределений показывает, что:

1. при расчетах защиты от нейтронного излучения необходимо учитывать возможный вклад в дозу нейтронов всех энергетических групп, причем в разных средах разные энергетические группы нейтронов определяют полную мощность дозы;

2. изменение граничной энергии $E_{гр}$ промежуточной и быстрой групп может существенно повлиять на распределение нейтронов по этим группам;

3. расчетные данные могут отличаться от результатов реальных исследований за защитой ядерно-технических установок. Это объясняется обычно увеличением в эксперименте вклада низкоэнергетических нейтронов за счет отражения от окружающих рассеивателей, таких, как, например, стены и пол реакторного зала.

8.6. КОЭФФИЦИЕНТЫ НАКОПЛЕНИЯ ПОДПороГОВЫХ НЕЙТРОНОВ

Мощность эквивалентной дозы быстрых нейтронов $\dot{H}_b(d, E_{пор})$, с энергией, большей $E_{пор}$ за защитой толщиной d часто может быть рассчитана с помощью метода длин релаксации (см. п. 8.3) или сечения выведения (см. п. 8.4). Вклад в мощность дозы ней-

тропов других энергетических групп с энергией $E < E_{пор}$ можно определить, применяя *дозовый коэффициент накопления подпороговых нейтронов*. В этом параграфе дозовые коэффициенты рассчитаны по эквивалентной дозе.

Дозовый коэффициент накопления подпороговых нейтронов на глубине защиты d определяется из соотношения

$$\begin{aligned} \dot{H}_{\bar{6}}(d, E_{пор}) &= \frac{\dot{H}_{\bar{6}}(d, E_{пор}) + \dot{H}_{Т.М.П.}(d, E_{пор})}{\dot{H}_{\bar{6}}(d, E_{пор})} = \\ &= 1 + \frac{\dot{H}_{Т.М.П.}(d, E_{пор})}{\dot{H}_{\bar{6}}(d, E_{пор})}, \end{aligned} \quad (8.36)$$

где $\dot{H}_{\bar{6}}(d, E_{пор})$ - мощность эквивалентной дозы быстрых нейтронов с энергией выше $E_{пор}$; $\dot{H}_{Т.М.П.}(d, E_{пор})$ - суммарная мощность эквивалентной дозы тепловых, медленных и промежуточных нейтронов (подпороговых нейтронов) с энергией $E < E_{пор}$.

Таким образом, дозовый коэффициент накопления подпороговых нейтронов представляет собой отношение показания детектора, регистрирующего \dot{H} нейтронов всех энергий, к показанию детектора, регистрирующего только \dot{H} от быстрых нейтронов с энергией $E < E_{пор}$.

Аналогично можно ввести понятие коэффициента накопления для числа или энергии подпороговых нейтронов.

В области установившегося энергетического распределения нейтронов в среде коэффициент $k_D(d, E_{пор})$ постоянен.

Если коэффициент $k_D(d, E_{нор})$ известен, то $\dot{H}(d)$ нейтронов всех энергий по известной мощности эквивалентной дозы быстрых нейтронов $\dot{H}_\sigma(d, E_{нор})$ может быть легко определена по формуле

$$\dot{H}(d) = \dot{H}_\sigma(d, E_{нор}) k_D(d, E_{нор}) \quad (8.37)$$

Подобно формуле (8.36) можно ввести понятие дозового коэффициента накопления промежуточных нейтронов

$$k_D^{\Pi} = 1 + \frac{\dot{H}_{\Pi}(d)}{\dot{H}_\sigma(d)} \quad (8.38)$$

и дозового коэффициента накопления тепловых нейтронов

$$k_D^T = 1 + \frac{\dot{H}_T(d)}{\dot{H}_\sigma(d)} \quad (8.39)$$

В общем случае $k_D(d, E_{нор})$ зависит от характеристик источника, материала, компоновки защиты и других условий задачи. В частности,

$k_D(d, E_{нор})$ зависит от удаления точки детектирования от поверхности защиты [если источник и (или) защита не бесконечны в поперечном направлении].

Коэффициенты $k_D(d, E_{нор})$, k_D^{Π} и k_D^T могут быть определены экспериментально или рассчитаны, например, исходя из данных о дозовом распределении нейтронного излучения в средах (см. п. 8.5).

Для оценок коэффициентов накопления подпороговых нейтронов полезны также приводимые ниже рекомендации.

Водородсодержащие среды. Наиболее проникающая группа нейтронов для таких сред - быстрые нейтроны. На расстоянии от источника, большем примерно двух длин релаксации нейтронов источника, в таких средах устанавливается равновесный спектр нейтронов,

слабо изменяющийся с дальнейшим увеличением толщины защиты.

Поэтому и коэффициент $k_D(d, E_{\text{нор}})$ сохраняется с ростом d на указанных толщинах среды практически постоянным. Для источника нейтронов деления при $E_{\text{нор}} = 2$ МэВ $k_D(d, E_{\text{нор}}) \approx 2$, т. е. примерно половина полной мощности дозы нейтронов приходится на быстрые нейтроны.

Материалы, не содержащие водород. Для этой группы сред не устанавливается равновесный спектр. Наиболее проникающими для таких сред являются обычно нейтроны с энергиями, меньшими 0,5-1

МэВ. В тяжелых средах (Pb, Fe, Ti, W, Mo) $k_D(d, E_{\text{нор}})$ постоянно возрастает с увеличением d . Для объяснения причины этого роста запишем закон изменения мощности эквивалентной дозы быстрых $\dot{H}_6(d)$ и низкоэнергетических $\dot{H}_{Т.М.П}(d)$ нейтронов в виде

$$\dot{H}_6(d) = \dot{H}_6(0) \exp(-d / L_6); \quad (8.40)$$

$$\dot{H}_{Т.М.П}(d) = \dot{H}_{Т.М.П}(0) \exp(-d / L_{Т.М.П}), \quad (8.41)$$

где $\dot{H}_6(0)$ и $\dot{H}_{Т.М.П}(0)$ - мощность эквивалентной дозы соответствующих групп нейтронов на входе в защиту; L_6 и $L_{Т.М.П}$ - длина релаксации по мощности эквивалентной дозы быстрых и тепловых, медленных и промежуточных нейтронов соответственно.

Подставив (8.40) и (8.41) в (8.36), получим

$$k_D(d, E_{\text{нор}}) = 1 + \frac{\dot{H}_{Т.М.П}(0) \exp(-d / L_{Т.М.П})}{\dot{H}_6(0) \exp(-d / L_6)} = 1 + [k_D(0, E_{\text{нор}}) - 1] \exp(-bd), \quad (8.42)$$

где $b = (1/L_6) - (1/L_{Т.М.П})$. Так как для тяжелых сред $L_{Т.М.П} > L_6$, то значение $k_D(d, E_{нор})$ повышается с ростом d .

Металловодородсодержащие защиты. В однородных металловодородсодержащих защитах в области установившегося спектра при объемных долях металлов $C_T \leq 0,8$

$$k_D(d, E_{нор} = 2 \text{ МэВ}) = k_{ДН}(d, E_{нор} = 2 \text{ МэВ})(1 - C_T)^{-\alpha}, \quad (8.43)$$

где $k_{ДН}(d, E_{нор} = 2 \text{ МэВ})$ - дозовый коэффициент накопления подпороговых нейтронов в водородсодержащем компоненте (вода, полиэтилен); константа α равна 1,0 для смесей воды или полиэтилена с железом или 0,53 для смесей воды или полиэтилена со свинцом.

Многослойная защита. Защита реальных ядерно-технических установок обычно бывает гетерогенной. Для двухслойной защиты из тяжелого (вблизи источника) и легкого материала эффект накопления замедляющихся нейтронов в первом слое полностью компенсируется вторым, когда толщина легкого материала составляет примерно четыре-пять длин релаксации быстрых нейтронов. При такой толщине вто-

рого слоя $k_D(d, E_{нор})$ принимает значение, характерное для бесконечной среды из материала второго слоя, и с увеличением толщины этого слоя остается практически постоянным. В первом слое накопление низкоэнергетических нейтронов происходит в соответствии с со-

отношением (8.42). Таким образом, $k_D(d, E_{нор})$ для двухслойной композиции зависит от спектра нейтронов, падающих на слой из тяже-

лого материала, или от $k_D(d=0, E_{nop})$ и ядерно-физических свойств тяжелого и легкого материалов.

Экспериментальные исследования с многослойными композициями показали, что изложенный метод расчета $k_D(d, E_{nop})$ для двухслойных сред можно распространить на защиту с любым количеством слоев, если при этом $k_D(d, E_{nop})$ для конца первой двух-

слойной композиции становится начальным $k_D(0, E_{nop})$ для второй пары слоев, и т. д. При наличии «непарных» слоев k_D вычисляется для каждого из них отдельно. В этом случае для многослойной защиты из m слоев формула (8.37) принимает вид

$$\begin{aligned} \dot{H}(d_1, d_2, \dots, d_m) &= \dot{H}_0(d_1, d_2, \dots, d_m; E_{nop}) \times \\ &\times k_D(d_1, d_2, \dots, d_m; E_{nop}) = \dot{H}_0(0; E_{nop}) \times \\ &\times \exp\left(-\sum_{i=1}^m \Sigma_i d_i\right) k_D(d_1, d_2, \dots, d_m; E_{nop}) \end{aligned} \quad (8.44)$$

где Σ_i - сечение выведения или величина, обратная длине релаксации, для нейтронов с энергией, большей E_{nop} , в материале i -го слоя.

Так, по известной пространственной зависимости мощности эквивалентной дозы быстрых нейтронов и коэффициента $k_D(d, E_{nop})$ можно рассчитать пространственное распределение полной мощности эквивалентной дозы нейтронов.

8.7. ВТОРИЧНОЕ γ - ИЗЛУЧЕНИЕ В ЗАЩИТЕ

Высокие потоки нейтронов в защитах ядерно-технических установок создают высокую плотность источников вторичного γ - излучения, основными компонентами которого являются фотоны, сопровождающие радиационный захват и неупругое рассеяние нейтронов на ядрах изотопов конструкционных материалов и материалов биологической защиты.

Как правило, тяжелая компонента защиты в ядерном реакторе располагается вблизи активной зоны. Близкое расположение металлических экранов к активной зоне, где имеют место высокие потоки нейтронов, приводит к генерации интенсивного вторичного γ - излучения, которое является обычно определяющим в формировании дозы фотонного излучения на внешней поверхности защиты. В некоторых случаях радиационная обстановка за защитой реактора целиком определяется вторичным γ - излучением. Знание его характеристик позволяет выбрать композицию защиты оптимальной в отношении наилучшей радиационной обстановки и минимального радиационного тепловыделения. Все это обуславливает обязательность учета вторичного γ - излучения в защите ядерно-технических установок.

Рассмотрим в общем виде физический подход к определению поля вторичного захватного γ - излучения от источников тепловых нейтронов. Пусть внутри некоторой однородной среды объемом V создано поле тепловых нейтронов, плотность потока которых в этом объеме задана функцией $\varphi_{Т.Н.}(\vec{r}')$. Тогда в элементарном объеме dv вблизи точки пространства \vec{r}' объема V будет происходить $\Sigma_{\gamma} \varphi_{Т.Н.}(\vec{r}') dv$ захватов тепловых нейтронов в единицу времени и образовываться $\eta \Sigma_{\gamma} \varphi_{Т.Н.}(\vec{r}') dv$ захватных фотонов, где Σ_{γ} - сечение захвата тепловых нейтронов средой; η - число генерируемых вторичных фотонов на один захват. Если предположить, что спектр вторичного γ - излучения моноэнергетический (что имеет место, например, при захвате тепловых нейтронов ядрами водорода) с энергией

фотонов E_0 , то в элементе объема dv вблизи точки \vec{r}' в единицу времени будет образовываться источник вторичного γ -излучения, испускающий изотропно энергию $\eta \Sigma_{\gamma} \varphi_{Т.Н.}(\vec{r}') dv E_0$. Пользуясь теперь законом ослабления γ -излучения точечного изотропного источника в среде, можно определить плотность потока энергии вторичного γ -излучения в любой точке \vec{r} среды объемом V :

$$I_{\gamma}(\vec{r}) = C \int_V \frac{\eta \Sigma_{\gamma} \varphi_{Т.Н.}(\vec{r}') E_0}{4\pi |\vec{r} - \vec{r}'|^2} \times \exp\left[-(\mu |\vec{r} - \vec{r}'|)\right] B_{\gamma}(E_0, \mu |\vec{r} - \vec{r}'|, Z) dv, \quad (8.51)$$

где μ - коэффициент ослабления фотонов с энергией E_0 в материале среды; $|\vec{r} - \vec{r}'|$ - расстояние между координатой \vec{r}' элемента объема dv и точкой \vec{r} , в которой определяется плотность потока энергии вторичного γ -излучения; $B_{\gamma}(E_0, \mu |\vec{r} - \vec{r}'|, Z)$ - энергетический фактор накопления точечного изотропного источника фотонов с энергией E_0 для расстояния между источником и детектором $\mu |\vec{r} - \vec{r}'|$ длин свободного пробега в материале с порядковым номером Z ; C - константа.

При расчете защиты реальных ядерно-технических установок для расчетов вторичного γ -излучения используют обычно численные методы решения уравнения переноса излучений (метод сферических гармоник, методы дискретных координат, методы полиномиальных разложений); метод Монте-Карло; асимптотические и полуэмпирические методы (локальные оценки, методы уменьшения дисперсии и т. д.). Большая информация для одномерных плоских защит по распро-

странению вторичного излучения получена методом дискретных ординат с использованием программ РОЗ.

Рассмотрим некоторые физические закономерности формирования полей вторичного γ - излучения в средах.

Расчетные и экспериментальные исследования показали, что закономерности распространения вторичного γ - излучения в легких и тяжелых материалах защиты имеют различный характер.

В легких средах, которые сильно ослабляют нейтроны, вторичное излучение образуется в первых слоях защиты, при этом наблюдается ярко выраженная зависимость отношения мощности эквивалентной дозы вторичного γ - излучения к мощности эквивалентной дозы

нейтронов $\dot{H}_\gamma / \dot{H}_n$ от глубины расположения детектора x . Значения $\dot{H}_\gamma / \dot{H}_n$ растут с увеличением толщины слоя и, проходя при некоторой толщине d_0 через единицу, с дальнейшим ростом толщины

становятся больше единицы. Величина d_0 в общем случае зависит от вида исследуемого функционала поля излучения, материала защиты, спектра нейтронов на входе в среду и других характеристик эксперимента. Так, для нейтронов спектра деления при измерении дозовых характеристик $d_0 = 36$ см для воды, 50 см для водорода, 67 см для LiH , 54 см для борированной воды (1 % B по массе).

В отличие от легких веществ, для которых характерно интенсивное ослабление потоков нейтронов, относительно быстрое формирование не зависящего от расстояния до источника квазиравновесного спектра нейтронов и незначительное ослабления γ - излучения, в тяжелых веществах обычно равновесный спектр нейтронов не устанавливается, не наблюдается сильного ослабления потока нейтронов, а γ - излучение интенсивно ослабляется веществом. В результате характеристики поля захватного γ - излучения, отнесенные к соответствующим характеристикам поля нейтронов, в средах со средним и большим атомными номерами не сильно изменяются с толщиной защиты.

В легких материалах форма пространственного распределения интегральных характеристик вторичного γ - излучения после сравнительно небольшой толщины среды практически не зависит от энергии падающих нейтронов. В материалах со средним атомным номером (например, железо), в которых происходит значительное накопление промежуточных нейтронов и хорошее ослабление фотонов, пространственное распределение вторичного γ - излучения существенно зависит от энергии падающих нейтронов.

Ряд специалистов [8.2] показали, что характеристики захватного γ - излучения на выходе из слоя тяжелой защиты, определяемые как отношение функционалов поля, обусловленных захватным γ - излучением, к функционалам поля, обусловленным нейтронами, при толщине более 20 г/см^2 практически не зависят от углового распределения нейтронов на входе в защиту для широкого класса азимутально-симметричных угловых распределений излучения источников нейтронов.

Энергетическое распределение вторичного γ - излучения в средах определяется характером распространения нейтронов в защите, энергетическим спектром вторичных фотонов, возникающих при элементарном акте взаимодействия нейтронов с ядром, соотношением процессов радиационного захвата и неупругого рассеяния нейтронов, распространением вторичного γ - излучения в материале защиты.

В легких средах, начиная с толщин защиты в две - три длины свободного пробега наиболее высокоэнергетических вторичных фотонов, энергетический спектр вторичного излучения находится в квазиравновесном состоянии. В материалах, подобных свинцу и железу, спектр нейтронов не устанавливается, а спектр вторичных фотонов из-за сильного ослабления определяется γ - излучением, образовавшимся в окрестностях точки, в которой изучается спектр вторичного γ - излучения, и по своему виду близок к спектру фотонов, сопровождающих неупругое рассеяние и радиационный захват нейтронов ядрами изотопов вещества.

Материалы, имеющие в своем составе тяжелый компонент и водород, например бетоны, гидриды металлов, по свойствам ослабления

нейтронов близки к легким материалам, а по ослаблению γ - излучения - к тяжелым средам. Поэтому спектральный состав вторичного γ - излучения близок к энергетическому распределению вторичного излучения в тяжелых компонентах среды, т. е. поле γ - излучения в значительной степени определяется источниками γ - излучения из ближайшей окрестности точки детектирования.

Угловое распределение плотности потока вторичного γ - излучения за защитой из легких веществ анизотропно и пропорционально $\cos^n \theta$, где $1 \leq n \leq 3$ в зависимости от энергии нейтронов и толщины защиты. За защитой из тяжелых материалов угловое распределение плотности потока вторичного γ - излучения слабо-анизотропно (близко к изотропному, по крайней мере для углов $\theta < 60^\circ$).

Наклонное падение нейтронов на защиту приводит к смещению максимума пространственного распределения внутренних источников вторичного γ - излучения к плоскости барьера, обращенной к источнику нейтронов.

γ - Излучение, сопровождающее неупругое рассеяние нейтронов на ядрах, обычно вносит значительный вклад в характеристики поля вторичного излучения, когда на входе в среду имеется высокоэнергетический спектр нейтронов. Однако для веществ, имеющих небольшие сечения радиационного захвата нейтронов во всем диапазоне энергий нейтронов (например, свинец), поля вторичного γ - излучения, обусловленные неупругим рассеянием нейтронов, могут быть сравнимы с полями захватного γ - излучения, образовавшегося в таких веществах.

Погрешность результатов расчетов характеристик вторичного γ - излучения зависит от корректности выбора констант, в частности, от задания спектра γ -излучения, генерируемого при радиационном захвате, в зависимости от энергии нейтронов. А. А. Абагян и др. [8.5] на примере защитной пластины из вольфрама показали, к каким изменениям в потоках захватного γ - излучения приводит учет корректной зависимости спектра захватного γ - излучения, испускаемого в акте

радиационного захвата нейтронов, от энергии поглощаемых нейтронов. Характеристики поля захватного γ - излучения при учете такой зависимости могут изменяться до 30-40% по сравнению со случаем неучета зависимости и применения для всех групп нейтронов спектра фотонов, сопровождающих радиационный захват тепловых нейтронов.

Существенные погрешности расчетов могут быть обусловлены неучетом вклада в поле вторичных фотонов захватного γ - излучения различных изотопов примесей с большим сечением захвата для материалов, имеющих, подобно свинцу, небольшие сечения радиационного захвата.

Анализ интегральных и дифференциальных характеристик вторичного γ - излучения подтверждает вывод, что среды, состоящие из смеси легких и тяжелых веществ, являются наилучшими защитными материалами по минимуму выхода первичного и вторичного излучения.

Из веществ, не содержащих водород, наилучшими материалами в отношении минимального выхода вторичного γ - излучения являются тяжелые элементы свинец и висмут.

Для инженерных оценочных расчетов характеристик поля вторичного γ - излучения в средах можно использовать формулы, выведенные на основе концепции квазиисточника вторичного γ - излучения, вид которого в каждом случае определяется физическими закономерностями распространения нейтронов и фотонов в защитных средах и прежде всего соотношением длин свободного пробега нейтронов и вторичных фотонов.

Могут быть использованы следующие формы задания квазиисточника вторичного γ - излучения в защите:

1. плоским изотропным квазиисточником, когда длина свободного пробега нейтронов значительно меньше длины свободного пробега вторичных фотонов; при этом квазиисточник расположен близко к границе, на которую падает поток нейтронов;

2. объемным квазиисточником с равномерным распределением мощности в материалах, сильно ослабляющих γ - излучение и слабо нейтроны, когда пространственное распределение внутренних источников захватного γ - излучения в защитах из этих материалов при

данной толщине среды можно считать слабоизменяющимся с изменением глубины;

3. квазиисточником с экспоненциальным распределением мощности для сред, в которых γ - излучение сильно ослабляется, а пространственное распределение внутренних источников нейтронов имеет ярко выраженный экспоненциальный характер.

В первом случае поле вторичного γ -излучения за защитой можно описать, используя формулы п. 8.4; во втором - можно использовать гамма-метод; в третьем - расчет можно выполнять с использованием экспоненциального источника γ - излучения.

В рассмотренных случаях спектр γ - излучения квазиисточника соответствует энергетическому распределению образовавшегося вторичного излучения.

Для снижения выхода захватного γ - излучения в средах используют различные приемы. Их физическая сущность сводится к следующему. В ядерно-технических установках, таких, как ядерные реакторы, мощность источников захватного высокоэнергетического γ - излучения в тяжелых слоях с высоким сечением захвата определяется захватом низкоэнергетических нейтронов, замедленных в самом тяжелом слое и возвращающихся в слой после замедления в материалах окружающей среды (водородсодержащие среды или другие замедлители). Поэтому желательно свести к минимуму не только образование в тяжелом слое вторичного γ - излучения, но и попадание в слой тяжелого материала нейтронов, замедленных в окружающей среде. Для этого вводят гомогенно или гетерогенно (в виде прослоек) в среду или в виде прослоек между тяжелой средой и водородсодержащей средой материалы с большим сечением поглощения нейтронов, не приводящие к возникновению высокоэнергетического захватного γ - излучения. Наилучшее из таких веществ - бор. Сечение захвата тепловых нейтронов ^{10}B , которого в естественной смеси содержится 8,8%, равно $3,39 \cdot 10^{-21}$ см², а естественным бором $7,5 \cdot 10^{-22}$. В реакции $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ на медленных нейтронах возбужденное ядро ^7Li

распадается, давая γ - излучение с энергией 0,478 МэВ с выходом 94 фотона на 100 захватов. Бор часто вводят в виде борсодержащих веществ, например карбида бора.

При гетерогенном расположении слоя борсодержащего вещества между тяжелым слоем, например сталью, и водородсодержащей средой, например водой, для достижения эффекта необходимо содержание $2 \cdot 10^{22}$ ядер бора (в пропорциях естественной смеси изотопов) на 1 см^2 площади блокирующего слоя. Отсюда следует вывод о нецелесообразности использования толстых слоев борсодержащих веществ. Например, нецелесообразно использовать слой карбида бора ($\rho = 1,1 \text{ г/см}^3$) толщиной более 1 см.

Борирование тяжелого компонента защиты или замедлителя сводится к гомогенному введению бора в среду. Этот метод очень эффективен не только для подавления захватного γ - излучения образующихся в слоях тяжелых материалов, но и для уменьшения выхода проникающих захватных γ - квантов из самого замедлителя. Однако следует иметь в виду, что при использовании борированной тяжелой среды, например бористой стали, с увеличением толщины слоя возрастает и может стать определяющим поток захватного γ - излучения в материале самой тяжелой среды. Борирование среды более эффективно для низкоэнергетических нейтронов. Чем жестче спектр нейтронов источника, тем менее эффективно борирование.

Иногда для снижения выхода захватного γ - излучения используют расположение свинца между слоем стали и воды (блокировка стали свинцом). Такой путь снижения выхода вторичного γ - излучения представляется иногда целесообразным по следующим причинам: а) свинец имеет малое сечение радиационного захвата и поэтому излучает высокоэнергетических вторичных фотонов гораздо меньше, чем сталь; б) свинец имеет некоторое диффузионное сопротивление по отношению к низкоэнергетическим нейтронам, падающим на стальной экран из воды, и, значит, снижает их поток в стальном слое; в) свинец эффективно поглощает образуемые вторичные фотоны. Целесообразно использование свинцовых слоев толщиной примерно до 6 см.

Вторичное γ - излучение может вносить существенный вклад в поле излучения и тем самым в значительной степени определять композицию защиты. В качестве иллюстрации его роли в задачах проектирования защиты приведем результаты расчетного поиска оптимальных по композиции железобетонных сред, реализующих минимум дозы нейтронного и γ - излучения при заданной полной толщине защиты $d = 125$ и 250 см (табл. 8.3).

Слои железа и воды в задаче были разделены прослойками бора для эффективного поглощения натекающих в слой железа из воды тепловых и надтепловых нейтронов. Рассматривались девятизонные композиции с периодическим чередованием слоев железа, бора и воды. Нейтроны источника на внутренней поверхности защиты были распределены по спектру деления с изотропным угловым распределением излучения.

Поиск минимума полной дозы на внешней поверхности защиты для плоской одномерной геометрии осуществлялся при помощи одной из модификаций метода оврагов, решения прямых и сопряженных уравнений переноса излучений проводились по программе РОЗ-V.

Вторичное γ - излучение для исходных композиций защиты вносит определяющий вклад в полную дозу излучений, в оптимальных композициях вклад вторичного γ - излучения в полную дозу существенно уменьшен (табл. 8.4). При этом уменьшение полной дозы излучений осуществлялось в основном за счет уменьшения вторичного γ - излучения.

Структура слоев защиты, как в первом, так и во втором вариантах существенно изменилась. При этом в первую очередь были ликвидированы первые слои железа и существенно увеличены ближайшие к источнику слои воды (табл. 8.3). Таким образом, железо-мощный источник захватного γ - излучения - было перемещено из области высоких потоков нейтронов в более удаленные от источников нейтронов участки защиты.

Таблица 8.3

Толщина слоя, см, исходной и оптимальной композиций

d , см	Композиция	Материал слоя								
		Fe	B	H_2O	B	Fe	B	H_2O	B	Fe
125	Исходная	12,4	0,05	43,4	0,05	12,4	0,05	44,4	0,05	12,4
	Оптимальная	-	-	74,8	0,03	30,5	0,11	17,5	0,35	1,7
250	Исходная	30,2	0,55	77,2	0,01	50,2	0,20	61,2	0,05	30,2
	Оптимальная	-	0,13	140,0	-	55,3	8,66	23,5	-	22,9

Таблица 8.4

Доза нейтронного D_n вторичного γ - излучения D_γ и полная доза D на выходе из защиты для исходной и оптимальной композиций

d , см	Исходная композиция		
	D_n	D_γ	D
125	0,643	6,118	6,761
250	$0,631 \cdot 10^{-8}$	$0,567 \cdot 10^{-5}$	$0,568 \cdot 10^{-5}$
d , см	Оптимальная композиция		
	D_n	D_γ	D
125	0,285	0,111	0,396
250	$0,270 \cdot 10^{-8}$	$0,243 \cdot 10^{-8}$	$0,513 \cdot 10^{-8}$

ГЛАВА 9. ЗАЩИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

9.1. КРИТЕРИИ ВЫБОРА ЗАЩИТНОГО МАТЕРИАЛА

Большое значение при проектировании оптимальной по массе, габаритам и стоимости защиты от излучений ядерно-технических установок, таких, как ядерные реакторы, отводится технически и экономически обоснованному выбору материалов защиты. Сразу заметим, что невысокая стоимость материала защиты не означает низкой ее стоимости в целом. Обладая плохими защитными свойствами, она может оказаться громоздкой, иметь большие габариты, потребовать увеличенных затрат под сооружение большего здания для установки, обусловить худшие эксплуатационные возможности ядерно-технической установки.

Ослабление излучения в защите зависит от вида излучения, всех характеристик источника, свойств материала, взаимного расположения источника, защиты, защищаемой области и т. д.

Проблема радиационной защиты ядерных установок, например ядерных реакторов, обычно сводится к ослаблению потоков нейтронов всех энергий и фотонов в веществе. Зависимость слоя половинного ослабления фотонов от порядкового номера вещества Z показывает, что наиболее эффективно ослабляют фотонное излучение материалы с большими Z . Тяжелые материалы также хорошо (на единицу толщины защиты) замедляют быстрые нейтроны с энергией выше порога неупругого рассеяния. Нейтроны с энергией ниже порога неупругого рассеяния эффективно замедляются ядрами легких элементов (особенно водородсодержащими средами), которые, однако, являются плохой защитой от фотонного излучения.

Захват тепловых нейтронов ядрами большинства элементов сопровождается образованием высокоэнергетических фотонов, что вызывает дополнительные трудности в создании защиты. Выбирая или добавляя материалы с небольшим сечением захвата нейтронов с образованием фотонов не очень высокой энергии, можно значительно уменьшить вклад в поле этой компоненты излучения.

Из сказанного ясно, что для создания реальных защит установок с источниками нейтронного и фотонного излучений следует рекомендовать материалы, в состав которых входят легкие и тяжелые элементы. Этим требованиям удовлетворяют, например, бетоны, гетерогенные смеси легких и тяжелых материалов с добавками веществ, хорошо поглощающих низкоэнергетические нейтроны при малом выходе высокоэнергетического захватного γ -излучения.

Приведенное краткое рассмотрение закономерностей распространения фотонов и нейтронов в средах показывает, как сложно выбрать оптимальный материал для защиты. Тем важнее сформулировать требования, предъявляемые к материалам защиты от излучений. Ниже эти требования сформулированы применительно, прежде всего, к защите наиболее широко используемых ядерно-технических установок - ядерных реакторов.

Защитные материалы должны обеспечивать:

1. максимально возможную плотность; это свойство обеспечивает максимальное ослабление первичного и вторичного γ -излучения и замедление быстрых нейтронов;

2. постоянную плотность и гомогенность всей защиты или ее значительной части;

3. достаточно высокое содержание водорода (обычно в виде химически связанной воды) в защите для эффективного замедления промежуточных и низкоэнергетических нейтронов; это требование должно выполняться и при высоком температурном режиме эксплуатации;

4. минимальное образование и минимальную энергию вторичных излучений; в частности, минимальный выход вторичного γ -излучения с минимальной энергией возникающих при захвате фотонов;

5. низкую наведенную радиоактивность в защите, т. е. обеспечивать минимальное накопление долгоживущих радионуклидов в материале защиты при воздействии излучений; это требование особенно важно для доступа к остановленной установке при ремонтных и профилактических работах;

6. высокую радиационную и термическую стойкость; низкая радиационная стойкость некоторых дешевых защитных материалов при-

водит к необходимости разделения защиты на две части: внутреннюю тепловую защиту вблизи источника излучения, как правило, из дорогостоящих материалов и наружную защиту из более дешевых материалов;

7. механическую прочность материала, прежде всего на сжатие, так как защита от излучений в большинстве случаев является одновременно несущей конструкцией для самого реактора и для элементов здания (перекрытий, примыкающих к защите стен реакторного зала и др.); как правило, прочность материала на сжатие должна быть такой, чтобы материал выдерживал собственную массу при высоте защиты примерно 5 м;

8. относительно низкий модуль упругости, способствующий уменьшению напряжения на растяжение в результате нагрева внутренних слоев защиты;

9. максимально возможную теплопроводность для уменьшения температурного градиента по толщине защиты;

10. минимальное тепловое расширение, обеспечивающее монолитность конструкции и сокращающее напряжения;

11. минимальную теплоту гидратации при затвердевании бетонов;

12. минимальную усадку при монтаже и эксплуатации защиты; повышенная усадка может привести к смещению различных технологических каналов и кабелей, к образованию пустот и полостей, ухудшающих защитные свойства;

13. жаростойкость и огнестойкость. Особые требования по жаростойкости предъявляются к материалам, располагаемым вблизи активной зоны реактора. Эти материалы защиты не должны расплавляться даже при температуре, возникающей при аварийных режимах работы реактора. Особенно это важно для реакторов на быстрых нейтронах, имеющих более высокие температурные параметры по сравнению с реакторами на тепловых нейтронах;

14. водонепроницаемость;

15. газонепроницаемость;

16. безопасность за счет газовыделения из защитного материала при его нагревании во время работы реактора;

17. химическую инертность; для реакторов на быстрых нейтронах особо следует отметить химическую инертность по отношению к теплоносителю, в качестве которого часто используется натрий;
18. коррозионную стойкость;
19. технологичность, т. е. простоту монтажа и демонтажа (при ремонте) защиты;
20. невысокую стоимость, экономичность.

Первые пять требований относятся в основном к защитным характеристикам материалов. Кратко эти требования можно сформулировать так: материал защиты должен быть хорошим замедлителем быстрых нейтронов, хорошо поглощать тепловые нейтроны (при этом захват их не должен приводить к образованию интенсивных потоков высокоэнергетического γ - излучения), хорошо поглощать фотоны.

Требования, сформулированные под номерами 6-19, относятся к технологическим параметрам защитных материалов.

Приведенный перечень не исчерпывает всех возможных требований, предъявляемых к материалам защиты. Многие из них в значительной степени противоречивы. Например, высокая термостойкость часто несовместима с высоким содержанием в материале водорода, использование материала с высокой плотностью не соответствует требованию его низкой стоимости или высокого содержания в нем водорода и т. д. В природе нельзя найти материала, удовлетворяющего всем сформулированным требованиям. Это обуславливает необходимость создания искусственных защитных материалов, таких, как различные бетоны или гетерогенные среды.

Все технико-экономические преимущества и недостатки защитных материалов должны быть тщательно проанализированы, учтены условия работы ядерно-технической установки, и лишь после этого материал может быть рекомендован для использования. Важную роль при этом выборе играют функциональное назначение и предполагаемые условия использования установки. В этом отношении можно выделить две группы ядерно-технических установок: стационарные и транспортные. Такое разделение установок обуславливает рассмотрение защитных материалов в следующих двух параграфах.

Таблица 9.1 Физико-химические и защитные свойства некоторых материалов

Материал	Химическая формула	Плотность, т/м ³	Древняя плотность в 10 ⁴ см ³	Температура плавления, °С	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К	Коэффициент теплового расширения, 10 ⁻⁶ град ⁻¹	41/2, см	
							для нейтронов деления при E > 1,5 МэВ ¹	для фотонов с энергией > 3 МэВ
Вода *1	H ₂ O	1	6,66	0	0,565	207	7,14 (100—150)	17,4
Полиэтилен	C _n H _{2n}	0,92	7,92	110—120	0,25—0,34	160—180	5,89 (100)	19,0
Железо	Fe	7,86	—	1340	12—21	14—20**	5,27 (30—40)	2,44
Свинец	Pb	11,34	—	327,4	35	29,1	9,56 (30—50)	1,40
Вольфрам	W	19,3	—	3410	170—190	4,4—5,0	2,42 (2—5)	0,90
Уран	U	18,7	—	857	250—420	8—10	—	0,85
Графит *6	C	1,5—1,7	—	3546	42—120	3,5—8	—	11,7
Карбид бора	B ₄ C	2,54	—	2450	—	4,5	3,90 (<25)	8,39
Бетон серпентинитовый	Серпентинит*7	2,3	—	Высокая	0,536	10	8,32 (100)	8,28
Гидрид лития *9	LiH	2,3	1,25	450*8	~0,9	6	7,55 (100)	8,28
Гидрид титана *10	TiH ₂	0,82	5,9	683,5	—	—	5,60 (50)	25,3
Гидрид кальция *12	CaH ₂	3,9	8,6	400*11	—	—	4,52 (50—100)	5,50
Гидрид магния *13	MgH ₂	1,7	4,9	600*11	—	—	8,52 (50—100)	10,3
Гидрид циркония *10	ZrH ₂	1,4	6,4	280*11	—	—	7,21 (50—100)	12,9
		5,6	6,1	430*11	—	—	4,43 (50—100)	3,48
								25-0
								27,2
								2,89
								1,40
								0,86
								0,82
								16,8
								10,1
								11,2
								35,2
								6,54
								13,1
								17,8
								3,70

*1 Для получения коэффициента теплопроводности во инкретных единицах (с.см град.) надо приводимые в этом столбце значения разделить на 418,68.

*2 В скобках указана толщина защиты (см), которой соответствуют значения слоя подвального ослабления.

*3 Рассчитаны для геометрии узкого пучка.

*4 Подвержена радиолизу, особенно при наличии примесей в воде.

*5 Для нержавеющей стали.

*6 Значение $\lambda_{1/2}$ приводится для $\rho = 1,67$ г/см³.

*7 Серпентинит в основном состоит из минерала серпентина 3MgO·2SiO₂·2H₂O и примесей Al₂O₃, FeO, Fe₂O₃.

*8 Температура, при которой полностью сохраняется вода, содержащаяся в серпентините.

*9 Разагается на влажном воздухе, горит в воде.

*10 Устойчив в воде, но крайние меры до температуры 100 °С. Не выделяет водорода при нагревании до 200—300 °С (при $\lambda = 1,5 \div 1,7$).

*11 Температура разложения.

*12 Разагается на воздухе, бурно реагирует с водой.

*13 Сильно взаимодействует с водой.

Наибольшее разнообразие защитных материалов используется при проектировании защит ядерных реакторов различного назначения. Поэтому ниже рассмотрение материалов проведено в основном применительно к защите ядерных реакторов. Физико-химические и защитные свойства некоторых материалов приведены в табл. 9.1.

9.2. ЗАЩИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ СТАЦИОНАРНЫХ УСТАНОВОК

К установкам этой группы относят, прежде всего, ядерные реакторы различных типов, в том числе реакторы АЭС. Основное требование к защите этих установок - надежность эксплуатации и экономичность.

Однако было бы ошибочно предполагать, что требования, предъявляемые к материалам защиты всех стационарных установок, одинаковы. Проиллюстрируем это хотя бы на примере внутрикорпусной защиты реакторов на быстрых и тепловых нейтронах. Разные требования к материалам внутрикорпусной защиты вытекают из приведенных ниже различий реакторов этих типов.

Уровень плотности потока нейтронов в реакторе на быстрых нейтронах примерно на два порядка выше, и, следовательно, его защита должна обеспечивать примерно на два порядка большую кратность ослабления нейтронов, чем защита реактора на тепловых нейтронах той же мощности.

В реакторах на быстрых нейтронах на защиту падают более высокоэнергетические нейтроны, в основном в диапазоне энергий 10 кэВ - 1 МэВ.

Требование совместимости материала с окружающими условиями (температура и материал теплоносителя) накладывают в реакторах на быстрых нейтронах более жесткие ограничения на выбор защитного материала.

Разницы в проектировании внекорпусной защиты реакторов этих типов практически нет: почти все защиты реакторов на быстрых и тепловых нейтронах выполняются из бетона.

Анализ защиты реактором АЭС ВВЭР-1000, РБМК-1000, БН-350 показывает, что основными защитными материалами являются: вода, железо, нержавеющая сталь, свинец, графит, их смеси, бетоны различных типов и марок, чаще всего - обычный строительный бетон, некоторые природные материалы. В качестве добавок к материалам часто

используется бор. Наибольшее распространение для стационарных реакторов в качестве защитных материалов получили вода, бетон, железобетон.

Рассмотрим свойства этих материалов.

Вода - легкодоступный, дешевый материал, хорошо поддающийся очистке и обеспечивающий хороший отвод тепла. Для уменьшения при облучении диссоциации молекул воды (некоторые примеси воды способствуют этому процессу) и активации обычно используют дистиллированную или бидистиллированную воду.

Вследствие высокого содержания водорода (при $\rho = 1 \text{ г/см}^3$ ядерная плотность равна $6,66 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$) вода имеет отличные защитные свойства по отношению к нейтронам. Чем ниже энергия источника нейтронов, тем сильнее они ослабляются в воде. Так, длина диффузии тепловых нейтронов в воде 2,7 см, длина релаксации (по дозе быстрых нейтронов) источника с энергией 2 МэВ - 4,5 см, с энергией 14 МэВ - 14,2 см, нейтронов деления - 9-10 см. Поэтому определяющей группой распространения нейтронов спектра деления являются быстрые нейтроны. После толщины слоя воды в 2-3 длины свободного пробега устанавливается равновесный энергетический спектр, поэтому коэффициент накопления подпороговых нейтронов становится постоянным и равным примерно двум при граничной пороговой энергии 2 МэВ.

Из-за низкой электронной плотности вода слабо ослабляет фотонное излучение. Так, слой половинного ослабления в геометрии узкого пучка в воде для фотонов с энергией 1 МэВ составляет 9,8 см, с энергией 6 МэВ - 25 см, а для фотонов излучения реактора - 20,8 см. Поэтому при использовании водной защиты в полях смешанного нейтронного и фотонного излучений для эффективного ослабления фотонов необходима добавка тяжелых материалов.

Так как кислород практически не захватывает тепловые нейтроны, а сечение захвата тепловых нейтронов водородом сравнительно невелико и составляет $0,332 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$ с образованием фотонов с энергией 2,23 МэВ, воду можно отнести к благополучным материалам в отношении образования в них вторичного излучения. Для уменьшения образования вторичного γ -излучения в защиту из воды часто вводят небольшое количество растворимого соединения бора, например борную кислоту.

Конструкционно защиту из воды выполняют в виде баков-цистерн, изготовляемых из нержавеющей стали или алюминия. Особое внимание при этом уделяют их герметичности. Если объем защиты велик, целесообразно бак выполнять секционным.

При использовании воды в качестве теплоносителя следует помнить, что в результате поглощения быстрых нейтронов ядрами ^{16}O и ^{17}O по реакциям $^{16}\text{O}(n, p)^{16}\text{N}$ и $^{17}\text{O}(n, p)^{16}\text{N}$ образуются высокоэнергетическое γ -излучение и нейтроны. Активированная вода, попадая в периферийные слабозащищенные области, может стать опасным источником излучения.

Железо в виде стали ($\rho = 7,8 \text{ т/м}^3$) и чугуна ($\rho = 7,6 \text{ т/м}^3$) широко применяют как основной конструкционный и хороший защитный материал. Процессы неупругого рассеяния быстрых нейтронов обуславливают хорошее ослабление в железе (на единицу толщины) быстрых нейтронов. Так, для источника нейтронов деления длина релаксации нейтронов с энергией больше 3 МэВ составляет в железе 6,5 см, в воде 8-10 см. Малое сечение и малый сброс энергии в актах упругого рассеяния приводят к интенсивному накоплению промежуточных нейтронов, которые определяют поле излучения за защитой из железа. Нержавеющая сталь хорошо соответствует требованиям температурных режимов и натриевого окружения реакторов на быстрых нейтронах.

Железо достаточно хорошо ослабляет потоки фотонного излучения. Оно ослабляет их на единицу толщины защиты гораздо лучше, чем вода, бетон, графит, но хуже свинца, вольфрама, урана.

Большое сечение захвата тепловых нейтронов и значительное сечение неупругого рассеяния быстрых нейтронов приводят к образованию в железе мощных потоков вторичного γ -излучения. Применение бористой стали в первых слоях защиты позволяет часто выиграть в ее массе.

Изотоп железа $^{58}_{26}\text{Fe}$ хорошо активируется тепловыми нейтронами по реакции $^{58}_{26}\text{Fe}(n, \gamma)^{59}_{26}\text{Fe}$, образуя изотоп $^{59}_{26}\text{Fe}$ с периодом полураспада 45,1 сут., испускающий фотоны с энергией 1,29 и 1,10 МэВ. В этом смысле опасны также примеси марганца и кобальта в

стали. Наведенная радиоактивность железа может ограничить доступ к защите остановленного реактора.

Свинец - один из лучших материалов для ослабления фотонного излучения. Наиболее широкое применение свинец нашел при изготовлении контейнеров, коллиматоров, защитных «домиков», «кирпичей» различной формы, позволяющих сооружать временные защиты разной конфигурации для источников фотонов. Иногда применяют свинец в защите реакторов при сооружении локальных защит, компенсирующих прострелы излучения по пустотам, проемам и другим неоднородностям в защите (часто применяют в виде засыпок из дробы). Удобен этот защитный материал от фотонного излучения, если по габаритам защита из железа или других более легких материалов не проходит.

В свинце не образуются высокоэнергетические источники наведенной радиоактивности, что упрощает доступ к свинцовым конструкциям после остановки реакторов.

К важным недостаткам свинца относятся:

1. плохие конструкционные свойства (мягкий материал с высокой ползучестью, особенно при высокой температуре); поэтому конструкции из свинца часто зачекляют нержавеющей сталью (заливка расплавленного свинца в короба) для удержания его от ползучести;

2. невысокая эффективность поглощения быстрых нейтронов (менее эффективен, чем железо); например, длина релаксации быстрых нейтронов с энергией, большей 3 МэВ, источника деления в свинце равна 9,4 см, в железе 6,5 см;

3. интенсивное накопление в свинце нейтронов промежуточных энергий;

4. образование высокоэнергетического γ -излучения при захвате тепловых нейтронов;

5. активация возможных примесей (*Ag, Cu, As, Sb, Zn* и др.).

Бор используют в качестве добавки к защитным материалам (талям, графиту, полиэтилену, воде и др.) для снижения выхода захватного γ -излучения и уменьшения активации конструкций (см. п. 7.7), что часто позволяет экономить в массе защиты. В защитных конструкциях он может быть применен в различных соединениях, наиболее рас-

пространены из них карбид бора (B_4C), оксид бора (B_2O_3), борная кислота (H_3BO_3), бораль (смесь карбида бора с алюминием).

Графит - хороший замедлитель и отражатель нейтронов, широко используется в реакторных установках. Небольшое сечение захвата тепловых нейтронов обуславливает малый выход вторичного γ -излучения. Как и вода, графит плохо ослабляет фотонное излучение.

Использование графита непосредственно за корпусом реактора требует принятия специальных мер предосторожности в связи с возможным выделением энергии Вигнера (см. эффект Вигнера), накопление которой при высоких интегральных потоках нейтронов может достигать высоких значений. При температуре более $100^\circ C$ эффект выделения энергии Вигнера несуществен. При низкой же температуре наблюдается распухание графита.

Бетон - наиболее широко распространенный, сравнительно дешевый строительный и защитный материал. Более 90 % стационарных реакторных установок имеет защиту из бетона. Бетон - смесь атомов различных элементов. Поэтому подбором его состава можно в достаточно широких пределах изменять его свойства по ослаблению нейтронов и (или) фотонов.

Бетон удобен технологически. Только что замешанный бетон представляет собой вязкую массу, которую можно уложить в любые формы, чтобы получить конструкцию желаемой конфигурации. Для улучшения прочности бетона в него часто устанавливают стальную арматуру. Особое внимание при укладке бетона должно быть уделено обеспечению его однородности и отсутствию в нем пустот. Для этого иногда раствор инжектируют под давлением в формы с заранее уложенными тяжелыми включениями, чтобы заполнить все отводимое для него пространство.

В состав бетона входит 10-15 % (по массе) цемента, который связывает бетонные заполнители в монолит. В процессе гидратации цемент химически связывает часть воды, расходуемой на затворение бетонной массы, и становится водородсодержащей компонентой бетона, определяющей его эффективные защитные свойства по отношению к нейтронам. Воды или водородсодержащей компоненты в бетоне обычно достаточно, чтобы обеспечить одинаковую эффективность за-

медления нейтронов всех энергий. При высокой температуре ($t \geq 100^\circ\text{C}$) происходит выделение связанной цементом воды, что приводит к ухудшению защитных свойств бетона. Вот почему продолжают поиски заполнителей, сохраняющих воду в этих условиях. В частности, в последние годы нашли широкое применение термостойкие серпентинитовые бетоны ($\rho = 2,3 \text{ т/м}^3$), приготавливаемые на серпентинитовых заполнителях и портландцементе. Отличительная особенность этих бетонов - способность удерживать связанную воду при температуре до 450°C .

Различают обычные (легкие), гидратные и тяжелые бетоны.

Обычный (портландский) бетон ($\rho = 2,2-2,4 \text{ т/м}^3$) содержит, кроме водорода, в основном кислород, кремний или кальций. Как наиболее дешевый обычный бетон находит широкое использование в защитных конструкциях; однако он имеет невысокую плотность и быстро теряет химически связанную воду при температуре выше $100-150^\circ\text{C}$.

Гидратный бетон ($\rho = 2,3-3,2 \text{ т/м}^3$) отличается от обычного большим содержанием связываемой при гидратации воды, а также материалами заполнителя.

Тяжелый бетон ($\rho = 3-6 \text{ т/м}^3$) содержит в качестве заполнителя железо или железную руду, барит (сульфат бария), стальную дробь и другие металлические заполнители. Тяжелый бетон используют, когда необходимо ограничить габариты защиты.

Введение в бетон различных добавок улучшает его защитные свойства, но увеличивает стоимость. По оценкам американских специалистов, использование магнетита или ильменита для получения бетона с плотностью на 50 % выше плотности обычного бетона удорожает стоимость единицы объема бетона более чем в 2 раза, а использование металлической дроби для повышения плотности бетона в 2 раза по сравнению с обычным бетоном приводит к увеличению стоимости единицы объема бетона в 7-8 раз.

Основной недостаток бетонов - низкая теплопроводность, затрудняющая отвод выделяемого в защите тепла.

Природные материалы, такие, как горные породы, минералы, концентраты, получаемые при обогащении руд, часто используют как дешевые материалы при сооружении защит в виде засыпок, плит или блоков, выпиленных из породы, заполнителей бетонов и т. д.

9.3. ЗАЩИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ТРАНСПОРТНЫХ УСТАНОВОК

Атомные двигатели нашли широкое применение на транспортных установках. Примерами таких установок могут служить атомные ледоколы «Ленин», «Арктика» и «Сибирь», торгово-пассажирское судно «Саванна» (США), подводные корабли военно-морского флота и др.

Основное требование к выбору материала защиты транспортных установок - обеспечение минимума массы защиты.

Таким образом, задача сводится к выбору наиболее эффективного защитного материала для ослабления нейтронного излучения и наиболее эффективного материала защиты для ослабления фотонного излучения. Эти два материала обычно komponуют в виде гетерогенной слоистой защиты с оптимальным выбором толщины слоев и их расположения, приводящим к минимальной массе защиты, наилучшему геометрическому ослаблению и оптимальному балансу первичного и вторичного излучений за защитой. Эффективность ослабления нейтронов можно корректировать плотностью ядер водорода в среде, фотонов - общей плотностью материала.

Необходимость создания защиты минимальной массы обуславливает целесообразность использования более дорогостоящих, дефицитных и «экзотических» материалов по сравнению с защитой стационарных ядерно-технических установок.

Минимальную массу защиты могут обеспечить, например, комбинации свинца с полиэтиленом (или водой), вольфрама или его сплавов с гидридом лития, обедненного урана с гидридом титана, а при менее строгих требованиях к массе, например, железа с водой. Применяются также некоторые материалы, используемые для стационарных установок и рассмотренные в п. 10.2. Например, защита атомного ледокола «Ленин» выполнена из воды, стали, тяжелого бетона, а торгово-пассажирского судна «Саванна» - из легкой воды, свинца, полиэтилена, обычного и тяжелого бетонов.

Важная проблема таких защит - отвод от них тепла, который может быть осуществлен принудительным потоком охлаждающего

вещества между слоями материала защиты или через внутренние каналы охлаждения.

Некоторые тяжелые материалы для защиты от фотонного излучения на транспортных установках, такие, как, например, вольфрам или обедненный уран, имеют относительно высокую теплопроводность и могут хорошо работать при высокой температуре, если их защитить от окисления и коррозии. В противоположность им большинство материалов с высоким содержанием водорода имеют низкую теплопроводность и не могут быть использованы в полях высоких температур вследствие разложения или размягчения.

К проблемам защиты транспортных установок с ядерными двигателями примыкает проблема создания защит минимальной массы для радиоизотопных источников энергии, преобразующих выделяемое при распаде радионуклидов тепло в электричество. Такие источники широко используют, в частности, на космических аппаратах. Можно указать также на создание контейнеров минимальной массы и габаритов для транспортирования мощных искусственных источников отработавшего ядерного топлива.

Таким образом, среди хороших материалов для защит транспортных реакторных установок можно указать полиэтилен, гидрид лития, гидрид титана, свинец, сплавы вольфрама, обедненный уран.

Рассмотрим некоторые из них.

Полиэтилен - полимер с химической формулой C_nH_{2n} и плотностью 0,92-0,96 г/см³, не имеет запаха и вкуса, устойчив к кислотам, щелочам, различным растворителям. Изготовленный в виде плит, он обладает высокой механической прочностью. Недостатки полиэтилена: 1) низкая радиационная стойкость, полная размягчаемость при температуре около 110 °С (может применяться в защитах при температуре до 60-80 °С); 2) легкая воспламеняемость; 3) значительное расширение при нагревании (линейный коэффициент расширения в 10 раз больше, чем для стали); 4) низкая теплопроводность. Эти свойства полиэтилена нельзя забывать при использовании его в защите. Иногда полиэтиленовые листы и блоки заключают в герметичные короба из нержавеющей стали или алюминия, что удлиняет срок службы такой защиты, делает ее стойкой в противопожарном отношении.

При плотности 0,92 г/см³ полиэтилен содержит $7,92 \cdot 10^{22}$ ядер водорода в 1 см³, т. е. примерно на 19 % больше, чем в воде.

Для снижения выхода захватного γ -излучения в полиэтилен, как и в воду, можно добавлять бор.

Гидриды металлов - соединения типа MH_n , где M - химический символ металла. К устойчивым при высокой температуре гидридам металлов относятся гидриды лития, кальция, магния, титана, циркония, ванадия.

Гидриды металлов - хорошие материалы защиты от нейтронов для транспортных установок, так как в единице объема содержат большое количество ядер водорода (концентрация ядер водорода в некоторых гидридах металлов выше, чем в воде). Кроме того, гидриды металлов содержат элементы со средними и большими атомными массами и имеют сравнительно высокую плотность, что позволяет использовать их и как защиту от фотонного излучения.

Важная особенность гидридов металлов - повышенная температурная и радиационная стойкость - позволяет использовать их в качестве первых слоев защиты, не прибегая к специальным тепловым экранам. С повышением температуры гидриды металлов разлагаются с выделением водорода. Поэтому используемые для защит гидриды металлов должны заключаться в контейнеры, непроницаемые для водорода и способные противостоять высокому давлению. Стоимость защит, включающих гидриды металлов, как правило, весьма значительна.

Гидрид лития - наилучший из известных материалов для защиты от нейтронов; он содержит 12,6 % водорода по массе, имеет плотность 0,82 г/см³ и температуру плавления 683,5 °С.

Вольфрам обычно не применяют в защите стационарных установок из-за его высокой стоимости и малой доступности; он имеет высокую плотность, поэтому хорошо ослабляет фотонное излучение.

Железородные среды обладают одинаковыми защитными свойствами по отношению к нейтронам и фотонам при объемной концентрации железа $V_{Fe} = 60-80$ %, а по отношению к нейтронам различных энергетических групп - при $V_{Fe} \leq 82$ %.

В девятой главе использованы материалы из публикаций [9.1-9.10].

РАЗДЕЛ III. МАТЕРИАЛЫ ЗАЩИТЫ ОТ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

ВВЕДЕНИЕ

Виброакустические воздействия, включающие акустический шум (в том числе инфразвук и ультразвук) и механическая вибрация относятся к распространенным физическим факторам волновой природы, воздействующим на окружающую среду и людей как на производстве, так и в быту.

Измерение параметров этих факторов, их нормирование и контроль приобретают все большее значение: разработаны соответствующие международные и государственные стандарты; разработаны стандарты, устанавливающие технические требования на средства измерения и их поверку; в терминологических стандартах установлены термины и их определения, измеряемые величины, единицы измерения и их обозначения.

Стандарты по акустике и вибрации разработаны Международной организацией по стандартизации (ИСО), Международной электротехнической комиссией (МЭК) и Международной организацией законодательной метрологии (МОЗМ).

В соответствии с введенным в 2003 г. Федеральным законом «О техническом регулировании» (№184-ФЗ) обязательные требования, регулирующие уровни шума и вибрации устанавливаются в технических регламентах.

Технический регламент – это документ, который принят международным договором Российской Федерации, ратифицированным в порядке, установленном законодательством Российской Федерации, или федеральным законом, или указом Президента Российской Федерации, или постановлением Правительства Российской Федерации. В нем устанавливают обязательные для применения и исполнения требования к объектам технического регулирования (продукции, в том числе зданиям, строениям и сооружениям, процессам производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации). Требования технических регламентов основываются на современных достижениях науки, техники и технологии, на стандартах, правилах и нормах и учитывают назначение, условия использования продукции, выполнения работ и оказания услуг, условия и режимы труда и отдыха. С другой стороны, с введением в действие технических регламентов стандарты и иные нормативные правовые акты в соответствии с законом «О техни-

ческом регулировании» приобретают статус добровольных нормативных документов и применяются в части, не противоречащей действующим техническим регламентам с целью обеспечения их исполнения.

Требования к шуму и вибрации устанавливаются в трех общих технических регламентах (на безопасную эксплуатацию и утилизацию машин и оборудования, на биологическую и экологическую безопасность), в двух специальных (макроотраслевых) технических регламентах (о безопасности объектов технического регулирования, необходимых для обеспечения санитарно – эпидемиологического благополучия на территории Российской Федерации и о безопасности машин и оборудования), а также в специальных (отраслевых) технических регламентах о безопасности специфических видов деятельности и специфического оборудования

В третьем разделе второго тома монографии рассмотрены материалы, используемые в устройствах и системах защиты, призванных защитить производственные машины и обслуживающий персонал от их чрезмерного воздействия.

ГЛАВА 10. МАТЕРИАЛЫ ЗАЩИТЫ ОТ АКУСТИЧЕСКОГО ШУМА

10.1. МАТЕРИАЛЫ ЗАЩИТЫ ОТ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ШУМА

Звукопоглощающие материалы и конструкции используются для поглощения звука как в помещении самого источника шума, так и в изолируемых от шума помещениях. В последнем случае звукопоглощение и звукоизоляция используются совместно. Звукопоглощающие материалы – пористые и рыхлые волокнистые материалы (ультратонкое стеклянное и базальтовое волокно, минеральная вата и плиты на её основе и т.п.). Падающие на них звуковые волны вызывают колебания в мелких порах материала, которые сопровождаются трением (из-за вязкости воздуха) и переходом кинетической энергии в тепловую;

- уменьшение шума на пути его распространения от источника до РТ. Это мероприятие включает в себя следующее:

а) использование звукоизоляционных материалов и конструкций для наружных стен, окон, ворот, дверей и т.д., которые обеспечивают требуемую звукоизоляцию. Для звукоизолируемых помещений звукоизоляция более эффективна, чем звукопоглощение: с её использованием можно обеспечить снижение шума на 20...50 дБ, а при обработке стен звукоизолируемого помещения звукопоглощающим материалом снижение шума может составить только 5...8 дБ.

Для звукоизолирующих ограждений конечных размеров (в виде листов) с поверхностной плотностью m (массой одного квадратного метра ограждения, кг/м²) при частоте f звуковых волн получено выражение для звукоизоляции ограждения R , выраженной в децибелах [10.1]:

$$R = 20 \lg(mf) - 47,5 \quad (10.1)$$

Главными направлениями борьбы с шумом является его ослабление или ликвидация непосредственно в источнике образования. Это достигается заменой ударных процессов и машин безударными, изменением конструкций узлов, создающих шум (например, применением оборудования с гидроприводом вместо оборудования с кривошипным или эксцентриковыми приводами); заменой возвратно-поступательного движения деталей равномерным вращательным (например, замена штамповки при производстве печеня прессованием между валком и

транспортной лентой); применением пластмасс, текстолита, резины и других материалов для изготовления деталей оборудования (например, замена металлических пластинчатых транспортеров в цехах фасовки для транспортирования бутылок на пластмассовые с покрытием поверхности бортиков, обращенных к бутылкам, полосами из звукопоглощающих материалов, например полистиролом).

Одним из наиболее простых и экономически целесообразных способов снижения шума от машин и механизмов в производственных помещениях является применение методов звукопоглощения и звукоизоляции.

В основу звукопоглощения положено свойство строительных материалов рассеивать энергию звуковых колебаний, преобразуя ее в тепловую. Наибольшим звукопоглощающим эффектом обладают пористые и волокнистые материалы. Звуковые волны при встрече с пористой преградой частично отражаются и частично поглощаются. На основе закона сохранения энергии имеем

$$\alpha + \beta + \tau = 1, \quad (10.2)$$

где α, β, τ - соответственно коэффициенты звукопоглощения, отражения и звукопроводимости преграды, характеризующие ее соответствующие свойства;

$$\begin{aligned} \alpha &= E_{\text{ПОГЛ}} / E_{\text{ПАД}}; \\ \beta &= E_{\text{ОТР}} / E_{\text{ПАД}}; \\ \tau &= E_{\text{ПРОТ}} / E_{\text{ПАД}} \end{aligned} \quad (10.3)$$

где $E_{\text{ПОГЛ}}$, $E_{\text{ОТР}}$, $E_{\text{ПРОТ}}$, $E_{\text{ПАД}}$ - соответственно поглощенная, отраженная, прошедшая и падающая на преграду звуковая энергия.

Звукопоглощающими материалами считаются имеющие $\alpha > 0,2$ (фибролитовые плиты, стекловолокно, минеральная вата, полиуретановый поропласт, пористый поливинилхлорид и др.). Звукопоглощающие покрытия и облицовки снижают общий уровень шума не более чем на 8-10 дБ, а в отдельных октавных полосах спектра шума - до 12-15 дБ. Звукопоглощающие покрытия и облицовки обычно размещают на потолке и стенах и особенно эффективны в помещениях с высокими потолками и большой длины. Для получения максимального эффекта площадь облицованной поверхности должна составлять не

менее. 60% общей площади ограничивающих помещение поверхностей. Если площадь свободных поверхностей из-за световых проемов менее указанной, дополнительно следует применять штучные (функциональные) поглотители, подвешиваемые над и вблизи шумного оборудования. Штучные поглотители представляют собой плоские кулисы и балки или объемные конструкции в виде призм, шаров и т. п., заполненных звукопоглощающим материалом (стекловолокно и т. п.).

Для предупреждения распространения шума его источник изолируется (частично или полностью) с помощью ограждений (стен, перегородок, перекрытий, кожухов и экранов), отражающих звуковую энергию. Звукоизолирующая способность ограждений зависит от акустических свойств материалов (скорости звука в поле), геометрических размеров, числа слоев материала, массы, упругости, качества крепления ограждения, частоты его собственных колебаний и частотной характеристики шума. На рис. 10.1 приведены примеры снижения шума средствами шумоглушения, из которого следует, что наиболее эффективно они снижают наиболее опасные средне- и высокочастотные шумы.

Средства звукопоглощения применяют для снижения шума на рабочих местах, располагающихся в помещениях с источниками шума, или в тихих помещениях, в которые проникает шум из соседних шумных помещений. К этим средствам относятся звукопоглощающие облицовки и искусственные звукопоглотители. Оборудование их в помещениях называется акустической обработкой.

Акустический эффект звукопоглощающих облицовок и искусственных поглотителей основывается на уменьшении интенсивности отраженного звука. Поглощение звука обусловлено переходом колебательной энергии звуковой волны в теплоту вследствие потерь на трение в звукопоглотителе.

Средства звукопоглощения, используемых для акустической обработки помещений, делятся на три группы:

1) звукопоглощающие облицовки в виде акустических плит полной заводской готовности с жесткой и полужесткой структурой - плиты типа "Акмигран", "Акминит", "Силлпор", ПА, ПС и др.;

2) звукопоглощающие облицовки из слоя пористо-волоконистого материала (стеклянного или базальтового волокна, минеральной ваты) в защитной оболочке из ткани или пленки с перфорированным покрытием (металлический им, гипсовым и т.п.) - плиты "Москва", "Мефодия" и др.;

3) искусственные поглотители, что есть одно-или многослойными объемными звукопоглощающими конструкциями в виде куба, паралле-

лепипеда, конуса, потолка помещения. Одной из разновидностей таких звукопоглотителей является звукопоглотитель кулисы в виде плоских пластин из минераловатных плит в оболочке из ткани или пленки.

Глушители шума на машиностроительных предприятиях.

Повышенный шум на рабочих местах и в жилой застройке часто создается при работе вентиляторных, компрессорных и газотурбинных установок, систем сброса сжатого воздуха, стендов для испытаний различных двигателей. Снижение шума аэродинамического происхождения достигается оборудованием глушителей в каналах на пути распространения шума от его источника к месту всасывания или выброса воздуха и газов. Глушители бывают абсорбционные, реактивные и комбинированные. Снижение шума в абсорбционных глушителях происходит за счет поглощения звуковой энергии применением и у них звукопоглощающими материалами и конструкциями, а в реактивных - вследствие отражения звука обратно к источнику. Комбинированные глушители имеют свойство как поглощать, так и отражать звук. Выбор типа глушителей зависит от конструкции установки, которую нужно заглушить, спектра и требуемого снижения шума шуму.

Организационно-технические средства состоят из технических (конструктивные решения по снижению шума в источнике) и организационных, к которым относятся:

- обозначения рабочих мест с уровнем звука свыше 80 дБА метками шумовой опасности. Постоянное пребывание в таких зонах возможно только с применением средств индивидуальной защиты;
- ограничение времени пребывания людей в зоне повышенного шума без средств индивидуальной защиты органов слуха согласно ГОСТу 121050-86;

• обязательное проведение для лиц, работающих в условиях интенсивного производственного шума, предварительного и периодического медицинских осмотров (Аудиометрический контроль)

К средствам индивидуальной защиты от шума относятся:

- 1) противошумные укладки - мягкие и жесткие;
- 2) наушники, обеспечивающие снижение уровней звукового давления в зоне высоких частот 30-35 дБ;
- 3) противошумные шлемы, которые применяются при уровнях звука более 130 дБА

Акустические экраны представляют собой щиты, облицованные со стороны источника шума звукопоглощающим материалом толщиной не менее 50-60 мм. Их следует применять для защиты от шума обслуживаемого и соседних агрегатов, если звукопоглощающие обли-

цтовки не обеспечивают соблюдения гигиенических нормативов. Их назначение — снижение интенсивности прямого звука или отгораживание шумного оборудования или участков от остальной части помещения. Экран является преградой, за которой образуется акустическая тень со сниженным уровнем звукового давления прямого шума. Он наиболее эффективен против шума высоких и средних частот и дает малый эффект для низкочастотного шума, огибающего экраны за счет дифракции. Линейные размеры экрана не менее чем в 2-3 раза должны превосходить линейные размеры источника шума. Их целесообразно применять для защиты от источников шума, создающих уровни звукового давления в рассматриваемых точках, превышающие допустимые не менее чем на 10 дБ и не более чем на 20 дБ.

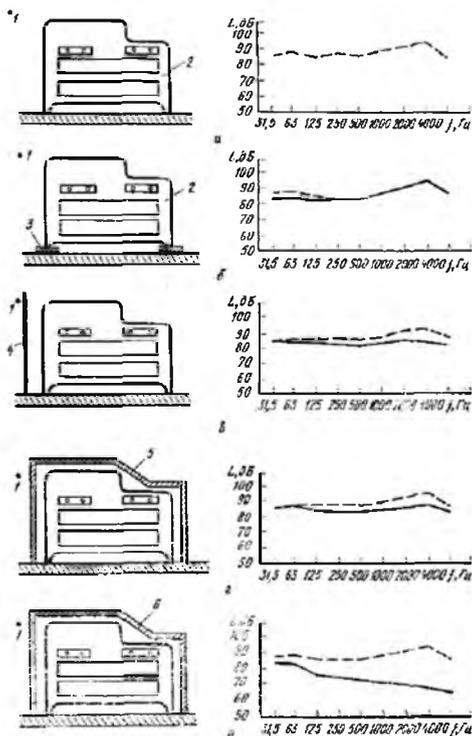


Рис. 10.1. Эффективность средств снижения шума машин: а - до применения средств шумоглушения; б - после применения виброизолятора; (1 - точна наблюдения; 2 - машина; 3 - виброизолятор); в - после применения твердого экрана 4, z - после применения кожуха из пористого материала 5: д - после применения кожуха из жесткого непористого материала б

Звукоизолирующие качества ограждения определяются коэффициентом звукопроводимости. Для диффузного звукового поля, в котором все направления распространения прямых и отраженных звуковых волн равновероятны, величина звукоизоляции ограждения может быть

рассчитана по формуле (в дБ):
$$R = 10 \lg(1 / \tau)$$

Глушители шума, распространяющегося по каналам, возникающего на выходе вентиляторов, на входе и выходе компрессоров, разделяются на активные и реактивные (рис. 10.2). Активные представляют собой канал, облицованный звукопоглощающим материалом. Они используются для борьбы с шумом со сплошным широкополосным спектром. Реактивные Глушители применяются для борьбы с шумом с резко выраженными дискретными составляющими (выхлопом поршневых двигателей внутреннего сгорания, компрессоров и т. п.) и выполняются в виде камер расширения и сужения, с перегородками и т. п.

10.2. МАТЕРИАЛЫ ЗАЩИТЫ ОТ ИНФРАЗВУКА

Снижение интенсивности инфразвука может быть достигнуто различными способами: изменением режима работы устройства или его конструкции; звукоизоляцией источника, поглощением звуковой энергии, при помощи глушителей шума: интерференционного, камерного, резонансного и динамического типов, а также за счет использования механического преобразователя частоты. Защита от вредного воздействия инфразвука расстоянием мало эффективна, так как при равной мощности источников инфразвуковых и звуковых колебаний с частотой $f_{И}$ и $f_{ЗВ}$ соответственно справедливо выражение

$$r_{И} = r_{ЗВ} (f_{ЗВ} / f_{И}), \quad (10.4)$$

где $r_{И}$ и $r_{ЗВ}$ - соответственно расстояние от источника инфразвуковых волн и волн в слышимом диапазоне частот, на которых имеет место одинаковая интенсивность излучаемых колебаний. Таким образом, ослабление уровня инфразвука с увеличением расстояния весьма незначительно по сравнению с ослаблением звуковых колебаний. Это связано с малым затуханием инфразвуковых колебаний при распространении в воздушной среде. Поглощение в нижних слоях атмосферы

инфразвуковых колебаний с частотой ниже 10 Гц не превышает $8 \cdot 10^{-6}$ дБ/км.

Борьбу с инфразвуком в источнике его возникновения необходимо вести прежде всего в направлении изменения режима работы технологического оборудования увеличением его быстроходности, например увеличением числа рабочих ходов кузнечно-прессовых машин, чтобы основная частота следования силовых импульсов лежала за пределами инфразвукового диапазона. Одновременно должны приниматься меры по снижению интенсивности аэродинамических процессов, в частности по ограничению скоростей движения средств транспорта, снижению скоростей истечения в атмосферу рабочих тел (авиационные и ракетные двигатели, двигатели внутреннего сгорания, системы сброса пара тепловых электростанций и т. д.).

При выборе конструкции предпочтение должно отдаваться малогабаритным машинам большой жесткости, поскольку в конструкциях с плоскими поверхностями большой площади и малой жесткости создаются условия для генерации инфразвука.

Для уменьшения амплитуды инфразвуковых колебаний целесообразно использовать глушители шума, что является наиболее простым способом уменьшения уровня инфразвуковых составляющих шума всасывания и выхлопа стационарных дизельных и компрессорных установок, ДВС и турбин.

Применение глушителей интерференционного типа так же, как в случае борьбы с шумом, наиболее эффективно, когда требуется заглушить одну или несколько дискретных составляющих в спектре инфразвука, особенно в случае его распространения по каналам.

Чтобы добиться смещения волны по фазе, в воздуховодах устраивают боковой отвод, длина которого должна быть $(\lambda/2)a$, где λ - длина заглушаемой инфразвуковой волны; $a = 1, 3, 5, \dots$

Глушители камерного или резонансного типа работают на тех же принципах, что и аналогичные глушители шума. Однако в случае инфразвуковых колебаний они должны иметь весьма большой объем расширительной камеры или резонансной полости. На рис. 83, а представлена схема двухкамерного кольцевого гасителя к компрессору ВП-20/10М. Использование этого глушителя на всасывающем тракте позволило резко снизить уровень инфразвуковых составляющих компрессора (рис. 83,б). Сравнение спектров шума компрессора до установки глушителя (кривая 1) и после установки (кривая 2) показывает, что эффективность глушителя составляет более 10 дБ во всем рассматриваемом диапазоне частот.

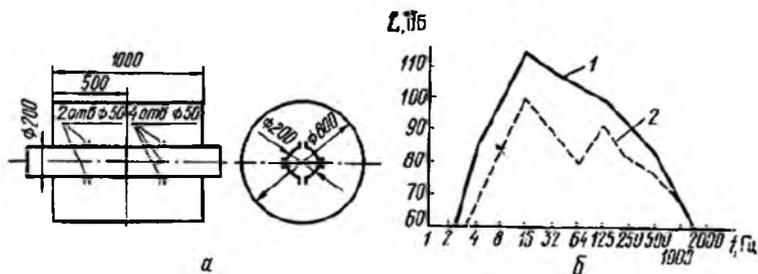


Рис. 10.2. Схема двухкамерного кольцевого глушителя инфразвука (а) и спектры инфразвука компрессора ВП-20/10М (б):
 1 - спектр инфразвука до установки глушителя; 2 - спектр инфразвука после установки глушителя

Механический преобразователь частоты инфразвуковых колебаний основан на способе амплитудной модуляции звуковых колебаний. Он может быть применен для защиты от инфразвука, распространяющегося по закрытому каналу, например в выхлопных трубах двигателей внутреннего сгорания (ДВС), аэродинамических трубах при испытаниях авиационных двигателей. Модуляция инфразвуковых колебаний осуществляется посредством аэродинамического преобразователя, например ультразвуковой сирены, установленного на пути распространения инфразвуковых волн. Это позволяет преобразовывать инфразвуковые колебания в менее опасные ультразвуковые колебания. Амплитуда несущего колебания может быть изменена за счет соответствующего изменения частот модулирующего сигнала во времени. На этом принципе работает глушитель, разработанный, в частности, и для систем выхлопа ДВС.

Применение звукоизоляции инфразвука на практике представляет достаточно сложную инженерную задачу, так как требуются весьма мощные строительные конструкции с массой одного квадратного метра изоляции не менее 105-106 кг. На рис. 10.3 представлены спектры уровня инфразвука от оборудования цеха по производству асфальта, замеренные в квартирах первого этажа 4-этажного панельного дома, имеющего двойные деревянные переплеты окон. Спектр 1 соответствует измерению инфразвука в квартире с открытыми окнами, спектр 2 - с закрытыми. Обращает на себя внимание полное отсутствие эффекта звукоизоляции в инфразвуковом диапазоне частот. Следует отметить, что существующие расчетные зависимости эффективности звукоизоляции неприменимы для инфразвука [10.4].

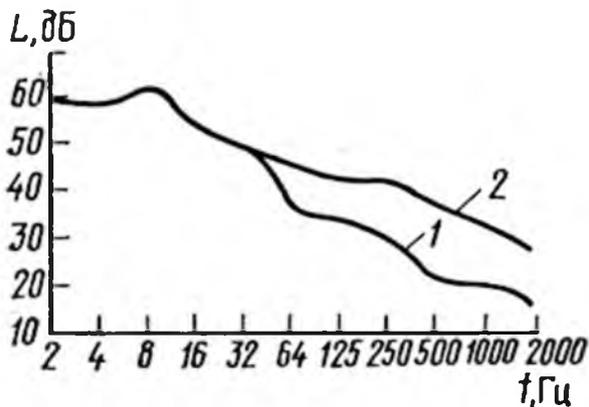


Рис. 10.3. Спектры инфразвука оборудования цеха по производству асфальта

Метод звукопоглощения может быть реализован применительно к инфразвуковым колебаниям путем использования резонирующих панелей типа конструкций Бекешы (рис. 10.4). Они представляют собой прямоугольные рамы, на которые крепится тонкостенная мембрана. Последняя может быть выполнена из металла, дерева либо воздухопроницаемой пленки (например, холста, покрытого лаком или подобным ему материалом). При монтаже указанной конструкции в помещениях с источниками инфразвука энергия последних поглощается, так как туго натянутый холст играет роль мембраны с большим затуханием. Конструкция может быть настроена на определенную частоту в спектре инфразвука. Собственная частота резонатора Бекешы Гц:

$$f_0 = (1/2\pi) \sqrt{c^2 \rho / mh}, \quad (10.5)$$

где c - скорость распространения звука; ρ - плотность воздуха; m - масса, приходящаяся на единицу поверхности мембраны; h - толщина воздушного промежутка за мембраной.

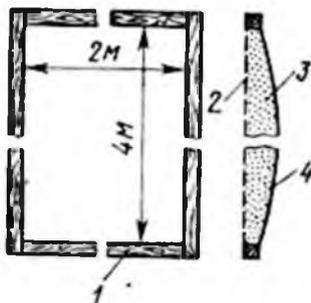


Рис. 10.4. Резонирующие панели Бекеши:
 1 - рама-каркас; 2 - металлическая сетка; 3 - звукопоглотитель;
 4 - апретированный холст

Для повышения эффективности рассматриваемых конструкций в диапазоне более высоких частот внутренняя полость резонатора заполняется каким-либо звукопоглощающим материалом. В этом случае со стороны поверхности крепления на раму монтируется мелкоячеистая стенка.

Борьба с неблагоприятным влиянием производственного инфразвука включает целый комплекс мер:

1) Ослабление инфразвука в его источнике, устранение причин его возникновения (обеспечения хранения точного центрирования и балансировки крупных элементов, вращающихся, изменение частоты вращения (частоты вращения от резонансной частоты строительных конструкций).

2) Изоляция инфразвука - применение специальных замкнутых оболочек - кабин большой жесткости для защиты персонала.

3) Поглощение инфразвука, установление глушителей. На рис. 10.5 приведена схема одного из типов инфразвукопоглощающих панелей. Поглощение происходит в результате изгибных колебаний панели за счет ее внутреннего трения, а также потерь энергии в воздушном промежутке. Высоких показателей коэффициент звукопоглощения достигает в зоне резонансных частот системы.

4) Индивидуальные средства защиты (специальные пояса, позволяющие уменьшить степень сотрясения органов брюшной полости и грудной клетки).

5) Медицинская профилактика: профотбор; периодические медицинские осмотры; правильный режим труда и отдыха

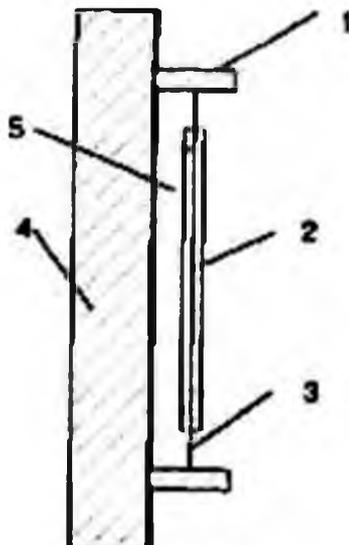


Рис. 10.5. Инфразвукопоглощающая панель:

7 - каркас, 2 - жесткая панель 3 - упругий воротник (сплошной по периметру панели), 4 - стена производственного помещения, 5 - воздушный промежуток

10.3. МАТЕРИАЛЫ ЗАЩИТЫ ОТ УЛЬТРАЗВУКА

Меры борьбы с неблагоприятным воздействием ультразвука на организм человека аналогичны мерам защиты от слышимых звуков:

1) уменьшение излучения звуковой энергии в источнике при проектировании (за счет повышения номинальных рабочих частот УЗ-установок);

2) локализация действия ультразвука конструктивными и планировочными решениями (размещение УЗ-приборов в отдельных помещениях, кабинах с дистанционным управлением; устройство систем блокировки, применение кожухов, экранов, облицовка кабин и помещений звукопоглощающими материалами и др.);

3) организационно-профилактические мероприятия (инструктаж, рациональный режим труда и отдыха, медицинские осмотры, временное или полное устранение от работы в условиях интенсивного ультразвука);

4) индивидуальные средства защиты (противошумы ВЦНДИОП, укладки ФПШ).

ГЛАВА 11. МАТЕРИАЛЫ ЗАЩИТЫ ОТ ВИБРАЦИИ

11.1. ВИБРОИЗОЛИРУЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ

В качестве виброизолирующих материалов применяют: резину губчатую, мягкую, средней жесткости и специальных сортов; пробку натуральную или плиты из пробковой крошки; войлок натуральный; минеральный войлок на битумном связующем толщиной 3 см; асбоцементные плиты; древесно-стружечные плиты.

Виброизоляция агрегатов и их отдельных узлов осуществляется за счет применения резиновых, пробковых и пружинных амортизаторов, а также за счет применения гибких вставок, отделяющих виброагрегат от присоединенных трубопроводов и других металлических деталей и применения упругих прокладок, разделяющих вибрирующие узлы машины. Типы амортизаторов выбираются в зависимости от диапазона частот вибрации. Пробковые амортизаторы (достаточно легкие) используются на частотах более 20 Гц. Резиновые амортизаторы рекомендуются на частотах более 12 Гц.

Металлорезиновые амортизаторы, представляющие собой сочетание стальных пружин с резиной, используются на частотах 6 Гц. Пружинные стальные амортизаторы - в зависимости от параметров пружины могут использоваться на любых частотах. Предотвращение неблагоприятного действия вибрации возможно путем установки машин и станков на отдельные фундаменты, основания которых должны быть ниже фундамента стен. Масса фундамента должна быть в два-три раза больше массы станка. Между фундаментом станка и фундаментом стен должна быть воздушная прослойка или песок для предотвращения передачи вибрации на стены производственных помещений. Оптимальным считается $KП = 1/8..1/15$.

11.2. ВИБРОПОГЛОЩАЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ

Вибропоглощение заключается в уменьшении вибрации за счет превращения энергии механических колебаний вибрирующей системы в тепловую энергию. Вибропоглощающие свойства материалов оцениваются коэффициентом δ , который называется коэффициентом потерь. Чем выше δ , тем больше эффект вибропоглощения.

Вибропоглощение осуществляется путем нанесения вибропоглощающих материалов на готовые машины, механизмы, транспортные

средства. Отдельные элементы или механические устройства целиком могут быть изготовлены из вибропоглощающих материалов и конструкций.

Существуют два способа вибропоглощения:

1. Вибропоглощение осуществляется путем изготовления вибрирующих объектов из материалов с высоким коэффициентом потерь (т.е. с большим δ), например, сплавов на основе медь-никель, титан-никель, а также из пластмасс, резины, текстолита и дерева. Для перечисленных материалов δ изменяется от 0.05 до 0.1, в то время как у стали δ равно 0,001.

2. Нанесением на вибрирующие объекты материалов с высоким коэффициентом потерь (т.е. покрытий). Действие покрытия также основано на ослаблении вибрации путем перевода колебательной энергии в тепловую при деформации покрытия. Вибропоглощающие покрытия могут быть жесткими и мягкими. Действие жестких вибропоглощающих покрытий проявляется в области низких и средних частот, а действие мягких – в области высоких частот.

Значение параметра - коэффициента потерь, характеризующего диссипативные силы в колебательной системе – для основных конструкционных материалов (чугунов и сталей) составляет 0,001 – 0,01.

Значительно большее внутреннее трение имеют сплавы на основе систем никеля: медь – никель, титан – никель, кобальт – никель. Коэффициент потерь этих сплавов составляет 0,02 – 0,1.

С точки зрения вибраций наиболее предпочтительным является использование в качестве конструкционных материалов пластмасс, дерева, резины.

Когда применение полимерных материалов в качестве конструкционных не представляется возможным, для снижения вибраций используют вибропоглощающие покрытия. Действие покрытий основано на ослаблении вибраций путем перевода колебательной энергии в тепловую при деформации покрытий.

В зависимости от значения динамического модуля упругости (E) покрытия подразделяются на жесткие ($E=10^8 - 10^9$ Па) и мягкие ($E=10^7$ Па). Действие покрытий первой группы проявляется на низких и средних частотах, второй – на высоких.

К жестким покрытиям относятся твердые пластмассы, рубероид, фольга. Коэффициент потерь слоистых вибродемулирующих покрытий изменяется от 0.1 до 0.4. К мягким вибропоглощающим покрытиям относятся мягкие пластмассы, материалы типа резины, пластик и раз-

ные пенопластмассы. Действие мягких покрытий обусловлено их деформациями по толщине. Коэффициент потерь таких покрытий изменяется от 0.05 до 0.5. Для вибрирующих объектов сложной формы, где невозможно использовать вибропоглощающие покрытия (листовые) применяют мастики. Наиболее распространены мастичные покрытия типа «Антивибрит», ВД 17-58.....ВД 17-63. Коэффициент потерь их от 0.3 до 0.45.

Мягкие покрытия – мягкие пластмассы, материалы типа резины (пенэласт, технический винипор), пенопласт, поливинилхлоридные пластики. этих покрытий – 0,05 – 0,5.

Если не представляется возможным обеспечить качественное соединение покрытий с обрабатываемой поверхностью, если последняя имеет сложную конфигурацию, то используют мастичные покрытия. Наибольшее распространение получили мастики типа «Антивибрит» на основе эпоксидных смоляных мастик составляет 0,3 – 0,45. Используют мастики в машиностроении для снижения вибрации и шума вентиляционных систем, компрессоров, насосов, трубопроводов.

Хорошо поглощают колебания смазочные материалы.

11.3. ВИБРОГАСЯЩИЕ КОМПОЗИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Композиционные хемосорбционные волокнистые материалы на основе углеродных волокон. В последнее время значительно возрос интерес к углеродным волокнам (УВ), которые могут быть использованы в различных областях промышленности: в качестве наполнителей композиционных материалов конструкционного назначения, термозащитных или токопроводящих элементов. Этот интерес обусловлен химической стойкостью УВ к агрессивным средам, уникальными упругопрочностными показателями и прекрасной теплостойкостью [11.5].

Сочетание в одном материале высоких фильтрующих и сорбционных свойств позволяет использовать УВ в качестве волокнистых наполнителей композиционных хемосорбционных волокнистых материалов (КХВМ). Характерное для волокнистых материалов разнообразие текстильных форм, позволяет варьировать аппаратурное оформление сорбционных процессов, что, в свою очередь, расширяет возможности их применения.

Исследования проводились на композиционных хемосорбционных волокнистых материалах "Поликон", относящихся к новому классу хемосорбентов. Данные материалы, получаемые по малостадийной

технологии методом поликонденсационного наполнения, обладают широким комплексом эксплуатационных свойств.

Проведенные ранее исследования показали возможность и целесообразность получения КХВМ "Поликон" методом поликонденсационного наполнения на полиакрилонитрильных (ПАН), вязкозных (ВВ) и полипропиленовых (1111) волокнах.

Химическая природа волокна, на поверхности и в структуре которого происходит синтез ионообменного материала, влияет на кинетику процесса получения и свойства материалов. Одной из характерных особенностей УВ является развитая удельная поверхность и высокая пористость, для них характерны поры различного диаметра, что в значительной степени увеличивает селективность таких материалов и виброгасящие свойства.

Эпоксидные композиты с высокими демпфирующими свойствами. При работе высокоскоростных машин возникают вредные вибрации, снижающие их надежность. Эффективным средством борьбы с вибрациями является применение в конструкциях, подверженных воздействию динамических нагрузок, виброгасящих устройств. Существующие виды виброизоляторов, изготовленных из традиционных материалов, имеют большое количество недостатков (высокая стоимость, низкая долговечность, длительность монтажа и палатки). Поэтому эффективным является получение вибропоглощающих материалов из полимерных композитов с применением в их составе комплексных модифицирующих добавок, обеспечивающих высокий уровень вибродемпфирования.

В связи с этим исследованы эпоксидные композиты с высокими демпфирующими физико-механическими свойствами [11.3]. В процессе исследования разработаны научно-обоснованные принципы создания высокодемпфирующих композитных материалов, а также технологии их получения.

Разработана специальная комплексная добавка, позволяющая существенно повысить демпфирующие физико-механические свойства эпоксидных композитов. Выявлены особенности и закономерности изменения вибропоглощающих, а также технологических свойств эпоксидных композитов в зависимости от содержания модифицирующих добавок. Установлен механизм образования микроструктуры демпфирующих композитов. Выявлено основополагающее влияние тупиковых ветвей структурного каркаса на демпфирующие свойства полимерных композитов. Установлен универсальный критический ин-

декс, характеризующий состояние тупиковых ветвей структурного каркаса.

В результате исследований разработаны модифицированные наполненные эпоксидные композиты с высокими демпфирующими физико-механическими свойствами, которые широко используются в настоящее время на станкостроительных предприятиях для изготовления демпфирующих устройств.

применения полимерных композитов в качестве материалов для изготовления демпфирующих устройств. Проанализированы механизмы вибропоглощения полимерных композитов.

Классифицированы полимерные композиты в зависимости от вида применяемых мономеров и отвердителей. Установлено, что в качестве матричного компонента для получения демпфирующих композитов целесообразно использовать эпоксидные смолы как матричные материалы, отличающиеся уникальным сочетанием технологических и эксплуатационных свойств.

Проанализированы общие закономерности структурообразования и основные принципы технологии получения полимерных композитов.

Как правило, матричным связующим элементом рекомендована эпоксидная смола марки ЭД-20, отверждаемая аминным отвердителем-полиэтиленполиамином (ПЭПА). В качестве модифицирующих и пластифицирующих добавок рекомендованы полиизоцианат, простой полиэфир (лапрол-805А), раствор каучука (СКН-3ОКТР), разбавитель - толуол. В качестве наполнителей для эпоксидных композитов могут быть использованы: молотый кварцевый песок с удельной поверхностью $230 \text{ м}^2/\text{кг}$; рассеянный молотый керамзит с удельной поверхностью отдельных фракций, равной $0,96 \text{ м}^2/\text{кг}$, $1,92 \text{ м}^2/\text{кг}$, $3,84 \text{ м}^2/\text{кг}$, $7,62 \text{ м}^2/\text{кг}$; пылевидная фракция молотого керамзита с полидисперсным составом.

При этом следует учитывать, что вибродемпфирующие свойства материалов существенно зависят от соотношения количества отвердителя и модифицирующих добавок на структуру и от демпфирующих физико-механических свойств эпоксидной матрицы.

Установлено массовое содержание отвердителя, при котором эпоксидная матрица имеет стабильные демпфирующие физико-механические свойства. По результатам проведенных исследований оптимизировано количественное содержание ПЭПА.

Вибропоглощающие свойства эпоксидной матрицы можно усилить путем ее модификации, которая основана на изменении химического строения получаемой многокомпонентной смеси путем введения целевых реакционно-способных добавок. Введение активной многокомпонентной добавки повышает коэффициент внутреннего трения, динамический модуль упругости, прочность и другие вязкоупругие характеристики.

Эффективным способом изменения температуры стеклования, а вследствие этого и усиления виброгасящей способности эпоксидной матрицы является введение в ее состав реакционно-способного каучука с концевыми функциональными группами. В процессе полимеризации такой многокомпонентной смеси образуется двухфазовая полимерная структура, состоящая из жесткой эпоксидной и диспергированной вязкоупругой каучуковой фазы.

Исследования показали [11.6], что введение эластифицирующей добавки в количестве 10% в состав эпоксидной матрицы существенно усиливает ее демпфирующие, но понижает упругие свойства. Это прослеживается по изменению коэффициента внутреннего трения в пределах 0,012-0,03 и динамического модуля упругости в интервале 4000 МПа-3000 МПа. Последнее оценивается как нежелательный эффект, снижающий жесткость и устойчивость сильно нагруженных вибродемпирующих конструкций.

При изготовлении демпфирующих композитов целесообразно применять пористый наполнитель для получения лучших демпфирующих свойств.

Интеллектуальные полимерные композиционные материалы. В соответствии со «Стратегическими направлениями развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» по направлению № 1 «Умные» конструкции» и направлению № 4 «Интеллектуальные, адаптивные материалы и покрытия» реализуется комплексная проблема 4.1 «Интеллектуальные ПКМ II и III поколения».

Интеллектуальные материалы способны контролировать напряженно-деформированное состояние в условиях воздействия внешних факторов (нагрузок, температур) и адаптироваться (приспосабливаться) к этим воздействиям, например, путем управления формой для снижения возникающих в нем напряжений. Такие материалы могут применяться для особоответственных высоконагруженных конструкций. Для осуществления этих функций в структуру материала встраиваются сенсоры – тензорезисторные, оптоволоконные, пьезоэлектриче-

ские, которыми могут служить в том числе армирующие элементы, входящие в состав композиционного материала.

АКМ-1, АКМ-2 – углепластики для самоадаптирующихся конструкций, в которых используется эффект возникновения крутящих напряжений при изгибающей нагрузке, возникающей в аэродинамическом потоке и приводящих к изменению формы поверхности, подъемной силы на крыло и снижению напряженности конструкции из-за неравновесной структуры композиционного материала. Также разработаны углепластики с функцией самоадаптации КМУ-7т, КМУ-4т2М и КМУ-42М-3673 (рис. 11.1).

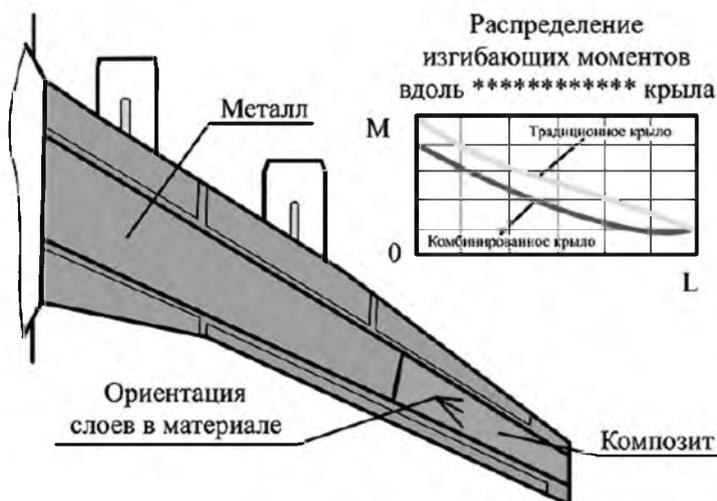


Рис. 11.1

В ВИАМ разработана технология введения в конструкционный материал сенсорных элементов на основе оптических волокон с брэгговскими решетками, позволяющая осуществлять *online* мониторинг напряженно-деформированного состояния конструкции в процессе эксплуатации.

Механокомпозиты – материалы со встроенными функциональными компонентами, позволяющими осуществлять мониторинг деформаций, температуры и активное противодействие внешним силам в режиме реального времени. В качестве функциональных компонентов

могут быть использованы сплавы с памятью формы, магнитострикционные сплавы, электро-реологические и магнитные жидкости, электролюминисцентные и радиопоглощающие материалы, оптические волокна, пьезоэлектрики, бифункциональные сополимеры, проводящие полимеры, золь-гели и другие материалы. Предназначены для изготовления элементов сверхбыстродействующих обшивок или обтекателей, осуществляющих управление воздушными потоками без применения механических рулей, а также для осуществления активного гашения вибраций и перераспределения механических напряжений.

Интеллектуальные материалы III поколения способны выполнять определенные функции автономно в ответ на изменение внешних параметров, а также использовать интегрированные сенсоры для контроля качества снижения вибрации в изготовленных изделиях.

11.4. ВИБРОДЕМПФИРУЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ

Шумофф Проф Ф8 - вибродемпфирующий материал на основе полимерно-битумный мастики. Термонаплавляемый материал с использованием фена и разогревом до температуры 50-60°C. Может быть использован при минимизации вибраций у транспортных средств. Материал идеально подходит для придания кузову автомобиля максимальной упругости, максимально эффективно гасит вибрации железа. Виброгасящий термоклящийся материал толщиной 8 мм снижает шум металлических и пластиковых панелей, возникающий при их вибрации. Выгодные особенности:

- Лучший по монтажным свойствам и один из лучших по гашению вибрации материал. Имеет начальную липкость для первичного монтажа. Затем требует разогрева до 40-60°C для окончательного монтажа на поверхность. После разогрева прикатывается валиком. Материал применяют для обработки сильно вибронегруженных участков автомобиля и участков с толщиной металла 2мм и более.

- Для удобства работы на поверхность материала нанесена АА-бумага с шаговой линовкой в стиле Шумофф, что обеспечивает возможность точного и быстрого раскроя без дополнительного мерительного инструмента.

- Битумный слой доработан и выдерживает минусовые температуры, не становится хрупким. Не сломается при транспортировке. Имеет низкую начальную липкость при нормальных температурах, что

обеспечивает легкий и удобный раскрой (инструмент и руки останутся чистыми). В процессе монтажа материал можно оторвать от поверхности, пока не проведено наплавление. Удобен при монтаже на сложные рельефные поверхности. Может быть смонтирован на поверхность, изогнутую в 3-х плоскостях.

- Выпускается в виде листов размером 370x270. Такой раскрой позволяет монтировать материал практически не прибегая к дополнительному крою, что значительно ускоряет процесс шумоизоляции объекта. Также данный размер позволяет более эффективно складировать и хранить материал, не занимая дополнительного места на складе (в боксе).

11.5. ВИБРОДЫШАЩИЕ МАТЕРИАЛЫ

В качестве различных прокладок для снижения вибрационных характеристик при движении используются дышащие материалы.

Базальтовые материалы. В качестве вибродышащих материалов широко используются базальтовые материалы, обладающие рядом характеристик, которые выгодно отличают их от других подобных стройматериалов:

- В отличие от стекловаты и ее производным продуктам, базальтовое волокно не боится контакта с большинством агрессивных сред: с кислотой, со щелочными растворами, с различными растворителям и т.д.

- Базальтовое волокно обладает повышенным уровнем сопротивляемости к электрическому току.

- Изделия из базальтовых материалов способны выдерживает термические нагрузки до 700 °С, в то время как минеральная вата способна выдерживать не более 400 °С.

- Благодаря тому, что процесс изготовления материала происходит в результате плавления природного сырья, можно получать волокна различной толщины и длины, от чего и будут зависеть итоговые свойства продукции.

Базальт широко применяется на объектах с атомными реакторами или в тех местах, где повышенная опасность радиационного заражения, благодаря тому, что не способен накапливать радиацию.

Помимо того что базальтовые материалы не боятся высоких температур, они достаточно пластичны и устойчивы к вибрационным нагрузкам, работая в таких тяжелых условиях они не меняют своих начальных свойств.

Устойчивые к негативным факторам окружающей среды, материалы на основе базальта обладают длительными эксплуатационными сроками, как самостоятельно, так и в составе различных изделий.

Современный утеплительный материал на основе базальта, состоит из множества волокон, толщина каждого из которых в несколько раз меньше человеческого волоса. Теплоизоляция из подобного материала является не только экологически чистой, но и обладает 100 % сопротивляемостью к огню, причем как к достаточно высокотемпературным нагрузкам, так и к прямому пламени.

Немаловажным положительным аспектом является и допустимый температурный диапазон, при котором базальтовое волокно не изменяет своих физических свойств. Такой материал одинаково хорошо проявляет себя при температуре от - 260 до + 900 °С.

Помимо этого базальтовые материалы относятся к дышащим волокнам, которые не препятствуют микровентиляции различных поверхностей и соответственно не может стать причиной появления и разрастания микроорганизмов и бактерий.

Утепляющий материал из базальта не выделяет вредных паров и других негативных продуктов независимо от сферы применения. Также он способен обеспечить надежную шумо - и виброизоляцию поверхностей, в среднем 10 см базальтовой ваты гасят колебания практически также как кирпичная кладка метровой толщины.

Подобным положительным аспектам базальтовый утеплитель обязан оксиду кремния, который содержится в вулканическом базальте в достаточно большом объеме.

Базальтовое волокно применяется в различных отраслях современной жизнедеятельности человека, в частности это:

- Атомные станции, учитывая его невосприимчивость к радиационному излучению и длительные эксплуатационные сроки в тяжелых условиях.

- Теплоизоляция трубопроводов и теплотрасс с большим диаметром трубы.

- Из базальтовой ваты изготавливают теплоизоляционные листы, применяемые в бытовых устройствах, таких как духовые шкафы, газовые и электроплиты.

- Теплозащита с огнеупорными свойствами во всех типах зданий.

- Утепление крыш с плоской поверхностью.

Учитывая, что базальтовая вата хорошо переносит низкие температуры, ее применяют для изоляции низкотемпературного оборудования, работающего на основе азотных жидкостей. Является основой для создания строительных сэндвич панелей.

Несмотря на то, что базальтовая вата стоит на порядок дороже большинства вибро-, тепло- и шумо-изоляционных материалов, ее длительные эксплуатационные сроки и другие положительные характеристики в несколько раз превышают свои аналоги.

Арболитовые материалы. Арболит - это блоки или стеновые панели, состоящие из деревянной щепки и бетона. Относится к вибродышащим материалам. Обладает рядом характеристик, делающим его предпочтительным перед другими строительными материалами: долговечностью и морозостойкостью; высокими теплоизоляционными характеристиками; экологичностью (в домах из арболитовых блоков, благодаря их техническим характеристикам, сохраняется хорошая атмосфера воздуха); низким коэффициентом усадки = 0,3-0,4 % (незначительным изменением объема и линейных параметров материала в результате нарушения его влагосодержания). Для сравнения: усадка пеноблока - 0,6-1,2 %, газоблока - 1,5%.

Полистиролбетон. Может быть отнесён к вибродышащим материалам, обладает варьируемой плотностью. Благодаря этому полистиролбетон с успехом используется в качестве как теплоизоляционного, так и конструкционного материала. Полистиролбетону можно придавать сложный профиль, обеспечивающий герметичность стыков даже без применения уплотняющих материалов.

По своим характеристикам и потребительским свойствам полистиролбетон очень близок к дереву, но имеет значительно большую долговечность. Прочность на сжатие до 3,60 МПа. Основной вяжущий компонент полистиролбетона - цемент, который со временем набирает наибольшую прочность, т.е. в процессе эксплуатации полистиролбетона происходит нарастание его прочности. Обладает ударовязкостью, пластичностью, трещиностойкостью. Даже при очень больших нагрузках (например, при землетрясениях), полистиролбетон только деформируется (сминается, гнется, продавливается), но не разрушается (не колется и не ломается). Полистиролбетон - единственный стеновой

материал обладающий таким уникальным качеством, как трещиностойкость (в отличии от своих "конкурентов" керамзитобетона, пенобетона и газобетона, которые являются хрупкими материалами, не имеющими свойств пластичности или растяжения на изгиб). Благодаря повышенной в 1,3-1,5 раза прочности на растяжение (осевое и при изгибе), в сейсмоопасных регионах полистиролбетон основной строительный материал (сейсмостойкость зданий из полистиролбетона - до 9 баллов по шкале Рихтера). В то же время он влагостоек и трудногорюч. При изменении влажности полистиролбетон не деформируется. Влага не влияет на теплоизолирующие свойства полистиролбетона и не вызывает образования в нем бактерий и плесени. Группа горючести Г1 по ГОСТ 30244-94; группа воспламеняемости В1 по ГОСТ 30402-96; умеренная дымообразующая способность по ГОСТ 12.1.044-89). При увеличении температуры шарики (гранулы) полистирола сжимаются, оставляя в местах контакта с открытым огнём пористый и довольно прочный цементный каркас, сохраняющий практически все свойства материала.

В качестве вибродышащих могут быть рекомендованы и другие материалы, широко обсуждаемые в публикациях [11.6-11.9].

ГЛАВА 12. ОСОБЕННОСТИ ЗАЩИТЫ ПРИ СОЧЕТАННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ И ДРУГИХ ФАКТОРОВ НА ЧЕЛОВЕКА

12.1. ОБЩИЕ ПОДХОДЫ

Наибольшее воздействие на электротехнические устройства и биосферу оказывает среда, в которой сочетанно воздействуют разные физические поля и излучения (в дальнейшем физические факторы волновой природы). В таких случаях подбор защитных материалов усложняется, и в ряде случаев требует комбинированных подходов к защитным устройствам.

В среде обитания биосфера подвергается, как правило, одновременному воздействию большего числа физических факторов волновой природы. К ним относятся ЭМП широкого частотного спектра; неионизирующие электромагнитные излучения (видимое излучение, инфракрасное излучение, ультрафиолетовое и лазерное излучения); ионизирующие излучения; виброакустические воздействия (шум, инфразвук, ультразвук, вибрации) и др. Эффект от одновременного воздействия таких факторов может оказаться более значительным, чем при изолированном воздействии того или иного одинарного фактора.

Рассматривая сочетанное действие неблагоприятных физических полей и других факторов, следует отметить, что на высоких уровнях воздействия наблюдается потенцирование, антагонизм и независимый эффект. На низких уровнях, как правило, наблюдаются аддитивные зависимости.

Человек, будучи элементом биосферы, в течение всей своей жизни подвергается воздействию комплекса факторов производственной и окружающей среды, среди которых одно из ведущих мест занимают физические поля и излучения. При определенных условиях каждый из них, а также их разнообразные комбинации могут приводить к существенному напряжению адаптационных возможностей организма человека, а в дальнейшем и к срыву адаптации. Стрессовое воздействие данных факторов определяется как их физическими характеристиками (дозовая нагрузка), так и функциональным состоянием ведущих систем организма, его индивидуальной чувствительностью к раздражителю.

В качестве примера комплексного подхода можно привести результаты исследований условий труда и состояния здоровья специалистов, осуществляющих эксплуатацию средств радиолокации, радиона-

вигации и связи. В процессе осуществления своей трудовой деятельности эти лица подвергаются воздействию целого комплекса факторов производственной среды и трудового процесса. Ведущими среди физических факторов являются электромагнитные излучения широкого диапазона частот, а также шум и для ряда подразделений - вибрация. Кроме того, для персонала, обслуживающего системы локации, навигации и связи, важную роль играют микроклиматические параметры, так как часть работ производится не в помещении, а на открытых территориях. Высокая личная ответственность за обеспечение полетов является дополнительным стрессовым фактором.

Другим примером сочетанного действия вредных факторов на человека может служить работа с компьютером. Сегодня число пользователей компьютерами составляет в России свыше 50 млн. человек. Не следует забывать, что далеко не все компьютеры отвечают санитарно-гигиеническим требованиям, пользователи в процессе работы в этих случаях подвергаются комплексному воздействию вредных факторов.

Исследования показали, что неблагоприятные изменения функционального состояния пользователей персональных компьютеров определяются сочетанием рядом факторов: уровнями генерируемых электромагнитных полей, параметрами освещенности, микроклиматом в помещении, состоянием здоровья, возрастом, интенсивностью и длительностью работы с компьютером.

В отечественной и зарубежной литературе имеются довольно многочисленные сведения, в той или иной мере отражающие попытку интегрально оценить этот комплекс воздействующих на организм человека факторов и определить значимость каждого из них в их взаимосвязи.

Имеются предложения об изменении гигиенических требований к одному из факторов, действующих в комплексе с другими.

Современные математические методы позволяют подойти к решению этой гигиенической проблемы с позиций комплексного нормирования факторов на основе построения модели, отражающей взаимосвязь совокупности показателей функционального состояния человека со всей совокупностью факторов среды.

При анализе многофакторных исследований важным является выбор адекватного статистического метода анализа и обобщения экспериментальных данных. Однако традиционный подход с использованием многофакторного дисперсионного анализа и F -критерия Фишера для оценки значимости, как отдельного фактора, так и их сочетаний не позволяет решить задачу прогнозирования функционального состояния

человека (ФСЧ) по значениям параметров внешней среды. В этом случае исследователь сталкивается с необходимостью использования ряда регрессионных моделей, описывающих взаимосвязь отдельного показателя функционального состояния человека с линейной или нелинейной комбинацией факторов внешней среды (ФВС):

$$Y_i = F(X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{ij}), \quad (12.1)$$

где Y_i - i -й из m показателей оценки ФСЧ, а $X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{ij}$ - ФВС.

Число таких уравнений (в зависимости от количества используемых показателей ФСЧ) может быть весьма велико, что затрудняет их практическое использование. Кроме того, в этом случае по существу имеет место сведение многомерной (по совокупности параметров ФСЧ) задачи количественной оценки системного ответа организма человека, находящегося в неблагоприятных условиях, к m одномерным задачам. Такой подход не является в полной мере адекватным. Наиболее логичным является изучение многомерной системы многомерными математическими методами.

Известен способ гигиенической оценки влияния содержащихся в воздухе физических факторов волновой природы на организм человека по кратности превышения предельно допустимых уровней содержащихся в воздушной среде физических факторов. Например, в отношении одного содержащегося в воздухе физического фактора или группы факторов, обладающих между собой аддитивным действием на организм человека, гигиеническая оценка влияния факторов определяется по формуле [12.15]:

$$\frac{TU_1}{ПДУ_1} + \frac{TU_2}{ПДУ_2} + \dots + \frac{TU_n}{ПДУ_n} \leq 1, \quad (12.2)$$

где TU_1, TU_2, \dots, TU_n - текущие уровни содержащихся в воздухе физических факторов (H - А/м, E - В/м, P - Па (H/m^2) и др.); $ПДУ_1, ПДУ_2, \dots, ПДУ_n$ - нормируемые предельно допустимые уровни содержащихся в воздухе физических факторов (тех же размерностей, что и TU_i).

Для физических факторов, обладающих между собой независимым действием на организм, гигиеническая оценка влияния содержа-

щихся в воздухе факторов на организм человека производится на основе определения кратности превышения их предельно допустимых уровней, но по наиболее опасному фактору.

Таким образом, в имеющемся способе гигиенической оценки влияния содержащихся в воздухе физических факторов на организм человека и действующих нормативах содержания физических факторов в атмосферном воздухе населенных мест и в воздухе рабочей зоны производственных помещений, категория предельно допустимого уровня (ПДУ) физического фактора представлена в качестве критерия санитарного благополучия воздушной среды, но в формах, не имеющих отношения, например, к факторам трудового процесса. Вместе с тем, ПДУ физического фактора создается для человека, который является субъектом трудового процесса и, следовательно, имеет к факторам трудового процесса непосредственное отношение. Вывод о необходимости учета взаимосвязи между факторами среды и трудового процесса при гигиенической оценке влияния содержащихся в воздухе физических полей и излучений на организм человека вытекает также из определения понятия ПДУ. Предельно допустимый уровень воздействия физического фактора - это такой его уровень, воздействие которого, независимо от наличия других факторов, не превышающих нормативов, при работе установленной продолжительности в течение всего трудового стажа не вызывает заболевания или другого отклонения в состоянии здоровья как самого работающего, так и его потомства.

Описанный способ гигиенической оценки влияния содержащихся в воздухе физических факторов на практике часто приводит к противоречивым ситуациям, когда при различных мышечных нагрузках, категориях тяжести труда и обусловленных ими функциональных состояниях организма (в том числе и превышающих предельно допустимые), гигиеническая характеристика, например, производственной среды по критерию кратности превышения ПДУ физических факторов в воздухе рабочей зоны, получает одну и ту же оценку. Между тем известно, что физическая мышечная нагрузка оказывает мощное и разностороннее влияние на все органы и системы организма, изменяет условия резорбции, распределения, превращения и течение интоксикации в целом. Динамические физические нагрузки активизируют основные вегетативные системы жизнеобеспечения - дыхание и кровообращение, усиливают активность нервно-эндокринной системы, а также многие ферментативные процессы. В связи с этим при наличии сопутствующих воздействию содержащихся в воздухе других физических факто-

ров, превышающих нормативные значения, в данных условиях критерий ПДУ, согласно определению этого понятия, не может являться гарантом безопасного уровня.

Таким образом, описанный способ гигиенической оценки влияния содержащихся в воздухе физических факторов волновой природы на организм человека недостаточно точно характеризует степень этого влияния при наличии сочетанного воздействия на человека других факторов, превышающих нормативы.

В целях обеспечения преемственности по отношению к традиционным принципам гигиенической оценки загрязнения воздушной среды физическими факторами волновой природы и удобства применения получаемых данных в различного рода исследованиях условий труда человека в [14.15] предложена другая формула, однако нет экспериментальных подтверждений её справедливости.

Ниже рассмотрены некоторые подходы к оценке влияния физических факторов волновой природы в техносфере на функциональное состояние человека на основе полученных интегральных показателей ФСЧ и ФФС и установления взаимосвязи между ними.

12.2. ОСОБЕННОСТИ СОЧЕТАННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ШИРОКОГО СПЕКТРА ЧАСТОТ

Сочетанное воздействие ЭМП с различными длинами волн, частотами и интенсивностями сказывается на работе жизненно важных систем организма, прежде всего нервной, иммунной, эндокринной и репродуктивной систем. Сочетанное воздействие ЭМП на нервную систему приводит к изменениям высшей нервной деятельности человека.

Имеющиеся результаты свидетельствуют о возможной модификации биоэффектов ЭМП как тепловой, так и нетепловой интенсивности под влиянием ряда факторов как физической, так и химической природы. Условия комбинированного действия ЭМП и других факторов позволили выявить значительное влияние ЭМП сверхмалых интенсивностей на реакцию организма, а при некоторых сочетаниях может развиваться ярко выраженная патологическая реакция.

В последние годы появились публикации, в которых имеются весьма важные указания о наличии так называемых резонансных эф-

фффектов при воздействии на биобъекты ЭМП, о роли в биоэффектах некоторых форм модуляции; показано наличие частотных и амплитудных окон, обладающих высокой биологической активностью на клеточном уровне, а также при воздействии ЭМП на центральную нервную и иммунную системы. Во многих работах указываются на "информационный" механизм биологического действия ЭМП. Опубликованы данные о неадекватных патологических реакциях людей на модулированные электромагнитные поля.

Однако, действующие гигиенические нормативы, основанные лишь на регламентации энергетической нагрузки, слагаемой из интенсивности и времени контакта с ЭМП, не позволяют распространить ПДУ на условия воздействия ЭМП со сложными физическими характеристиками, в частности применительно к конкретным режимам модуляции.

При проведении электромагнитного мониторинга не следует забывать о структуре поля, которая в общем случае может быть весьма сложной и представлять собой до шести компонент напряженности ЭП и МП. В отечественной и зарубежной санитарно-гигиенической практике принята энергетическая концепция учета отдельных составляющих поля. Если в данной точке пространства создается ЭМП, описываемое несколькими несинфазными пространственными компонентами в декартовой E_x, E_y, E_z (или H_x, H_y, H_z) или круговой цилиндрической E_r и E_z (или H_ϕ) системах координат (это характерно для линий электропередачи), то напряженность поля от i -го источника ($i \in [1, n]$) - E_{Σ_i} (или H_{Σ_i}) от каждого такого технического средства определяется следующим образом:

$$E_{\Sigma_i} = \sqrt{E_{x_i}^2 + E_{y_i}^2 + E_{z_i}^2}, \quad E_{\Sigma_i} = \sqrt{E_{r_i}^2 + E_{\phi_i}^2 + E_{z_i}^2}, \quad (12.3)$$

$$H_i = \sqrt{H_{x_i}^2 + H_{y_i}^2 + H_{z_i}^2}, \quad H_{\Sigma_i} = \sqrt{H_{r_i}^2 + H_{\phi_i}^2 + H_{z_i}^2}. \quad (12.4)$$

С критериями оценки опасности ЭМП тесно связан характер воздействия, под которым понимают совокупное загрязнение окружающей среды ЭМП и другими факторами. Характер воздействия ЭМП может быть:

1. Изолированным - от одного источника ЭМП. В этом случае оценка опасности электромагнитной обстановки производится непосредственно по предельно допустимому уровню ЭМП, определяемому по виду и рабочей частоте технических средств.

2. Сочетанным - от двух и более источников ЭМП, имеющих одинаковую величину предельно допустимого уровня одного и того же нормируемого параметра.

3. Смешанным - от двух и более источников ЭМП, имеющих различные величины предельно допустимых уровней одного или различных нормируемых параметров.

4. Комбинированным - в случае воздействия ЭМП и какого-либо другого неблагоприятного загрязняющего фактора (материального или энергетического).

Сочетанное, смешанное и комбинированное воздействие ЭМП предполагает введение критериев и алгоритмов, по которым производится оценка состояния окружающей среды.

Воздействие может быть постоянным и прерывистым. Типичным случаем прерывистого воздействия является облучение от сканирующих антенн радиолокационных станций.

При воздействии на окружающее пространство i источников ЭМП широкого частотного спектра суммарные напряженности ЭМП могут быть рассчитаны в виде:

$$E_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^n E_{\Sigma_i}^2}, \quad H_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^n H_{\Sigma_i}^2} \quad (12.5)$$

Подводя итог, отметим, что нормирование ЭМП осуществляется в зависимости от частоты ЭМП (с увеличением частоты имеется четкая тенденция уменьшения предельно допустимого уровня, т. е. нормы становятся строже), от категории облучаемых людей (население, производственный персонал, пользователи), от вида технических средств (телевидение, сотовая связь, радиолокаторы, ЛЭП, печи СВЧ, видеодисплейные терминалы и т. д.).

Защитные устройства от сочетанного воздействия ЭМП с различными длинами волн, частотами и интенсивностями должны содержать многослойные материалы, каждый из которых может быть эффективен при защите от соответствующей частотной зоны ЭМП, а в совокупности многослойный материал экрана должен перекрывать весь опасный частотный диапазон.

12.3. ОСОБЕННОСТИ СОЧЕТАННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ И ДРУГИХ ФИЗИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ЧЕЛОВЕКА

В настоящее время окружающая природная среда и значительная часть человечества подвержены постоянному воздействию не только электромагнитного излучения, но и радиации и другим экологически опасным факторам, большинство из которых являются продуктами хозяйственной деятельности человека.

В связи с ростом антропогенного воздействия на биосферу остро стоит задача разработки способов неспецифической защиты клеток от экологически опасных факторов. Прослеживается также связь этой проблемы с изучением механизмов адаптации живых организмов к изменяющимся условиям природной среды.

Перспективным направлением в данных исследованиях является изучение эффектов и механизмов действия электромагнитного излучения (ЭМИ) миллиметрового (ММ) или крайне высоко частотного (КВЧ) диапазона на биологические объекты различного уровня организации, от отдельных клеточных компонентов, изолированных клеток и микроорганизмов до организма животных и человека. Считают, что низкоинтенсивное ММ-излучение ответственно за информационное обеспечение жизнедеятельности клетки и играет значительную роль в эволюции живых систем [12.8].

Характерной особенностью воздействия ЭМИ ММ-диапазона на биообъекты является наличие резонансных эффектов, в проявлении которых ключевая роль отводится структурным и волновым свойствам воды. Предполагается, что волны на определенных «резонансных» частотах распространяются в водных средах с очень малыми энергетическими потерями, поэтому могут проникать на большую глубину облучаемого объекта и взаимодействовать с биологическими структурами. Доказана способность излучения резонансных частот КВЧ-диапазона корректировать реакцию живых организмов на воздействие химических веществ и физических факторов. Обнаружено, что электромагнитные волны компенсируют отрицательное влияние атомов тяжелых металлов на жизнедеятельность гидробионтов, оказывают реабилитирующий и протекторный эффекты при воздействии на человека ионизирующего излучения и электромагнитных полей других диапазонов.

Малоизученным на шкале электромагнитных полей (ЭМП) остается излучение коротковолновой части ММ-диапазона и субмиллиметрового (субММ) диапазона длин волн, которое называют терагерцовым

(ТГц). Известно, что мембрана живой клетки находится в возбужденном колебательном состоянии в диапазоне частот 0.1-1.0 ТГц, а в интервале 0.05-0.40 ТГц лежит подавляющее большинство вращательных молекулярных спектров низкомолекулярных газов, играющих важную роль в процессах обмена веществ и в проявлении токсических эффектов. Поэтому поиск новых биологически значимых частот в ТГц-диапазоне ЭМИ и изучение биоэффектов их воздействия в сочетании с токсичными и физиологически активными веществами представляют важную и актуальную задачу экологии.

Среди последних исследований следует отметить работу [12.8], в которой приведены результаты изучения следующих воздействий на биосферу и человека:

- определены с помощью гидробиологической тест-культуры *Paramecium caudatum* резонансные частоты электромагнитного излучения низкой интенсивности в терагерцовом диапазоне;

- исследованы изолированные и комбинированные эффекты воздействия никотина и электромагнитного излучения резонансных частот на клетки простейших *Paramecium caudatum* и эритроциты лабораторных животных;

- исследованы эффекты комбинированного действия сероводорода и электромагнитного излучения низкой интенсивности на лабораторных животных;

- определены средне-летальные концентрации сероводорода, облученного на частотах его резонансного поглощения.

В результате экспериментальных исследований [12.8] осуществлен поиск биологически эффективных частот в ТГц-диапазоне, изучены эффекты воздействия ЭМИ резонансных частот в сочетании с водными растворами никотина и газообразным сероводородом на биологические объекты разного уровня организации, что позволило сформулировать следующие выводы:

1. Выявлен резонансный характер низкоинтенсивного ЭМИ в диапазонах частот 120-170 и 270-380 ГГц с помощью гидробиологической тест-культуры *Paramecium caudatum*. Установлено, что излучение на частотах 151.9, 155.7, 156.6, 161.3 и 167.1 ГГц, приводит к наибольшему отклонению тест-реакции инфузорий от контроля.

2. Показано, что никотин в концентрациях 10^4 и 10^9 моль/л изменяет тест-реакцию инфузорий *P. caudatum*, вызывая значительное увеличение их подвижности. При сочетании действия никотина в малой концентрации (10^9 моль/л) с ЭМИ на резонансных частотах 156.6

и 161.3 ГГц обнаружено усиление, а на частоте 167.1 ГГц - снижение эффекта воздействия никотина.

3. Отмечена корреляция эффектов воздействия ЭМИ частот 155.7 и 167.1 ГГц на клетки инфузорий и мембраны эритроцитов.

4. Установлено снижение токсичности сероводорода в 1.7-1.9 раза в результате воздействия на газ ЭМИ низкой интенсивности на частотах его резонансного поглощения (167 и 303 ГГц).

В ряде работ исследовано совместное воздействие на биосферу ЭМП и ряда физических и химических загрязнений. В связи с увеличением антропогенной нагрузки на организм и биосферу в целом остро стоит задача разработки способов неспецифической защиты организма от экологически опасных факторов. В последние годы большое внимание специалистов уделяется электромагнитному ММ-излучению низкой интенсивности. Изучается возможность его применения для решения экологических задач: описана его способность снижать токсичность водной среды; установлены его реабилитирующий и протекторный эффекты при воздействии на человека ионизирующего излучения и неблагоприятного действия электромагнитных полей других диапазонов. Большой интерес вызывает ЭМИ терагерцового диапазона, в котором находятся вращательные спектры низкомолекулярных газов, собственные резонансные частоты некоторых биоструктур и воды [12.8].

При разработке защитных устройств от воздействия неионизирующих электромагнитных излучений и других экологически опасных факторов можно воспользоваться имеющимися в опубликованной литературе (например, [12.8]) сведениями об опасных резонансных для человеческого организма частотах ЭМП и других физических факторов и в соответствии с ними использовать многослойный материал, каждый слой которого в состоянии существенно снизить интенсивность соответствующей резонансной для организма человека частоты волнового воздействия.

12.4. ОСОБЕННОСТИ СОЧЕТАННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА БИОСФЕРУ И ЧЕЛОВЕКА

На основании общетеоретических положений отечественной медицины труда, международного опыта ВОЗ, МОТ, ИСО, МЭК по стандартизации, гармонизации нормативов и методов их контроля в на-

стоящее время разработана новая методология нормативно-прогностической регламентации физических факторов волновой природы в биосфере. В ней сочетаются традиционное гигиеническое нормирование с обоснованием предельно допустимых уровней физических факторов и концепция оценки риска от их воздействия. Основопологающими принципами новой системы регламентации, применительно к виброакустическим факторам, являются следующие [12.3]:

1. Единое нормирование виброакустических факторов производственной среды и среды обитания для учета и оценки их суммарной нагрузки на человека.

2. Интегральная, одночисловая оценка виброакустических факторов, воздействующих на человека-оператора, по экспозиции, вместо традиционных частотно-амплитудных характеристик.

3. Дифференцированное нормирование виброакустических факторов с учетом тяжести и напряженности трудового процесса (а не по принципу технической достижимости или отраслевому принципу).

4. Оценка риска нарушения здоровья при воздействии виброакустических факторов с целью управления качеством среды (производственной, окружающей, обитания) и вероятностью развития профессиональных, производственно обусловленных заболеваний.

5. Оценка и нормирование виброакустических колебаний в комплексе с другими физическими факторами и факторами иной природы, воздействующими на работающих в реальных производственных условиях.

Отличительная особенность гигиенического нормирования виброакустических колебаний в том, что степень вредности или опасности воздействующих уровней факторов устанавливается, исходя из результатов сопоставления временных смещений порогов восприятия адекватных анализаторных систем в динамике рабочего дня и постоянных необратимых изменений у работающих. Кроме того, при гигиеническом нормировании шума, вибрации, инфразвука, ультразвука наметился переход от устоявшегося частотного принципа (то есть спектральных характеристик, имеющих важное значение, прежде всего, для разработчиков инженерно-технических, архитектурно-планировочных и других мер по борьбе с виброакустическими колебаниями) к одночисловой интегральной оценке факторов по экспозиции. Новая система регламентации физических факторов хорошо адаптирована для решения задач социально-гигиенического мониторинга. Целенаправленный переход на новую систему регламентации физических факторов и внедрение на ее основе социально-гигиенического мониторинга переори-

ентирует гигиеническую профилактику на оценку риска в целях управления качеством среды (окружающей, производственной, обитания) и здоровья работающего населения. В связи с этим несомненный интерес представляет система прогнозов вероятности развития профессиональной патологии от воздействия шума, вибрации, контактного ультразвука и других физических факторов. Вопросы прогнозирования риска вибрационных нарушений являются актуальными, поскольку затрагивают закономерности формирования патологии и непосредственно связаны с возможностью предотвращения развития заболевания. Существует несколько моделей прогноза вероятности развития вибрационных нарушений у работающих с ручным виброинструментом. Первая модель прогностической оценки вероятности развития вибрационной болезни была представлена в приложении к стандарту ИСО 5349.2 (1986) в виде «Руководства по оценке воздействия вибрации, передающейся на руки человека». Эта модель дозозффективной зависимости вероятности вибрационной болезни положила начало разработке ряда отечественных моделей, основанных на реальной диагностике вибрационной болезни 1-й и 2-й степени в соответствии с «Классификацией вибрационной болезни от воздействия локальной вибрации», утвержденной Минздравом России № 10-11/143 от 9 декабря 1985 г., определяющих вероятность развития вибрационной болезни в зависимости от воздействующей экспозиции (дозы) вибрации и стажа работы в профессии. Сопоставление данных модели стандарта ИСО 5349.2 с данными отечественных моделей свидетельствует об их существенных различиях. Выявленное несовпадение результатов прогноза по модели стандарта ИСО и отечественным моделям обусловлено различием во взглядах отечественных и зарубежных ученых на патогенез вибрационной патологии, разными подходами к диагностике вибрационных нарушений и используемыми при этом критериями. Можно предположить, что при выявлении вибрационной патологии в нашей стране определенная часть заболеваний либо не диагностируется вообще, либо выявляется на стадии выраженных признаков. В связи с этим при составлении прогноза по отечественным моделям рассчитанные показатели вероятности заболевания оказываются ниже реальных, которые, однако, не достигают величин, прогнозируемых по стандарту ИСО. Некоторые специалисты считают, что стандарт ИСО 5349.2 значительно переоценивает риск вибрационной болезни: в два-три раза по частоте случаев и до 10 раз по латентности развития. Среди отечественных моделей наиболее адекватной для оценки риска развития вибрационной болезни следует считать модель, разработанную в [14.13]. На ос-

новании анализа распределения частоты случаев вибрационной болезни 1-й степени среди работающих на виброопасных участках машиностроительных предприятий средней полосы России выведена математическая зависимость вероятности появления вибрационной патологии у работающих от уровня воздействующей вибрации и продолжительности контакта. В соответствии с установленной зависимостью воздействие вибрации с эквивалентным уровнем 112 дБ не приведет к развитию заболевания на протяжении 32 лет работы у 90% работающих, тогда как уровень 124 дБ будет безопасным для того же процента работающих лишь в течение четырех лет. На основании гигиенических, клинико-физиологических исследований выявлена дозоэффективная зависимость вероятности развития синдрома вегетативно-сенсорной полиневропатии вибрационной болезни от уровня общей вибрации и стажа работы. На протяжении последних лет большое внимание уделяется изучению сравнительно новых техногенных факторов инфразвука и контактного ультразвука. Проведены исследования по оценке степени вредности инфразвука и низкочастотных акустических колебаний, их совместного действия с другими факторами производственной среды, изучены механизмы влияния и биологического восприятия инфразвука. На основании литературных данных и собственных материалов об объективных и субъективных признаках инфразвукового воздействия разработана классификация зон риска для здоровья человека в зависимости от параметров инфразвука. Установлено, что кратковременное интенсивное воздействие инфразвука на человека обуславливает высокую степень вероятности развития тягостного состояния сенсорно-сомато-вегетативно-висцерального симптомокомплекса, что позволило впервые обосновать представление об инфразвуковом гипоталамическом синдроме (диэнцефальном кризе). Разработана концептуальная патогенетическая модель инфразвукового воздействия на человека, согласно которой особенностью повреждающего действия инфразвука является развитие сочетанных взаимосвязанных патологических процессов. Один из них обусловлен развитием общего адаптационного синдрома, другой - альтерацией нервных образований головного мозга, органов-мишеней эндокринной системы и внутренних органов. Основным патогенетическим звеном этого процесса является развитие тканевой гипоксии вследствие церебральной гипертензии из-за ликворгемодинамических и микроциркуляторных нарушений. Риск возникновения симптомокомплекса (синдрома) может быть рассчитан по определенной формуле. Полученные материалы использованы при обосновании гигиенических, клинико-физиологических, медико-

биологических критериев нормирования инфразвука, учитывающих не только состояние статокINETической системы, но и в равной степени реакции целостного организма, что нашло отражение в новых санитарных нормах. Действующие санитарные правила СП 2.2.4/2.1.8.583-96 «Инфразвук на рабочих местах, в жилых и общественных помещениях и на территории жилой застройки» разработаны с позиций дифференцирования предельно допустимых уровней фактора в зависимости от степени тяжести и напряженности трудового процесса (в производственных помещениях и на территории предприятий) и составляют 100 и 95 дБ Лин соответственно. Отечественным гигиенистам принадлежит приоритет в обосновании принципов, критериев и методов гигиенической оценки и нормирования ультразвука. Следует отметить, что в результате снижения на 15-25 дБ уровней воздушного ультразвука, генерируемого современным ультразвуковым оборудованием, по сравнению с уровнем оборудования предыдущего поколения проблема воздушного ультразвука отошла на второй план. Вместе с тем, использование ультразвукового оборудования и аппаратуры в промышленности, медицине сопровождается ростом численности работающих с источниками контактного ультразвука, подвергающихся его неблагоприятному воздействию. В целях унификации критериев и методов оценки условий труда работающих с источниками ультразвуковых колебаний разработана «Гигиеническая классификация ультразвука, воздействующего на человека-оператора», которая включена в действующие санитарные нормы. Развивающиеся под влиянием контактного ультразвука неблагоприятные эффекты, обладающие способностью к накоплению, проявляются обычно сильнее в зоне контакта - в пальцах, кистях рук. Клинико-физиологические исследования показали, что для ультразвукового воздействия характерны сенсорные, вегетативно-сосудистые нарушения и изменения опорно-двигательного аппарата рук в виде вегетативно-сенсорной (ангионевроз) полиневропатии рук, которая впервые включена в список профессиональных заболеваний в 1989 году. По результатам многолетних исследований разработана математическая модель прогноза вероятности развития профессиональной патологии у работающих с источниками контактного ультразвука различной частоты в зависимости от интенсивности и длительности контакта. Модель позволяет определять безопасный стаж работы в профессии, что дает возможность управлять риском нарушения здоровья за счет «защиты временем». В действующих санитарных нормах реализована концепция совместного действия воздушного и контактного ультразвука путем установления понижающей поправки, равной 5

дБ, к нормативному уровню контактного ультразвука. В условиях современного производства на фоне происходящей интеллектуализации труда, роста удельного веса операторских профессий повышается значение шумов средних уровней (ниже 80 дБА), не вызывающих потерь слуха, но оказывающих мешающее, раздражающее, утомляющее действие. Оно суммируется с действием напряженного труда и при возрастании стажа может привести к общесоматическим нарушениям и заболеваниям. В связи с этим был обоснован биологический эквивалент действия на организм шума и нервно-напряженного труда, равный 10 дБА шума на одну категорию напряженности трудового процесса. Этот принцип положен в основу действующих санитарных норм по шуму. Оценка и прогнозирование риска нарушений от действия шума предполагают количественную оценку как специфических, так и неспецифических, экстраауральных эффектов. В соответствии с рекомендациями стандарта ИСО 1999 (1990) «Акустика. Определение профессиональной экспозиции шума и оценка нарушений слуха, вызванных шумом» и на основе отечественных критериев оценки потерь слуха разработан прогноз развития тугоухости. В России степень профессиональной тугоухости оценивается по средней величине потерь слуха на трех речевых частотах (0,5 - 1 - 2 Гц). Величины более 10, 20, 30 дБ соответствуют I, II, III степени снижения слуха. Причем у женщин из-за более медленного, чем у мужчин, нарастания возрастных изменений слуха данные слегка отличаются: для стажа более 20 лет у женщин безопасный стаж на один год больше, чем у мужчин, а для стажа более 40 лет - на два года. Правда, стандарт не учитывает характер трудовой деятельности, как это предусмотрено в санитарных нормах, дифференцированных по тяжести и напряженности трудового процесса и тем самым охватывающих неспецифическое действие шума, что важно для сохранения здоровья и работоспособности лиц операторских профессий. В настоящее время подготовлено информационное письмо «Прогнозирование потерь слуха от действия производственного шума по стандарту ИСО 1999 (1990)», в котором изложены принципиальные положения этого стандарта и даны рекомендации по его применению. Проблема гигиенической оценки импульсных шумов актуальна как в нашей стране, так и за рубежом. Действующие санитарные нормы по шуму устанавливают предельно допустимые уровни (далее ПДУ) для импульсного шума на 5 дБ ниже, чем для постоянных шумов, и дополнительно ограничивают максимальный уровень звука (125 дБА), но не регламентируют пиковые значения. Тем самым нормы ориентированы на громкость шума, а не на травматическое действие его пиков, яв-

ляющееся общепризнанным. В последние десятилетия проведены исследования, позволившие уточнить ПДУ электромагнитных полей (далее ЭМП) в ряде частотных диапазонов с учетом режимов облучения и ввести дозный (энергетический) подход, обосновывающий более адекватную оценку облучаемости персонала. Основным нормативным документом, регламентирующим допустимые уровни воздействия ЭМП, является СанПиН 2.2.4/ 2.1.8.055-96 «Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона». В ПДУ наряду с интенсивностными параметрами (Е, Н, ППЭ) нормируется энергетическая экспозиция за рабочий день, выражающаяся произведением Е2, Н2 или ППЭ за время воздействия Т. Такой подход позволяет определять допустимые уровни ЭМП с учетом времени воздействия исходя из предельно допустимой энергетической экспозиции. В последнее время широкое распространение получили такие источники ЭМП, как видео-дисплейные терминалы (далее ВДТ) и радиотелефоны. Достаточно широкий спектр частот, излучаемых ВДТ, и особенности пользования радиотелефонами с максимальным приближением к голове пользователя потребовали разработки отдельных гигиенических регламентов. Были разработаны «Временные допустимые уровни электромагнитных излучений, создаваемых системами сотовой радиосвязи» (ГН 2.1.8/2.2.4.019-94) и СанПиН 2.2.2.542-96 «Гигиенические требования к видео-дисплейным терминалам, персональным электронно-вычислительным машинам и организации работ». Однако расширение частотного диапазона систем сотовой связи, увеличение числа пользователей радиотелефонами и ВДТ обуславливают необходимость проведения фундаментальных исследований влияния создаваемых ими ЭМП на организм человека с целью разработки научно обоснованных регламентов, уточнения методов измерения и гигиенической оценки. В связи с проведением социально-гигиенического мониторинга предполагается разработка методов оценки влияния ЭМИ на показатели здоровья населения, проживающего в районах с неблагоприятной электромагнитной обстановкой. Поэтому необходима организация эпидемиологических исследований различных контингентов населения для апробации действующих ПДУ, изучения отдаленных последствий длительного воздействия ЭМП малой интенсивности. Нормирование микроклимата на рабочих местах и разработка мер защиты от перегревания и охлаждения базируются на результатах теоретических, экспериментальных и производственных исследований теплообмена человека с окружающей средой, порогов температурной чувствительности организма, состояния функциональных систем, обеспечивающих температурный гомеостаз, а также на

изучении показателей здоровья работающих, имеющих как научное, так и практическое значение. Для разработки нормативных требований к параметрам микроклимата производственных помещений использованы показатели критериев, характеризующие тепловое состояние работающего за рабочую смену либо как оптимальное, либо как допустимое. При этом если в отношении оптимального теплового состояния человека за рабочую смену существует вполне определенная позиция отечественных и зарубежных исследователей, и их мнения практически не расходятся, то в отношении оценки допустимого охлаждения и перегревания организма это мнение неоднозначно. Это определяет различные требования к уровню термического стресса. К допустимым в период рабочей смены отнесены такие величины показателей теплового состояния человека, которые не вызывают неприятных теплоощущений, обуславливающих желание покинуть рабочее место для нормализации теплового состояния, увеличить или уменьшить теплоизоляцию одежды; не изменяют существенно работоспособность человека, но, при этом не исключено ее снижение у 20 % индивидуумов на 10 %. Пребывание в нагревающей или охлаждающей среде не является риском нарушения состояния здоровья. Показано, что кратковременное пребывание в охлаждающей или нагревающей среде может сопровождаться большим охлаждением или перегревом организма (предельно допустимым), но при условии, что в остальные периоды рабочей смены трудовая деятельность человека осуществляется в микроклиматических условиях, способствующих нормализации теплового состояния организма, то есть должно быть выдержано условие сохранения среднесменных величин показателей теплового состояния на допустимом уровне. Нормативные требования к оптимальным и допустимым показателям микроклимата, а также показателям, характеризующим различные классы вредных и опасных условий труда, разработаны на основе их взаимосвязи с критериальными показателями теплового состояния человека и его здоровья. Для оценки нагревающего микроклимата представлены требования к величинам интегрального показателя термической нагрузки среды (далее ТНС-индекс), отражающего степень влияния нагревающего микроклимата на тепловое состояние человека и его здоровье. Рассчитаны величины стандартизованного относительного риска смерти (далее COP) от заболеваний сердечно-сосудистой системы у рабочих в нагревающей среде в зависимости от превышения на рабочих местах верхней границы допустимого уровня ТНС-индекса. Вопросы защиты от термического стресса применительно к конкретным условиям трудовой деятельности представлены в Ме-

тодических рекомендациях. В условиях производственной деятельности человек, как правило, подвергается одновременному воздействию различных факторов внешней среды. В отечественной и зарубежной литературе имеются многочисленные сведения, в той или иной мере отражающие оценку их совместного действия. Однако применяемый в этих целях традиционный подход к интегральному изучению происходящих в организме изменений с использованием многофакторного дисперсионного анализа Р- критерия Фишера для оценки значимости факторов не позволяет решать задачу прогнозирования функционального состояния человека в целом. Исследователь сталкивается с необходимостью использования ряда регрессионных моделей, описывающих взаимосвязь отдельного показателя функционального состояния человека (далее ФСЧ) с комбинацией факторов внешней среды (далее ФВС). Число таких уравнений в зависимости от количества показателей ФСЧ может быть весьма велико, что вызывает затруднения на практике. В наших исследованиях для комплексной оценки влияния ФВС (шум, вибрация, температура воздуха, освещенность) на ФСЧ использована модель, связывающая всю совокупность показателей функционального состояния человека со всей совокупностью показателей факторов внешней среды. Полученная модель позволила выявить, что комплексное воздействие ФВС в зависимости от уровня здоровья каждого человека может усиливать или ослаблять системный ответ организма. Исходя из взаимосвязи интегральных показателей функционального состояния человека и физических факторов среды, разработаны вероятностные номограммы для прогнозирования ФСЧ по его интегральному показателю ФВС. Данная методология может использоваться для решения различных гигиенических задач, касающихся оценки и нормирования комплекса физических факторов. При этом число исследуемых физических факторов может быть расширено, а в качестве ответных реакций могут использоваться не только реакции со стороны различных функциональных систем, но и показатели здоровья, что позволит прогнозировать риск его нарушения.

При разработке устройств, способных существенно снизить нагрузку на человека при сочетанном воздействии различных виброакустических колебаний, необходимо использовать комбинированные многослойные материалы, состоящие из виброизолирующих, вибропоглощающих, виброгасящих, вибродемпфирующих и вибродышащих материалов (см. гл. 11).

12.5. ОЦЕНКА СОЧЕТАННОГО ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАЦИЙ ГЕОМАГНИТНОГО И РАДИАЦИОННОГО ПОЛЕЙ НА ЧЕЛОВЕКА

Введение. В последние десятилетия увеличивается количество биотропных факторов различного происхождения, воздействия которых угрожают сохранению постоянства внутренней среды организма, вызывая напряжение регуляторных и гомеостатических систем [12.10]. Одним из важнейших факторов, участвующих в регуляции структуры электромагнитных воздействий как на биосферу в целом, так и организм человека в частности, является солнечная активность, задающая ритм и варианты солнечно-земных взаимодействий.

В последние годы существенным образом активировался интерес не только и не столько к самому феномену такого рода взаимодействий, основанных на чисто статистическом анализе, сколько к выяснению механизмов взаимодействия биологических систем с конкретными средовыми факторами, обладающих «мишенным» либо опосредованным действием на биосферу [12.11, 12.13]. Реализуясь на различных уровнях организации биологических систем, эти факторы, и это вполне понятно, взаимодействуют между собой либо по принципу усиления и развития неаддитивных эффектов, либо по конкурентному варианту. Понимание и изучение таких полифакторных и многоуровневых биотропных эффектов «слабых экологических факторов», отражая новый этап изучения солнечно-земных связей, должно быть, по нашему мнению, направлено на выявление фундаментальных закономерностей и этапов эволюции «живого вещества» в условиях динамически изменяющегося окружающего пространства.

Условно можно выделить несколько основных звеньев, определяющих биотропные эффекты солнечной активности на биосферу нашей планеты: корпускулярная солнечная радиация, прямые мишенные эффекты космического (включая Солнце) излучения, опосредованные эффекты как космического излучения, так и Солнечной активности, проявляющиеся в изменениях тектонической и сейсмической активности, изменении скорости эскалации радона из материковых пород, модификации влияния на организмы антропогенных факторов, включая факторы электромагнитной природы [12.10].

В ряде работ обращается внимание на тот факт, что биотропными свойствами обладают не только повышенная активность геомагнитного поля Земли (ГМПЗ), с изменением которой связывают увеличение неотложных состояний у метеочувствительных лиц, но и сниже-

ние ГМПЗ [12.7, 12.8], особенно в условиях больших городов, которое может выступать как в качестве определенного фактора риска целого ряда психосоматических заболеваний, так и изменения процессов индивидуального развития, обусловленных феноменом гелиогеофизического импринтирования [12.1]. Действительно, в железобетонных (ж/б) домах (квартирах, кабинетах, цехах, лабораториях), в кабинах машин, поездов, судов напряженность ГМПЗ резко снижается [12.3]. Так, в ж/б домах напряженность геомагнитного поля Земли в 3 раза меньше, чем на открытом пространстве. В каюте судна геомагнитное поле практически отсутствует (или существует в очень малых дозах, которые не регистрируются прибором).

Поскольку вся органическая эволюция происходила в присутствии не только геомагнитного поля, но и при изменении активности радиационного фона, особенно в условиях инверсии геомагнитного поля, то было бы удивительно, если бы в живом мире эти взаимодействия не воспринимались и не использовались в процессах нормальной жизнедеятельности и не соучаствовали в развитии патологических состояний [12.1-12.2].

На основании полученных данных [12.1] сделан вывод о том, что и радиационная, и геомагнитная компоненты окружающей среды проявляют в биологических системах различные «мишеневые эффекты», которые стимулируют активность достаточно специфических механизмов, регулирующих объемные характеристики эритроцитов. Вполне вероятно, что ряд других эффектов, наблюдаемых различными исследователями в условиях экранируемого пространства [12.3, 12.6], могут быть обусловлены не только экранированием от геомагнитного поля Земли, но и снижением активности гамма-фона, которое линейно снижается с коэффициентами геомагнитного экранирования в гипомагнитных камерах. Для разделения гамма- и геомагнитных биотропных эффектов в условиях экранированного пространства целесообразно дополнительно проводить исследования изучаемых процессов при воздействии постоянного магнитного поля. Такой подход позволит выделить в биологических системах специфические магнитозависимые структуры и процессы, а значит и обосновать как методы выявления, так и коррекции болезненной метео- и магнитозависимости.

Как следует из проведенного рассмотрения, в качестве защитных материалов от сочетанного воздействия вариаций геомагнитного поля и радиационных полей, могут быть использованы те же, что и при воздействии только радиационных полей, или только геомагнитного поля. Просто при сочетанном воздействии структура защитного устройства

должна быть усилена материалами с поглощающей радиационной способностью.

12.6. ОСОБЕННОСТИ СОЧЕТАННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ШУМА И ДРУГИХ ФИЗИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ЧЕЛОВЕКА

В процессе жизнедеятельности человек, как правило, подвергается одновременному воздействию не только шума, но и других факторов, что обуславливает необходимость проведения различного вида исследований по оценке их комбинированного влияния на организм.

Результаты исследования механизмов одновременного действия шума и других физических факторов на организм и методические подходы к их сочетанной оценке представлены в ряде работ отечественных и зарубежных авторов. Некоторые из них посвящены оценке функционального состояния человека во взаимосвязи с воздействующими факторами, в отдельных работах сделана попытка представить в качестве критерия комплексной оценки показатели здоровья и риска его нарушения; в некоторых - отражена методология комплексной оценки функционального состояния организма.

В работе [12.6] проанализированы воздействия шума и различных физических факторов волновой природы на биосферу и человека. Используются материалы многочисленных работ отечественных и зарубежных специалистов. Основные результаты исследований можно суммировать следующим образом:

1. Совместное действие шума и нагревающего микроклимата приводит к более значительным изменениям функционального состояния человека и снижению его работоспособности, чем воздействие каждого из них. Одновременное действие нагревающего микроклимата и шума на уровне выше ПДУ сопровождается большим увеличением заболеваемости с временной утратой трудоспособности по классу болезней органов кровообращения (гипертоническая болезнь) [12.3]. Тепловое воздействие на работников операторского труда, сочетающееся с действием других производственных факторов, проявляется также и в большем снижении внимания при решении поставленных задач, а также изменении чувствительности слухового анализатора.

2. В статье [12.5] делается попытка подойти к комплексной оценке условий труда, исходя из суммы баллов соответствующих степеней вредности каждого фактора: вибрация, шум, пыль, температура

воздуха, скорость движения воздуха, загрязненность воздушной среды (СО акромин, СО керосин). Определялся интегральный показатель факторов среды. Установлена его тесная корреляционная взаимосвязь с показателями заболеваемости с временной утратой трудоспособности. Степень вредности факторов определяли двумя способами: по наиболее жесткой оценке всех рабочих мест (B^{\max}), а также по среднеарифметическому значению показателей и среднеквадратическому отклонению.

При этом учитывали статистическое распределение степеней по всем трём классам, а класс ниже нормы считали нулевым. Для расчета среднего значения индекса умножали долю (относительно 1) рабочих мест с превышением ПДК и ПДУ в пределах данного класса на его индекс, принимая для случая ниже нормы 1, 2, 3 степеней вредности, значения индексов 0, 1, 2, 3 соответственно. Сложение 4-х компонентов составляющих давало среднее значение степени.

3. Такие факторы физической природы, как шум и электромагнитные излучения, играют значительную роль в формировании антропогенной нагрузки в техносфере: имеется прямая зависимость между их уровнями и распространённостью заболеваний (нервно-психическая сфера, заболевания системы кровообращения, органов зрения и др.) [12.9].

4. Физические факторы среды (шум и электромагнитные поля промышленной частоты (ЭМП ПЧ)) при совместном воздействии могут вызывать разнонаправленные изменения в различных органах и системах у био-организмов, которые, которые в зависимости от уровня и продолжительности действия каждого фактора, могут ослаблять или усиливать системный ответ. Комплексное воздействие ЭМП ПЧ с высоким уровнем магнитной индукции и шума средних уровней угнетает активность ферментов ЦТК в митохондриях головного мозга и печени. Действие ЭМП ПЧ с низким уровнем магнитной индукции и высокими уровнями шума приводит к увеличению скорости процессов дегидрирования в ЦТК митохондрий головного мозга и печени.

5. Для изучения эффектов сочетанного действия вибрации и шума на организм проведен [12.1] двухфакторный (вибрация 121 и 127 дБ, шум 80 и 100 дБ) эксперимент. Математическая обработка полученных результатов позволила установить вклад уровня шума в изменение порогов слуховой и вибрационной чувствительности, а также влияние уровней вибрации и шума на процесс восстановления этих показателей. Полученные данные указывают на существенную роль фактора шума в развитии изменений не только слуховой, но и вибра-

ционной чувствительности при сочетанном действии двух факторов, вклад которого в величину смещения порогов вибрационной чувствительности на величину ВСП составил 23,5 %. Влияние уровня вибрации на величину ВСП слуха было статистически малозначимым, однако, оно сказывалось в замедлении процесса восстановления порогов слуха.

Вибрация значительно (в среднем в 1,5-2,0 раза) усиливает неблагоприятное влияние транспортного шума на физиологические показатели (в частности, КЧСМ) населения. Отмечено, более выраженное напряжение адаптационных реакций организма. Наибольшее количество жалоб на совместное действие шума и вибрации зарегистрировано среди лиц, страдающих заболеваниями нервной и сердечно-сосудистой системы. На основании исследования выявляемости кардио- и цереброваскулярной патологии лиц, подвергающихся воздействию шума и вибрации, обнаружено, что она в два раза выше, чем в популяции.

Комбинированное воздействие шума и вибрации вызывает большее увеличение потоотделения с ладони, чем каждый из этих факторов. В наибольшей степени эффект выражен у лиц, имеющих большую чувствительность к вибрации или шуму. Одновременное воздействие вызывает более выраженную вазоконстрикцию в сосудах пальцев. Известно, что ладонное потоотделение контролируется симпатическими холинэргическими волокнами и может считаться как индекс симпатических реакций. 70% пациентов с вибрационным синдромом страдает ладонным гипергидрозом, и их симпатическая система может находиться в стадии возбуждения. Операторы ручных инструментов подвергаются воздействию как вибрации, так и шума. При этом реакции на вибрацию и шум, действующие совместно, более выражены, чем при действии одной лишь вибрации. Лица, которые более значительно реагировали на шум, также выражено реагировали и на вибрацию, и еще более интенсивно на их одновременное воздействие. Следует отметить, что по данным ряда авторов эффект на комбинированное воздействие проявляется и в случае, когда реакции на раздельное действие шума и вибрации незначительны.

6. При исследовании [12.12] биологического эффекта воздействия трех физических факторов: шум, вибрация, нагревающий микроклимат, установлен синергизм в реакциях организма на шум и тепло и антагонизм в действии вибрационного и теплового факторов. Данные свидетельствуют о методической сложности оценки сочетанного воздействия факторов, поскольку биологический эффект не является ал-

гебраической суммой независимых между собой воздействий. Автор ставит вопрос о возможности использования неспецифических реакций различных функциональных систем организма в качестве показателя чувствительности организма к комбинированному действию физических факторов производственной среды (шум, вибрация, нагревающий микроклимат). Делается вывод, что устойчивость организма к комбинированному действию указанных выше факторов как система является нелинейной, поскольку не подчиняется принципу суперпозиции, т.е. реакция системы не выражается в виде алгебраической суммы независимых между собой воздействий. Это означает, что без проведения факторного и кластерного анализа построение уравнений множественной регрессии представляется не вполне корректным, принимая во внимание также, что единицы измерения одних факторов (например, температура) – линейные, а других (шум, вибрация) – логарифмические. Использование адекватных математических методов позволяет выявить характер и направленность различных физиологических реакций при комбинированном воздействии на человека физических факторов, а также значимость адаптации к ним с позиций разработки дифференцированных норм.

При сочетанном воздействии шума и других физических факторов на производственное помещение или на человека следует осуществлять защиту окружающей среды с помощью комбинированных экранов, составленных из материалов, снижающих интенсивность каждого из воздействующих физических факторов.

12.7. НОРМИРОВАНИЕ СОЧЕТАННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ И ДРУГИХ ФАКТОРОВ НА ЧЕЛОВЕКА

На основании общетеоретических положений отечественной медицины труда, международного опыта ВОЗ, МОТ, ИСО, МЭК по стандартизации, гармонизации нормативов и методов их контроля в настоящее время разработана новая методология нормативно-прогностической регламентации физических факторов производственной и окружающей среды. В ней успешно сочетаются традиционное гигиеническое нормирование с обоснованием предельно допустимых уровней физических факторов и концепция оценки риска для здоровья от их воздействия. Основополагающими принципами новой системы регламентации, на примере виброакустических факторов, являются следующие [24.14]:

1. Единое нормирование виброакустических факторов производственной среды и среды обитания для учета и оценки их суммарной нагрузки на работающее население.

2. Интегральная, одночисловая оценка виброакустических факторов, воздействующих на человека-оператора, по экспозиции, вместо традиционных частотно-амплитудных характеристик.

3. Дифференцированное нормирование виброакустических факторов с учетом тяжести и напряженности трудового процесса (а не по принципу технической достижимости или отраслевому принципу).

4. Оценка риска нарушения здоровья при воздействии виброакустических факторов с целью управления качеством среды (производственной, окружающей, обитания) и вероятностью развития профессиональных заболеваний.

5. Оценка и нормирование виброакустических колебаний в комплексе с другими физическими факторами и факторами иной природы, воздействующими на работающих в реальных производственных условиях. Отличительная особенность гигиенического нормирования виброакустических колебаний в том, что степень вредности или опасности воздействующих уровней факторов устанавливается исходя из результатов сопоставления временных смещений порогов восприятия адекватных анализаторных систем в динамике рабочего дня и постоянных необратимых изменений у рабочих. Кроме того, при гигиеническом нормировании шума, вибрации, инфразвука, ультразвука наметился переход от устоявшегося частотного принципа (то есть спектральных характеристик, имеющих важное значение, прежде всего для разработчиков инженерно-технических, архитектурно-планировочных и других мер по борьбе с виброакустическими колебаниями) к одночисловой интегральной оценке факторов по экспозиции. Новая система регламентации физических факторов хорошо адаптирована для решения задач социально-гигиенического мониторинга. Целенаправленный переход на новую систему регламентации физических факторов и внедрение на ее основе социально-гигиенического мониторинга переориентирует гигиеническую профилактику на оценку риска в целях управления качеством среды (окружающей, производственной, обитания) и здоровья работающего населения. В связи с этим несомненный интерес представляет система прогнозов вероятности развития профессиональной патологии от воздействия шума, вибрации, контактного ультразвука и других физических факторов. Вопросы прогнозирования риска вибрационных нарушений являются актуальными, поскольку затрагивают закономерности формирования патологии и непосредственно свя-

заны с возможностью предотвращения развития заболевания. Существует несколько моделей прогноза вероятности развития вибрационных нарушений у работающих с ручным вибро-инструментом. Первая модель прогностической оценки вероятности развития вибрационной болезни была представлена в приложении к стандарту ИСО 5349.2 (1986) в виде «Руководства по оценке воздействия вибрации, передающейся на руки человека». Эта модель дозо-эффективной зависимости вероятности вибрационной болезни положила начало разработке ряда отечественных моделей, основанных на реальной диагностике вибрационной болезни 1-й и 2-й степени в соответствии с «Классификацией вибрационной болезни от воздействия локальной вибрации», утвержденной Минздравом России № 10-11/143 от 9 декабря 1985 г., определяющих вероятность развития вибрационной болезни в зависимости от воздействующей экспозиции (дозы) вибрации и стажа работы в профессии. Сопоставление данных модели стандарта ИСО 5349.2 с данными отечественных моделей свидетельствует об их существенных различиях. Выявленное несовпадение результатов прогноза по модели стандарта ИСО и отечественным моделям обусловлено различием во взглядах отечественных и зарубежных ученых на патогенез вибрационной патологии, разными подходами к диагностике вибрационных нарушений и используемыми при этом критериями. Можно предположить, что при выявлении вибрационной патологии в нашей стране определенная часть заболеваний либо не диагностируется вообще, либо выявляется на стадии выраженных признаков'. В связи с этим при составлении прогноза по отечественным моделям рассчитанные показатели вероятности заболевания оказываются ниже реальных, которые, однако, не достигают величин, прогнозируемых по стандарту ИСО. Некоторые специалисты считают, что стандарт ИСО 5349.2 значительно переоценивает риск вибрационной болезни: в два-три раза по частоте случаев и до 10 раз по латентности развития. Среди отечественных моделей наиболее адекватной для оценки риска развития вибрационной болезни следует считать модель, разработанную в [12.14]. На основании анализа распределения частоты случаев вибрационной болезни 1-й степени среди работающих на виброопасных участках машиностроительных предприятий средней полосы России выведена математическая зависимость вероятности появления вибрационной патологии у работающих от уровня воздействующей вибрации и продолжительности контакта. В соответствии с установленной зависимостью воздействие вибрации с эквивалентным уровнем 112 дБ не приведет к развитию заболевания на протяжении 32 лет работы у 90% работающих, то-

гда как уровень 124 дБ будет безопасным для того же процента работающих лишь в течение четырех лет. На основании гигиенических, клинико-физиологических исследований выявлена дозоэффективная зависимость вероятности развития синдрома вегетативно-сенсорной полиневропатии вибрационной болезни от уровня общей вибрации и стажа работы. На протяжении последних лет большое внимание уделяется изучению сравнительно новых техногенных факторов - инфразвука и контактного ультразвука. Проведены исследования по оценке степени вредности инфразвука и низкочастотных акустических колебаний, их совместного действия с другими факторами производственной среды, изучены механизмы влияния и биологического восприятия инфразвука. На основании литературных данных и собственных материалов об объективных и субъективных признаках инфразвукового воздействия разработана классификация зон риска для здоровья человека в зависимости от параметров инфразвука. Установлено, что кратковременное интенсивное воздействие инфразвука на человека обуславливает высокую степень вероятности развития тягостного состояния сенсорно-сомато-вегетативно-висцерального симптомокомплекса, что позволило впервые обосновать представление об инфразвуковом гипоталамическом синдроме (диэнцефальном кризе). Разработана концептуальная патогенетическая модель инфразвукового воздействия на человека, согласно которой особенностью повреждающего действия инфразвука является развитие сочетанных взаимосвязанных патологических процессов. Один из них обусловлен развитием общего адаптационного синдрома, другой - альтерацией нервных образований головного мозга, органов-мишеней эндокринной системы и внутренних органов. Основным патогенетическим звеном этого процесса является развитие тканевой гипоксии вследствие церебральной гипертензии из-за ликворгемодинамических и микроциркуляторных нарушений. Риск возникновения симптомокомплекса (синдрома) может быть рассчитан по определенной формуле. Полученные материалы использованы при обосновании гигиенических, клинико-физиологических, медико-биологических критериев нормирования инфразвука, учитывающих не только состояние статокINETической системы, но и в равной степени реакции целостного организма, что нашло отражение в новых санитарных нормах. Действующие санитарные правила СП 2.2.4/2.1.8.583-96 «Инфразвук на рабочих местах, в жилых и общественных помещениях и на территории жилой застройки» разработаны с позиций дифференцирования предельно допустимых уровней фактора в зависимости от степени тяжести и напряженности трудового процесса (в произ-

водственных помещениях и на территории предприятий) и составляют 100 и 95 дБ Лин соответственно. Отечественным гигиенистам принадлежит приоритет в обосновании принципов, критериев и методов гигиенической оценки и нормирования ультразвука. Следует отметить, что в результате снижения на 15 - 25 дБ уровней воздушного ультразвука, генерируемого современным ультразвуковым оборудованием, по сравнению с уровнем оборудования предыдущего поколения проблема воздушного ультразвука отошла на второй план. Вместе с тем, использование ультразвукового оборудования и аппаратуры в промышленности, медицине сопровождается ростом численности работающих с источниками контактного ультразвука, подвергающихся его неблагоприятному воздействию. В целях унификации критериев и методов оценки условий труда работающих с источниками ультразвуковых колебаний разработана «Гигиеническая классификация ультразвука, воздействующего на человека-оператора», которая включена в действующие санитарные нормы. Развивающиеся под влиянием контактного ультразвука неблагоприятные эффекты, обладающие способностью к накоплению, проявляются обычно сильнее в зоне контакта - в пальцах, кистях рук. Клинико-физиологические исследования показали, что для ультразвукового воздействия характерны сенсорные, вегетативно-сосудистые нарушения и изменения опорно-двигательного аппарата рук в виде вегетативно-сенсорной (ангионевроз) полиневропатии рук, которая впервые включена в список профессиональных заболеваний в 1989 году. По результатам многолетних исследований разработана математическая модель прогноза вероятности развития профессиональной патологии у работающих с источниками контактного ультразвука различной частоты в зависимости от интенсивности и длительности контакта. Модель позволяет определять безопасный стаж работы в профессии, что дает возможность управлять риском нарушения здоровья за счет «защиты временем». В действующих санитарных нормах реализована концепция совместного действия воздушного и контактного ультразвука путем установления понижающей поправки, равной 5 дБ, к нормативному уровню контактного ультразвука. В условиях современного производства на фоне происходящей интеллектуализации труда, роста удельного веса операторских профессий повышается значение шумов средних уровней (ниже 80 дБА), не вызывающих потерь слуха, но оказывающих мешающее, раздражающее, утомляющее действие. Оно суммируется с действием напряженного труда и при возрастании стажа может привести к общесоматическим нарушениям и заболеваниям. В связи с этим был обоснован биологический эквива-

лент действия на организм шума и нервно-напряженного труда, равный 10 дБА шума на одну категорию напряженности трудового процесса. Этот принцип положен в основу действующих санитарных норм по шуму. Оценка и прогнозирование риска нарушений от действия шума предполагают количественную оценку как специфических, так и неспецифических, экстраауральных эффектов. В соответствии с рекомендациями стандарта ИСО 1999 (1990) «Акустика. Определение профессиональной экспозиции шума и оценка нарушений слуха, вызванных шумом» и на основе отечественных критериев оценки потерь слуха разработан прогноз развития тугоухости. В России степень профессиональной тугоухости оценивается по средней величине потерь слуха на трех речевых частотах (0,5-1-2 Гц). Величины более 10, 20, 30 дБ соответствуют I, II, III степени снижения слуха. Причем у женщин из-за более медленного, чем у мужчин, нарастания возрастных изменений слуха данные слегка отличаются: для стажа более 20 лет у женщин безопасный стаж на один год больше, чем у мужчин, а для стажа более 40 лет - на два года. Правда, стандарт не учитывает характер трудовой деятельности, как это предусмотрено в санитарных нормах, дифференцированных по тяжести и напряженности трудового процесса и тем самым охватывающих неспецифическое действие шума, что важно для сохранения здоровья и работоспособности лиц операторских профессий. В настоящее время подготовлено информационное письмо «Прогнозирование потерь слуха от действия производственного шума по стандарту ИСО 1999 (1990)», в котором изложены принципиальные положения этого стандарта и даны рекомендации по его применению. Проблема гигиенической оценки импульсных шумов актуальна как в нашей стране, так и за рубежом. Действующие санитарные нормы по шуму устанавливают предельно допустимые уровни (далее ПДУ) для импульсного шума на 5 дБ ниже, чем для постоянных шумов, и дополнительно ограничивают максимальный уровень звука (125 дБА), но не регламентируют пиковые значения. Тем самым нормы ориентированы на громкость шума, а не на травматическое действие его пиков, являющееся общепризнанным. В последние десятилетия проведены исследования, позволившие уточнить ПДУ ЭМП в ряде частотных диапазонов с учетом режимов облучения и ввести дозный (энергетический) подход, обосновывающий более адекватную оценку облучаемости персонала. Основным нормативным документом, регламентирующим допустимые уровни воздействия ЭМП, является СанПиН 2.2.4/ 2.1.8.055-96 «Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона». В ПДУ наряду с интенсивностными параметрами (Е, Н, ППЭ) нормируется

энергетическая экспозиция за рабочий день, выражающаяся произведением E_2 , H_2 или ППЭ за время воздействия T . Такой подход позволяет определять допустимые уровни ЭМП с учетом времени воздействия исходя из предельно допустимой энергетической экспозиции. В последнее время широкое распространение получили такие источники ЭМП, как видео-дисплейные терминалы (далее ВДТ) и радиотелефоны. Достаточно широкий спектр частот, излучаемых ВДТ, и особенности пользования радиотелефонами с максимальным приближением к голове пользователя по- требовали разработки отдельных гигиенических регламентов. Были разработаны «Временные допустимые уровни электромагнитных излучений, создаваемых системами сотовой радиосвязи» (ГН 2.1.8/2.2.4.019-94) и СанПиН 2.2.2.542-96 «Гигиенические требования к видео-дисплейным терминалам, персональным электронно-вычислительным машинам и организации работ». Однако расширение частотного диапазона систем сотовой связи, увеличение числа пользователей радиотелефонами и ВДТ обуславливают необходимость проведения фундаментальных исследований влияния создаваемых ими ЭМП на организм человека с целью разработки научно обоснованных регламентов, уточнения методов измерения и гигиенической оценки. В связи с проведением социально-гигиенического мониторинга предполагается разработка методов оценки влияния ЭМИ на показатели здоровья населения, проживающего в районах с неблагоприятной электромагнитной обстановкой. Поэтому необходима организация эпидемиологических исследований различных контингентов населения для апробации действующих ПДУ, изучения отдаленных последствий длительного воздействия ЭМП малой интенсивности. Нормирование микроклимата на рабочих местах и разработка мер защиты от перегревания и охлаждения базируются на результатах теоретических, экспериментальных и производственных исследований теплообмена человека с окружающей средой, порогов температурной чувствительности организма, состояния функциональных систем, обеспечивающих температурный гомеостаз, а также на изучении показателей здоровья работающих, имеющих как научное, так и практическое значение. Для разработки нормативных требований к параметрам микроклимата производственных помещений использованы показатели критериев, характеризующие тепловое состояние работающего за рабочую смену либо как оптимальное, либо как допустимое. При этом если в отношении оптимального теплового состояния человека за рабочую смену существует вполне определенная позиция отечественных и зарубежных исследователей, и их мнения практически не расходятся, то в отношении

оценки допустимого охлаждения и перегревания организма это мнение неоднозначно. Это определяет различные требования к уровню термического стресса. К допустимым в период рабочей смены отнесены такие величины показателей теплового состояния человека, которые не вызывают неприятных тепло-ощущений, обуславливающих желание покинуть рабочее место для нормализации теплового состояния, увеличить или уменьшить теплоизоляцию одежды; не изменяют существенно работоспособность человека, но, при этом не исключено ее снижение у 20% индивидуумов на 10%. Пребывание в нагревающей или охлаждающей среде не является риском нарушения состояния здоровья. Показано, что кратковременное пребывание в охлаждающей или нагревающей среде может сопровождаться большим охлаждением или перегревом организма (предельно допустимым), но при условии, что в остальные периоды рабочей смены трудовая деятельность человека осуществляется в микроклиматических условиях, способствующих нормализации теплового состояния организма, то есть должно быть выдержано условие сохранения среднесменных величин показателей теплового состояния на допустимом уровне. Нормативные требования к оптимальным и допустимым показателям микроклимата, а также показателям, характеризующим различные классы вредных и опасных условий труда, разработаны на основе их взаимосвязи с критериальными показателями теплового состояния человека и его здоровья. Для оценки нагревающего микроклимата представлены требования к величинам интегрального показателя термической нагрузки среды (далее ТНС-индекс), отражающего степень влияния нагревающего микроклимата на тепловое состояние человека и его здоровье. Рассчитаны величины стандартизованного относительного риска смерти (далее COP) от заболеваний сердечно-сосудистой системы у рабочих в нагревающей среде в зависимости от превышения на рабочих местах верхней границы допустимого уровня ТНС-индекса. Вопросы защиты от термического стресса применительно к конкретным условиям трудовой деятельности представлены в Методических рекомендациях. В условиях производственной деятельности человек, как правило, подвергается одновременному воздействию различных факторов внешней среды. В отечественной и зарубежной литературе имеются многочисленные сведения, в той или иной мере отражающие оценку их совместного действия. Однако применяемый в этих целях традиционный подход к интегральному изучению происходящих в организме изменений с использованием многофакторного дисперсионного анализа Р-критерия Фишера для оценки значимости факторов не позволяет ре-

шать задачу прогнозирования функционального состояния человека в целом. Исследователь сталкивается с необходимостью использования ряда регрессионных моделей, описывающих взаимосвязь отдельного показателя функционального состояния человека (далее ФСЧ) с комбинацией факторов внешней среды (далее ФВС). Число таких уравнений в зависимости от количества показателей ФСЧ может быть весьма велико, что вызывает затруднения на практике. В наших исследованиях для комплексной оценки влияния ФВС (шум, вибрация, температура воздуха, освещенность) на ФСЧ использована модель, связывающая всю совокупность показателей функционального состояния человека со всей совокупностью показателей факторов внешней среды. Полученная модель позволила выявить, что комплексное воздействие ФВС в зависимости от уровня здоровья каждого человека может усиливать или ослаблять системный ответ организма. Исходя из взаимосвязи интегральных показателей функционального состояния человека и физических факторов среды, разработаны вероятностные номограммы для прогнозирования ФСЧ по его интегральному показателю ФВС. Данная методология может использоваться для решения различных гигиенических задач, касающихся оценки и нормирования комплекса физических факторов. При этом число исследуемых физических факторов может быть расширено, а в качестве ответных реакций могут использоваться не только реакции со стороны различных функциональных систем, но и показатели здоровья, что позволит прогнозировать риск его нарушения [12.12].

12.8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным механизмом, посредством которого осуществляется приспособление организма к влияниям внешних для него физических факторов волновой природы, является пейрогуморальный с его рефлексорным и гуморальным звеньями, находящимися в постоянном динамическом взаимодействии. Рефлекторное звено с заложенными в коже и других тканях и органах тела человека рецепторами раздражений является первичным приемником и проводником воспринятых раздражений в центральную нервную систему. В центральной нервной системе в процессе ее весьма сложной аналитико-синтетической деятельности с участием вегетативных и высших регуляторных центров формируется ответная реакция организма на раздражение от внешнего физического фактора. Эта реакция проявляется рядом согласованных

физиологических процессов в эффекторных органах и системах организма; в указанных процессах гуморальному звену принадлежит одно из ведущих мест [12.14].

Один и тот же физический фактор может дать различный эффект в зависимости от исходного функционального состояния организма и его нервной системы. При нормальном состоянии организма его реакции будут направлены, на устранение возникших в процессе воздействия изменений и быстрейшее восстановление нарушенного равновесия; при наличии в организме патологического процесса, когда нормальные отношения и состояние основных нервных процессов оказываются нарушенными и сопровождаются нарушением деятельности различных физиологических систем, воздействие физического фактора будет направлено на восстановление нарушенного физиологического равновесия и проявится в мобилизации и усилении естественных механизмов защиты организма против болезни.

Большое значение для ответной реакции организма имеет интенсивность применяемого физического фактора, продолжительность его действия и последовательность применения, а также локализация воздействия. Один и тот же фактор при небольшой интенсивности может оказывать возбуждающее действие, а при большой - приводить к противоположному эффекту. Короткое по продолжительности воздействие может стимулировать те или иные функции организма, продолжительное же может вызывать в центральной нервной системе тормозной эффект. Ежедневные однократные и повторные воздействия или воздействия с промежутками в один или несколько дней могут дать совершенно различные результаты. Наконец, немалое значение имеет и локализация воздействия: в одних случаях при местном приложении лечебного фактора возникают преимущественно местные ответные реакции, в других - на первый план выступает генерализованная ответная реакция организма.

Выбирая для наилучшего, целенаправленного воздействия на течение патологического процесса тот или иной физический фактор, необходимо учитывать все особенности применения и действия последнего.

Специфической особенностью гальванического тока является перемещение электрически заряженных частиц - электронов - в твердом или положительно и отрицательно заряженных ионов в жидком проводнике. В теле человека, содержащем в сложных растворах различные электролиты в виде положительно и отрицательно заряженных ионов, действие гальванического тока осуществляется в виде переме-

щения ионов в электрическом поле между наложенными на тело электродами в соответствии с их полярностью. У межклеточных мембран накапливаются наиболее подвижные ионы, частично проникающие через эти мембраны. Сами клеточные мембраны с их коллоидной субстанцией изменяют свою осмотическую проницаемость. Благодаря этому изменяется кислотно-щелочное равновесие в тканях, их водный баланс, электрические потенциалы, на поверхности нервного волокна изменяется содержание биологически активного вещества - ацетилхолина, в коже - гистамина и т. д. [12.11].

Как следует из представленного рассмотрения, проблема сочетанного воздействия различных физических факторов волновой и неволновой природы решена лишь частично для сочетанных воздействий. Она должна быть продолжена сначала на уровне медицинских исследований, затем на уровне построения математических алгоритмов и моделей. Только после решения этих задач возможна разработка методов и средств технической защиты человека и в целом биосферы от чрезмерных физических факторов волновой и неволновой природы, опасных для жизнедеятельности человека, а также и для технических устройств, разработанных и эксплуатируемых человеком.

БИБЛИОГРАФИЯ

К ГЛАВЕ 1

- 1.1. Аполлонский С. М. Внешние электромагнитные поля электрооборудования и средства их снижения. – СПб.: Безопасность, 2001. – 620 с.
- 1.2. Аполлонский С. М. Справочник по расчёту электромагнитных экранов. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 224 с.
- 1.3. Аполлонский С. М. Расчёт электромагнитных экранирующих оболочек. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 144 с.
- 1.4. Аполлонский С. М. Экранирующие оболочки с параметрическими неоднородностями. - Красноярск: Изд-во КГУ, 1990. -203 с.
- 1.5. Аполлонский С. М. Электромагнитная безопасность технических средств и человека: В 3 т. Т. I. Формирование внешней электромагнитной среды: Монография. – СПб.: Изд-во СЗТУ, 2011. – 223 с.
- 1.6. Аполлонский С. М. Электромагнитная безопасность технических средств и человека: В 3 т. Т. II. Воздействие электромагнитной среды на технические устройства и средства защиты: Монография. – СПб.: Изд-во СЗТУ, 2011. – 439 с.
- 1.7. Аполлонский С. М., Каляда Т.В., Синдаловский Б. Е. Безопасность жизнедеятельности человека в электромагнитных полях: Учебное пособие. – СПб.: Политехника, 2006. – 263 с.
- 1.8. Довбыш В. Н., Маслов М. Ю., Сподобаев Ю. М. Электромагнитная безопасность элементов энергетических систем. – М., 2009. – 198 с.
- 1.9. Маслов О. Н. Экологический риск и электромагнитная безопасность: Монография. – М.: ИРИАС, 2004. – 330 с.
- 1.10. Промышленная экология. Учебное пособие /Под ред. В. В.Денисова. – М: ИКЦ «МарТ»; Ростов н/Д: Издательский центр «МарТ», 2007. - 720с.

К ГЛАВЕ 2

- 2.1. Аполлонский С. М. Справочник по расчёту электромагнитных экранов. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 224 с.
- 2.2. Аполлонский С. М. Расчёт электромагнитных экранирующих оболочек. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 144 с.
- 2.3. Аполлонский С. М. Экранирующие оболочки с параметрическими неоднородностями. - Красноярск: Изд-во КГУ, 1990. -203 с.
- 2.4. Аполлонский С. М. Электромагнитная безопасность технических средств и человека: В 3 т. Т. II. Воздействие электромагнитной среды

на технические устройства и средства защиты: Монография. – СПб.: Изд-во СЗТУ, 2011. – 439 с.

2.5. Аполлонский С. М., Малаян К. Р. Электромагнитная экология человека: Учеб.ое пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 556 с.

2.6. Афанасьев А. И., Карпиков И. И. Методы снижения электрических и магнитных полей промышленной частоты 50 Гц (справочное руководство). – Фрязино: НПП "Циклон-Тест", 2001. – 28 с.

2.7. Грачёв Н. Н., Мырова Л. О. Защита человека от опасных излучений. - М.: Бином. Лаборатория знаний, 2009. – 317 с.

К ГЛАВЕ 3

3.1. Аполлонский С. М. Электромагнитная безопасность технических средств и человека: В 3 т. Т. III. Воздействие внешней электромагнитной среды на человека и средства защиты: Монография. – СПб.: Изд-во СЗТУ, 2011. – 286 с.

3.2. Аполлонский С. М. Электромагнитное экранирование, т. 1. Теория электромагнитного экранирования. Saarbrucken (Germany): Palmarium Academic Publishing, 2013. – 471 с.

3.3. Аполлонский С. М. Электромагнитное экранирование, т. 2. Экранирование в инженерной практике. Saarbrucken (Germany): Palmarium Academic Publishing, 2013. – 207 с.

3.4. Аполлонский С. М., Каляда Т.В., Синдаловский Б. Е. Безопасность жизнедеятельности человека в электромагнитных полях: Учебное пособие. – СПб.: Политехника, 2006. – 263 с.

3.5. Гусев Н. Г. и др. Защита от ионизирующих излучений в 2-х т. /Ковалёв Е. Е., Машкович В. П., Суворов А. П., под ред. Н. Г. Гусева. Т.2. Защита от ионизирующих излучений. . 3-е переработанное издание. – М.: Энергоатом-издат, 1990. – 352 с.

3.6. Довбыш В. Н., Маслов М. Ю., Сподобаев Ю. М. Электромагнитная безопасность элементов энергетических систем. – М., 2009. – 198 с.

3.7. Занько Н. Г., Ретнев В. М. Медико-биологические основы безопасности жизнедеятельности. - М.: Изд. центр «Академия», 2004. – 287 с.

3.8. Маслов О. Н. Экологический риск и электромагнитная безопасность: Монография. – М.: ИРИАС, 2004. – 330 с.

К ГЛАВЕ 4

- 4.1. Аполлопский С. М. Защита от неионизирующих излучений. Saarbrucken (Germany): Palmarium Academic Publishing, 2014. – 252 с.
- 4.2. Аполлонский С. М. Электромагнитное экранирование, т. 1. Теория электромагнитного экранирования. Saarbrucken (Germany): Palmarium Academic Publishing, 2013. – 471 с.
- 4.3. Аполлонский С. М., Каляда Т.В., Синдаловский Б. Е. Безопасность жизнедеятельности человека в электромагнитных полях: Учебное пособие. – СПб.: Политехника, 2006. – 263 с.
- 4.4. Куклев Ю. И. Физическая экология: Учеб. Пособие /Ю. И. Куклев. 3-е изд. доп. – М.: Высш. Шк., 2008. – 392 с.
- 4.5. Маслов О. Н. Экологический риск и электромагнитная безопасность: Монография. – М.: ИРИАС, 2004. – 330 с.
- 4.6. Рудаков М. Л. Электромагнитная безопасность в промышленности. – СПб.: Политехника, 1999. – 91 с.
- 4.7. Шлендер П. Э., Маслова В. М., Подгаецкий С. И. Безопасность жизнедеятельности: Учеб. пособие /Под ред. проф. П. Э Шлендера. – М.: Вузовский учебник, 2003. – 208 с.
- 4.8. Электромагнитная безопасность человека /Авт. Григорьев Ю. Г., Степанов В. С., Григорьев О. А., Меркулов А. В. Справочно-информационное издание, 1999. – 145 с.

К ГЛАВЕ 5

- 5.1. Аполлонский С. М. Защита от неионизирующих излучений. Saarbrucken (Germany): Palmarium Academic Publishing, 2014. – 252 с.
- 5.2. Аполлонский С. М. Электромагнитное экранирование, т. 1. Теория электромагнитного экранирования. Saarbrucken (Germany): Palmarium Academic Publishing, 2013. – 471 с.
- 5.3. Аполлонский С. М. Электромагнитная безопасность технических средств и человека: В 3 т. Т. II. Воздействие электромагнитной среды на технические устройства и средства защиты: Монография. – СПб.: Изд-во СЗТУ, 2011. – 439 с.
- 5.4. Аполлонский С. М., Малаяп К. Р. Электромагнитная экология человека: Учеб. пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 556 с.
- 5.5. Афанасьев А. И., Карпиков И. И. Методы снижения электрических и магнитных полей промышленной частоты 50 Гц (справочное руководство). – Фрязино: НПП "Циклон-Тест", 2001. – 28 с.

5.6. Белов С. В. и др. Безопасность жизнедеятельности: Учеб. для вузов . 8-е изд., стер./Девисилов В. А., Ильницкая А. В., Козьяков А. Ф., Морозова Л. Л., Павлихин Г. П., Переездчиков И. В., Сивков В. П., Смирнов С. Г. – М.: Высш. шк., 2009. - 616 с.

5.7. Электромагнитная безопасность человека /Авт. Григорьев Ю. Г., Степанов В. С., Григорьев О. А., Меркулов А. В. Справочно-информационное издание, 1999. – 145 с.

К ГЛАВЕ 6

6.1. Атомная наука и техника СССР / Под общ. ред. А. М. Петросьянца. М.: Энергоатомиздат, 1987.

6.2. Белов С. В. и др. Безопасность жизнедеятельности: Учеб. для вузов . 8-е изд., стер./Девисилов В. А., Ильницкая А. В., Козьяков А. Ф., Морозова Л. Л., Павлихин Г. П., Переездчиков И. В., Сивков В. П., Смирнов С. Г. – М.: Высш. шк., 2009. - 616 с.

6.3. Гусев Н. Г. и др. Защита от ионизирующих излучений в 2-х т. /Климанов В. А., Машкович В. П., Суворов А. П., под ред. Н. Г. Гусева. Т.1. Физические основы защиты от излучений. 3-е переработанное издание. – М.: Энергоатом-издат, 1989. – 510 с.

6.4. Гусев Н. Г. и др. Защита от ионизирующих излучений в 2-х т. /Ковалёв Е. Е., Машкович В. П., Суворов А. П., под ред. Н. Г. Гусева. Т.2. Защита от ионизирующих излучений. . 3-е переработанное издание. – М.: Энергоатом-издат, 1990. – 352 с.

6.5. Егоров Ю. А. Основы радиационной безопасности атомных электростанций: Учебн. пособие для вузов/ Под общ. ред. акад. Н. А. Доллежаля. М.: Энергоатомиздат, 1982.

6.6. Инженерный расчет защиты атомных электростанций/ А. П. Веселкин, Ю. А. Егоров, Л. М. Лузанова и др.; Под ред. А. П. Веселкина и Ю. А. Егорова. М.: Атомиздат, 1976.

6.7. Крамер-Агеев Е.А., Трошин В.С. Инструментальные методы радиационной безопасности: Учебное пособие. – М.: НИЯУ МИФИ, 2011. - 88 с.

6.8. Коннова Л. А., Балабанов В. А. Безопасность жизнедеятельности. Основы радиационной безопасности и защиты. - СПб.: СПбУ ГПС МЧС России, 2010. – 110 с.

6.9. Кулешов В. К. и др. Радиационный контроль: Уч. пособие.- Томск: Изд. ТПУ, 2000.

6.10. Матвеев А. В., Коваленко А. И. Основы организации защиты населения и территорий в чрезвычайных ситуациях мирного и военного

времени: Учебное пособие / Под ред. А. В. Матвеева. – СПб: ГУАП, 2007. – 224 с.

6.11. Мокров Ю. В. Инструментальные методы радиационной безопасности: Учебное пособие. – Дубна: Межд.ин-т природы, общества и человека, 2007.

6.12. Промышленная экология. Учебное пособие / Под ред. В. В.Денисова. – М: ИКЦ «МарТ»; Ростов н/Д: Издательский центр «МарТ», 2007. - 720с.

6.13. Руководство по радиационной защите для инженеров. В 2-х т. Пер. с англ. /Под ред. Д. Л. Бродера и др. - М.: Атомиздат; Т. 1, 1972; Т. 2, 1973.

К ГЛАВЕ 7

7.1. Аполлонский С. М. Защита от ионизирующих излучений. Saarbrücken (Germany): Palmarium Academic Publishing, 2014. – 545 с.

7.2. Гусев Н. Г. и др. Защита от ионизирующих излучений в 2-х т. /Ковалёв Е. Е., Машкович В. П., Суворов А. П., под ред. Н. Г. Гусева. Т.2. Защита от ионизирующих излучений. . 3-е переработанное издание. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.

7.3. Крамер-Агеев Е.А., Трошин В.С. Инструментальные методы радиационной безопасности: Учебное пособие. – М.: НИЯУ МИФИ, 2011. - 88 с.

7.4. Кулешов В. К. и др. Радиационный контроль: Уч. пособие.- Томск: Изд. ТПУ, 2000.

7.5. Матвеев А. В., Коваленко А. И. Основы организации защиты населения и территорий в чрезвычайных ситуациях мирного и военного времени: Учебное пособие / Под ред. А. В. Матвеева. – СПб: ГУАП, 2007. – 224 с.

К ГЛАВЕ 8

8.1. Аполлонский С. М. Защита от ионизирующих излучений. Saarbrücken (Germany): Palmarium Academic Publishing, 2014. – 545 с.

8.2. Гусев Н. Г. и др. Защита от ионизирующих излучений в 2-х т. /Климанов В. А., Машкович В. П., Суворов А. П., под ред. Н. Г. Гусева. Т.1. Физические основы защиты от излучений. 3-е переработанное издание. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 510 с.

8.3. Ионизирующие излучения и их измерения. Термины и понятия. М.: Стандартиформ, 2006.

8.4. Кулешов В. К. и др. Радиационный контроль: Уч. пособие.- Томск: Изд. ТПУ, 2000.

8.5. Пряхин В.М., Попов В.Я. Защиты населения и территорий в чрезвычайных ситуациях – М., 1997.

8.6. Руководство по радиационной защите для инженеров. В 2-х т. Пер. с англ. /Под ред. Д. Л. Бродера и др. - М.: Атомиздат; Т. I, 1972; Т. II, 1973.

К ГЛАВЕ 9

9.1. Белов С. В. и др. Безопасность жизнедеятельности: Учеб. для вузов . 8-е изд., стер./Девисилов В. А., Ильницкая А. В., Козьяков А. Ф., Морозова Л. Л., Павлихин Г. П., Переездчиков И. В., Сивков В. П., Смирнов С. Г. – М.: Высш. шк., 2009. - 616 с.

9.2. Гусев Н. Г. и др. Защита от ионизирующих излучений в 2-х т. /Ковалёв Е. Е., Машкович В. П., Суворов А. П., под ред. Н. Г. Гусева. Т.2. Защита от ионизирующих излучений. . 3-е переработанное издание. – М.: Энергоатом-издат, 1990. – 352 с.

9.3. Егоров Ю. А. Основы радиационной безопасности атомных электростанций: Учебн. пособие для вузов/ Под общ. ред. акад. Н. А. Доллежаля. М.: Энергоатомиздат, 1982.

9.4. Инженерный расчет защиты атомных электростанций/ А. П. Веселкин, Ю. А. Егоров, Л. М. Лузанова и др.; Под ред. А. П. Веселкина и Ю. А. Егорова. М.: Атомиздат, 1976.

9.5. Крамер-Агеев Е.А., Трошин В.С. Инструментальные методы радиационной безопасности: Уч. пособие. – М.: НИЯУ МИФИ, 2011. - 88 с.

9.6. Кулешов В. К. и др. Радиационный контроль: Уч. пособие.- Томск: Изд. ТПУ, 2000.

9.7. Матвеев А. В., Коваленко А. И. Основы организации защиты населения и территорий в чрезвычайных ситуациях мирного и военного времени: Учебное пособие / Под ред. А. В. Матвеева. – СПб: ГУАП, 2007. – 224 с.

9.8. Мокров Ю. В. Инструментальные методы радиационной безопасности: Учебное пособие. – Дубна: Межд. ин-т природы, общества и человека, 2007.

9.9. Промышленная экология. Учебное пособие /Под ред. В. В. Денисова. – М: ИКЦ «МарТ»; Ростов н/Д: Издательский центр «МарТ», 2007. – 720 с.

9.10. Руководство по радиационной защите для инженеров. В 2-х т. Пер. с англ. /Под ред. Д. Л. Бродера и др. - М.: Атомиздат; Т. I, 1972; Т. II, 1973.

К ГЛАВЕ 10

10.1. Анджелов В.Л. Проблемы обеспечения звукоизоляции ограждений монолитных жилых и общественных зданий // Academia. Архитектура и строительство, 2009, № 5, с. 193–195.

10.2. Анджелов В.Л., Пороженко М.А. Оценка и нормирование звукоизоляции ограждающих конструкций зданий // Academia. Архитектура и строительство. 2010. №3. С. 170–174.

10.3. Богопелов И. И. Строительная акустика. Второе издание. – СПб.: СПбГПУ, 2010. - 364 с.

10.4. Герасимов А.И. Звукоизоляционные и звукопоглощающие материалы и их применение в строительстве // Academia. Архитектура и строительство. 2009. №5. С. 209–215.

10.5. ГОСТ 16297–80. «Материалы звукоизоляционные и звукопоглощающие. Методы испытаний».

10.6. Жиганов Н.Е. Шумовое загрязнение среды // Современные наукоемкие технологии. 2013. №8-1. С.13–14.

10.7. Колосов Ю.В., Барановский В.В. Защита от вибраций и шума на производстве. Учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. – 38 с.

10.8. Кочкин А.А. Шашкова Л.Э. О повышении звукоизоляции ограждающих конструкций // Academia. Архитектура и строительство. 2010. №3. С. 198–199.

10.9. Смирнова Е.В., Васюткина Д.И. Результаты сравнительного анализа акустических свойств строительных материалов // Вестник белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2013. №1. С.26–29.

10.10. СП 51.13330.2011 ЗАЩИТА ОТ ШУМА Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003. Издание официальное. – М., 2011. – 42 с.

10.11. Типалин С.А., Сапрыкин Б.Ю., Шпунькин Н.Ф. Краткий обзор многослойных листовых деформируемых материалов используемых для защиты от шума // Известия Московского государственного технического университета МАМИ, 2012, т. 2, № 2 (14), с. 194–199.

10.12. Хабарова О. В. Биоэффективные частоты и их связь с собственными частотами живых организмов / Биомедицинские технологии и радиоэлектроника, 2002, № 5, с. 56-66.

10.13. Шум, как акустический стрессор, и меры борьбы с ним / Некипелова О.О., Некипелов М.И., Маслова Е.С., Урдаева Т.Н. // Фундаментальные исследования, 2006, № 5, с. 55–57.

10.14. Sound and vibration damping characteristics in natural material based sandwich composites / James J. Sargianis, Hyung-Ick Kim, Erik Andres, Jonghwan Suhra, // Composite Structures, 2013, N 96, pp.538–544.

К ГЛАВЕ 11

11.1. Беленцов Ю. А. Характер деформирования композиционных материалов (С-Петербургский государственный архитектурно строительный университет) <http://www.jdpsmt.ru/docs/8/8.php>

11.2. Бобрышев, А. Н. Термореактивные полимерные композиты в машиностроении: монография / Под ред. А.Н.Бобрышева. - Старый Оскол : ТНТ, 2008. – 151 с.

11.3. ГОСТ 12.1.012-2004. Вибрационная безопасность. Общие требования.

11.4. ГОСТ 31319-2006 (ЕН 14253:2003) Вибрация. Измерение общей вибрации и оценка ее воздействия на человека. Требования к проведению измерений на рабочих местах

11.5. Жарин Д. Е. Эпоксидные композиты с высокими демпфирующими свойствами. Автореф. дис. к.т.н. – Пенза, 1997. – 17 с.

11.6. Защита от вибрации и ударов /Под ред. К.В. Фролова. Ред. совет: В.Н. Челомей (пред.). – М.: Машиностроение, 1981.- 456 с.: ил.

11.7. Зубарев П. А. Защитные износостойкие покрытия на основе модифицированных полиуретанов. Дис. к.т.н. – Пенза, 2014. – 124 с.

11.8. Кардаш М. М., Шкабара А. И. Композиционные хемосорбционные волокнистые материалы «Поликон» на основе углеродных волокон /Известия Волгоградского государственного технического университета, № 2, т. 1, 2009.

11.9. Кашина С. Г. Защита от вибрации: Учебное пособие для самостоятельного изучения и к практическим занятиям для студентов / С.Г. Кашина. – Казань: Изд-во Казанского гос. Архитект. – строит. ун-та, 2012. – 133 с.

11.10. Курбонов Ф. А. Основные направления и методы защиты от вибрации технологических машин в швейном производстве / Ф. А. Курбонов, Ж. Н. Ёкубов // Молодой ученый, 2015, №9, с. 258-261.

11.11. Ромапченко М.К., Пахомова Л.В. «Защита человека от низкочастотной вибрации», – LAP LAMBERT Academic Publishing, Saarbrucken, Germany, 2011. – 132 с.

11.12. Тимофеев А. Б. Исследование явлений механического резонанса в органах и тканях человека и их использование для лечения и контроля его эффективности. Автореф. дис. к.б.н. – М, 2005.

11.13. Хабарова О. В. Биоэффективные частоты и их связь с собственными частотами живых организмов / Биомедицинские технологии и радиоэлектроника, 2002, № 5, с. 56-66.

К ГЛАВЕ 12

12.1. Афанасьева Р.Ф. Сочетанное действие факторов производственной и окружающей сред на организм человека (аналитический обзор) //Бюллетень научного совета “Медико-биологические проблемы работающих”, № 2, 2005, с. 58-70.

12.2. Афанасьева Р.Ф., Суворов Г.А., Антонов А.Г., Бобров А.Ф., Лосик Т.К., Соколов С.Н. Прогнозирование теплового состояния человека при воздействии комплекса факторов //Медицина труда и промышленная и промышленная экология, № 2, 2000. - 9 с.

12.3. Бабаян М.А., Денисов М.И. Сочетанное действие шума, тепла и оценка их биологической эквивалентности //Гигиена труда и профзаболевания, 1991, № 9, с.24-26.

12.4. Белинский, С.О. Комбинированное действие электромагнитных полей /С.О. Белинский: Естествознание и гуманизм: [сб. научн. работ] / Томск: Сибирский государственный медицинский университет, т. 2, № 1, 2005, с. 60-62.

12.5. Беличева Д.Б. Комплексная оценка условий труда рабочих виброопасных профессий //Гигиена труда и профзаболевания, 1992, № 3, с.20-23.

12.6. Васильев А. В. Проблемы оценки сочетанного влияния шума и других физических факторов на здоровье человека //Известия Самарского научного центра РАН, т. 14, № 6-1, 2012.

12.7. Васильев А.В. Мониторинг физических полей урбанизированных территорий: современные подходы, проблемы, перспективы //Известия Самарского научного центра РАН. Специальный выпуск «ELPIT-2005”, 2005, т.1, с. 111-118.

12.8. Денисова С. А. Сочетанное воздействие низкоинтенсивного электромагнитного излучения терагерцового диапазона и экотоксикантов на биологические объекты. Автореф. дис. на соискание степени к.б.н. – М., 2008. – 16 с.

- 12.9. Дунаев В.Н., Быстрых В.В., Боев В.М. Вклад физических факторов в комплексную антропогенную нагрузку промышленного города // Гигиена и санитария, № 6, 1998, с. 58-61.
- 12.10. Куликов В.Ю., Тимофеева Ю.С. Оценка сочетанного влияния различных вариаций геомагнитного и радиационного полей на осмотическую резистентность эритроцитов человека в условиях IN VITRO // ГБОУ ВПО «Новосибирский государственный медицинский университет» Минздравсоцразвития (г. Новосибирск), 2015.
- 12.11. Лукичева Т. А. Проблема сочетанного действия на человека неблагоприятных факторов; способы защиты при аварийных ситуациях. Автореф. д.м.н. – М., 1996.
- 12.12. Нормирование физических факторов
<http://doctor-centr.ru/info/normirovanie-fizicheskikh-faktorov>
- 12.13. Петин В.Т., Дергачёва И.П., Жураковская Г.П. Комбинированное биологическое действие ионизирующих излучений и других вредных факторов окружающей среды (Научный обзор) / Радиация и риск, вып. 12, 2001, с. 117-133.
- 12.13. Сочетанное действие вредных факторов
<http://12fan.ru/3338207846.html>
- 12.14. Суворов В. Г. Медико-биологические основы оценки сочетанного влияния производственной среды и трудового процесса на организм человека. Автореф. д.м.н. – М., 2004. – 277
- 12.15. Устьянцев С. Л. Способ гигиенической оценки влияния содержащихся в воздухе вредных веществ на организм человека (RU 2111700): А61В5/08 - измерительные устройства для оценки состояния органов дыхания (А61В 5/0205 имеет преимущество)

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
РАЗДЕЛ I. МАТЕРИАЛЫ ЗАЩИТЫ ОТ НЕИОНИЗИРУЮЩИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ И ИЗЛУЧЕНИЙ	4
ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ЗАЩИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К НИМ ТРЕБОВАНИЯ.....	9
1.1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ЗАЩИТНОЙ СРЕДЫ.....	9
1.1.1. МАКРОСКОПИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СРЕДЫ	9
1.1.2. СВЯЗЬ ВЕКТОРОВ ПОЛЯ В ПОЛЯРИЗУЕМЫХ СРЕДАХ	22
1.1.3. РАЗГРАНИЧЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ ПО ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ.....	23
1.2. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ЭКРАНИРУЮЩИМ МАТЕРИАЛАМ	25
1.2.1. СТОЙКОСТЬ ЭКРАНИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ К ВНЕШНИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ	25
1.2.2. КОРРОЗИЯ ЭКРАНИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ	26
1.2.3. СТОЙКОСТЬ ЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ К ИОНИЗИРУЮЩИМ И НЕИОНИЗИРУЮЩИМ ИЗЛУЧЕНИЯМ	32
1.3. ОСОБЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ЭКРАНИРУЮЩИМ МАТЕРИАЛАМ.....	33
1.4. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ	35
ГЛАВА 2. СОВРЕМЕННЫЕ ОТРАЖАЮЩИЕ ЭКРАНИРУЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ.....	39
2.1. ОСОБЕННОСТИ ОТРАЖАЮЩИХ ЭКРАНИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ.....	39
2.1.1. ИЗОТРОПНЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	39
2.1.2. АНИЗОТРОПНЫЕ МАТЕРИАЛЫ	50
2.1.3. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ С АНИЗОТРОПНЫМИ СВОЙСТВАМИ, РЕКОМЕНДУЕМЫЕ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ЭКРАНОВ.....	52
2.2. СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКРАНИРОВАНИЯ.....	55
2.3. КОНСТРУКЦИИ ОТРАЖАЮЩИХ ЭКРАНОВ	57
2.4. РАСЧЁТ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОТРАЖАЮЩИХ ЭКРАНОВ ПРОСТЕЙШИХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ФОРМ.....	63

ГЛАВА 3. МАТЕРИАЛЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЙ	71
3.1. ОСОБЕННОСТИ СВЧ ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СПЕКТРА.....	71
3.2. ЭКРАНИРУЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ В СВЧ ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СПЕКТРА.....	72
3.2.1. ЗАЩИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ В СВЧ ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СПЕКТРА.....	72
3.2.2. СВОЙСТВА РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ	73
3.2.3. ТИПЫ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ	77
3.3. ВЫБОР ЭФФЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЙ	81
3.4. СОВРЕМЕННЫЕ ЭКРАНИРУЮЩИЕ И РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ.....	86
3.5. МНОГОСЛОЙНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ.....	89
3.5.1. ШИРОКОПОЛОСНЫЕ ПОГЛОТИТЕЛИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	89
3.5.2. ГИБКИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЭКРАНЫ И РАДИОПОГЛОТИТЕЛИ.....	91
3.6. ЭКРАНИРУЮЩИЕ СВОЙСТВА НЕГЕРМЕТИЗИРОВАННЫХ СИЛИКАГЕЛЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ	92
3.7. РАСЧЁТ ФУНКЦИЙ ЭКРАНИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ С РАДИОПОГЛОЩАЮЩИМИ МАТЕРИАЛАМИ	94
ГЛАВА 4. ЭКРАНИРУЮЩИЕ И ПОГЛОЩАЮЩИЕ СВОЙСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ	102
4.1. ЭКРАНИРУЮЩИЕ СВОЙСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	102
4.2. КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ	106
4.3. ЭКРАНИРУЮЩИЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПОЛА И СТЕН.....	109
4.3.1. МАГНЕЗИТО-ШУНГИТОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	109
4.3.2. РАДИО-ЭКРАНИРУЮЩИЕ ШУНГИТОВЫЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ	113
4.3.3. МАГНЕЗИАЛЬНО-БАРИТОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ	119
4.4. РАДИОПРОЗРАЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ	120
ГЛАВА 5. ЭКРАНИРУЮЩИЕ ТКАНИ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ	122
5.1. ВИДЫ ЭКРАНИРУЮЩИХ ТКАНЕЙ.....	122

5.1.1. ЗАЩИТНЫЕ ТКАНИ С МЕТАЛЛИЗАЦИЕЙ	122
5.1.2. ЗАЩИТНЫЕ ТКАНИ С НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ.....	128
5.1.3. ФУНКЦИОНАЛЬНО-АКТИВНЫЙ ТЕКСТИЛЬ	130
5.2. ЭКРАНИРУЮЩИЕ ТКАНИ С СЕТОЧНЫМИ МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ СЛОЯМИ.....	132
5.3. ЭКРАНИРУЮЩИЕ ТКАНИ С КОМБИНИРОВАННЫМИ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИМИ НИТЯМИ	134
5.4. ФОЛЬГИРОВАННЫЕ ЛЕНТЫ ДЛЯ ЭКРАНИРОВАНИЯ ОТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ	136
5.4.1. ФОЛЬГИРОВАННЫЕ ЛЕНТЫ ЗМ	136
5.4.2. ИНЖЕНЕРНЫЙ НАБОР ЭКРАНИРУЮЩИХ ЛЕНТ	139
5.4.3. АБСОРБЕРЫ, ПОГЛОЩАЮЩИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗЛУЧЕНИЯ (СЕРИЯ АВ 5000)	141
5.5. НАНО-МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ СПЕЦОБЪЕКТОВ.....	142
5.6. ЭКРАНИРУЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ ПО ТЕХНОЛОГИИ СТЕЛС (STEALTH).....	147
5.7. ОБЛАСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭКРАНИРУЮЩИХ ТКАНЕЙ	154
5.8. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАТУХАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ТКАНЬЮ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ	158
ГЛАВА 6. МАТЕРИАЛЫ ЗАЩИТЫ ОТ ФОТОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ..	164
6.1. ГЕОМЕТРИЯ ШИРОКОГО ПУЧКА. ПРОСТРАНСТВЕННО- ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАССЕЯННОГО В СРЕДЕ ИЗЛУЧЕНИЯ	164
6.2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКО-УГЛОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАССЕЯННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ГРАНИЦЕ СРЕДЫ.....	174
6.3. ПРИБЛИЖЕННЫЕ СПОСОБЫ УЧЁТА РАССЕЯННОГО ФОТОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В МАТЕРИАЛЕ ИСТОЧНИКА И ЗАЩИТЫ.....	188
6.4. ЗАЩИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ОТ ФОТОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	191
ГЛАВА 7. МАТЕРИАЛЫ ЗАЩИТЫ ОТ α И β ИЗЛУЧЕНИЙ.....	198
7.1. ЗАЩИТА ОТ ВНЕШНИХ ПОТОКОВ α - ЧАСТИЦ	198
7.2. ЗАЩИТА ОТ ВНЕШНИХ ПОТОКОВ ЭЛЕКТРОНОВ И ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	201
7.3. ЗАЩИТА ОТ ВНЕШНЕГО β - ИЗЛУЧЕНИЯ.....	207
ГЛАВА 8. МАТЕРИАЛЫ ЗАЩИТЫ ОТ НЕЙТРОНОВ	209
8.1. ПРОСТРАНСТВЕННО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НЕЙТРОНОВ В СРЕДАХ	209

8.2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКО-УГЛОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАСSEЯННОГО НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ГРАНИЦЕ СРЕДЫ.....	216
8.3. МЕТОД ДЛИН РЕЛАКСАЦИИ	218
8.4. СЕЧЕНИЕ ВЫВЕДЕНИЯ	220
8.5. ДОЗОВЫЙ СОСТАВ НЕЙТРОНОВ В ЗАЩИТНЫХ СРЕДАХ.....	234
8.6. КОЭФФИЦИЕНТЫ НАКОПЛЕНИЯ ПОДПороГОВЫХ НЕЙТРОНОВ.....	237
8.7. ВТОРИЧНОЕ γ - ИЗЛУЧЕНИЕ В ЗАЩИТЕ	243
ГЛАВА 9. ЗАЩИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ	253
9.1. КРИТЕРИИ ВЫБОРА ЗАЩИТНОГО МАТЕРИАЛА.....	253
9.2. ЗАЩИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ СТАЦИОНАРНЫХ УСТАНОВОК ...	258
9.3. ЗАЩИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ТРАНСПОРТНЫХ УСТАНОВОК.....	264
РАЗДЕЛ III. МАТЕРИАЛЫ ЗАЩИТЫ ОТ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ	267
ВВЕДЕНИЕ.....	267
ГЛАВА 10. МАТЕРИАЛЫ ЗАЩИТЫ ОТ АКУСТИЧЕСКОГО ШУМА ...	269
10.1. МАТЕРИАЛЫ ЗАЩИТЫ ОТ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ШУМА	269
10.2. МАТЕРИАЛЫ ЗАЩИТЫ ОТ ИНФРАЗВУКА	274
10.3. МАТЕРИАЛЫ ЗАЩИТЫ ОТ УЛЬТРАЗВУКА.....	279
ГЛАВА 11. МАТЕРИАЛЫ ЗАЩИТЫ ОТ ВИБРАЦИИ.....	280
11.1. ВИБРОИЗОЛИРУЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ	280
11.2. ВИБРОПОГЛОЩАЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ	280
11.3. ВИБРОГАСЯЩИЕ КОМПОЗИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ	282
11.4. ВИБРОДЕМПФИРУЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ	287
11.5. ВИБРОДЫШАЩИЕ МАТЕРИАЛЫ.....	288
ГЛАВА 12. ОСОБЕННОСТИ ЗАЩИТЫ ПРИ СОЧЕТАННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ И ДРУГИХ ФАКТОРОВ НА ЧЕЛОВЕКА.....	292
12.1. ОБЩИЕ ПОДХОДЫ	292
12.2. ОСОБЕННОСТИ СОЧЕТАННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ШИРОКОГО СПЕКТРА ЧАСТОТ	296
12.3. ОСОБЕННОСТИ СОЧЕТАННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ И ДРУГИХ ФИЗИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ЧЕЛОВЕКА.....	299
12.4. ОСОБЕННОСТИ СОЧЕТАННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА БИОСФЕРУ И ЧЕЛОВЕКА	301

12.5. ОЦЕНКА СОЧЕТАННОГО ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАЦИЙ ГЕОМАГНИТНОГО И РАДИАЦИОННОГО ПОЛЕЙ НА ЧЕЛОВЕКА.....	310
12.6. ОСОБЕННОСТИ СОЧЕТАННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ШУМА И ДРУГИХ ФИЗИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ЧЕЛОВЕКА	312
12.7. НОРМИРОВАНИЕ СОЧЕТАННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ И ДРУГИХ ФАКТОРОВ НА ЧЕЛОВЕКА	315
12.8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	323
БИБЛИОГРАФИЯ.....	326