

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Под общей редакцией Е.А. Крамер-Агеева

*Рекомендовано УМО «Ядерные физика и технологии»
в качестве учебного пособия
для студентов высших учебных заведений*

Москва 2011

УДК 621.039.58(075)+539.1.04(075)
ББК 31.4я7+22.383я7
О-75

Безопасность жизнедеятельности: Учебное пособие / Е.А. Крамер-Агеев, И.К. Леденев, Н.И. Морозова, А.А. Званцев, Н.Н. Могиленец, С.И. Хайретдинов; под общей ред. Е.А. Крамер-Агеева. М.: НИЯУ МИФИ, 2011. 172 с.

Подготовлено в полном соответствии с ФГОС по направлению 140000 «Ядерные физика и технологии» по дисциплине «Безопасность жизнедеятельности». Приведены задачи и контрольные вопросы по основным темам курса: концептуальные вопросы безопасности, радиационная безопасность, электробезопасность, опасности электромагнитной и химической природы и поражающее действие ядерного взрыва. По каждой теме в сжатой форме представлен теоретический материал и таблицы справочного характера. В пособие включены описания семи лабораторных работ по радиационной и электробезопасности.

Предназначено для студентов инженерно-физических, инженерно-математических и физических специальностей, а также для переподготовки специалистов по техническим направлениям.

Подготовлено в рамках Программы создания и развития НИЯУ МИФИ.

Рецензент д-р техн. наук, проф. В.Т. Самосадный (НИЯУ МИФИ)

ISBN 978-5-7262-1484-9

© Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ», 2011

Редактор М.В. Макарова
Оригинал-макет подготовлен М.В. Макаровой

Подписано в печать 15.12.2010. Формат 60х84 1/16
Уч.-изд.л. 13,0. П.л. 10,75. Тираж 1000 экз.
Изд. № 1/4/87. Заказ № 29.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».
115409, Москва, Каширское ш., 31

ООО «Полиграфический комплекс «Курчатовский».
144000, Московская область, г. Электросталь, ул. Красная, д. 42

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	4
ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	6
1. Концептуальные вопросы безопасности жизнедеятельности	6
2. Источники ионизирующих излучений и дозиметрические характеристики их полей	25
3. Взаимодействие ионизирующих излучений с веществом	36
4. Нормирование радиационной безопасности. Защита от ионизирующего излучения	52
5. Электробезопасность. Начальные представления	66
6. Особенности опасностей электромагнитной природы	73
7. Поражающие факторы ядерного взрыва	88
8. Химическая опасность и принципы ее нормирования	93
ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	108
Работа 1. Определение основных величин, необходимых для расчета защиты от фотонного излучения	108
Работа 2. Определение активности источника ионизирующего излучения ...	115
Работа 3. Измерение мощности дозы фотонного излучения и мощности эквивалентной дозы смешанного излучения	127
Работа 4. Приборы и методы индивидуального дозиметрического контроля	135
Работа 5. Измерение концентрации радона радиоактивных аэрозолей в воздухе	143
Работа 6. Измерение загрязненности поверхности радиоактивными веществами	150
Работа 7. Способы обеспечения электробезопасности	159
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	171
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	172

ПРЕДИСЛОВИЕ

Область знаний, изучению которых подчинена вузовская учебная дисциплина «Безопасность жизнедеятельности» (БЖД), аккумулирует широкий перечень проблем производственной деятельности. Эта дисциплина, будучи включена в программы вузов более 20 лет назад, приобрела статус дисциплины высокой значимости. Актуальность знаний по проблематике БЖД диктуется необходимостью защиты людей и окружающей среды от возрастающих по величине ущерба опасностей, порождаемых в процессе взаимодействия человека и техносферы. Ныне осознание людьми значимости этой проблемы можно увидеть хотя бы в появлении ориентированных на безопасность таких терминов, как «человеческий фактор», «формирование культуры безопасности».

Подготовка студентов в НИЯУ МИФИ нацелена на обеспечение кадрами предприятий атомной и смежных с ней отраслей. Соответственно, в учебной программе дисциплины «Безопасность жизнедеятельности» в перечне изучаемых проблем предусмотрены акценты на проблеме радиационной безопасности с учетом таких требований нормативных документов, как НРБ-99/2009, ОСПОРБ-99.

Данное учебное пособие предназначается для пользования студентами при подготовке и проведении практических занятий по дисциплине «Безопасность жизнедеятельности». Построение пособия соответствует тематике практических занятий, предусмотренных программой курса. Учебный материал по каждой теме содержит обзорное изложение теоретических основ по теме занятия, задачи и задания, контрольные вопросы, а также описания лабораторных работ. Это, по мнению авторов, позволяет использовать учебное пособие как в аудиторном режиме обучения, так и при самостоятельной работе студентов по закреплению теоретических знаний и развитию навыков практической работы.

Пособие также будет полезным для преподавателей, проводящих занятия по данной дисциплине. Количество вариантов возможных заданий и их специфика позволяют преподавателю маневрировать ими с учетом профиля подготовки студентов учебных групп.

При подготовке пособия авторы учитывали предстоящий переход системы образования РФ на двухуровневый режим, для НИЯУ МИФИ – с сохранением специалитета по некоторым направлениям обучения. Материал пособия, соответственно, согласован с принятой учебной программой для уровня бакалавриата.

В написании учебного пособия приняли участие: д-р физ.-мат. наук, проф. Е.А. Крамер-Агеев в соавторстве с кандидатом техн. наук, доц. И.К. Ледневым (темы 2 – 4); И.К. Леднев (темы 1, 5 – 7); ст. преподаватель Н.И. Морозова (тема 8); ст. преподаватель А.А. Званцев, ст. преподаватель Н.Н. Могиленец, С.И. Хайретдинов – в соавторстве (практическая часть). Общее редактирование пособия выполнено Е.А. Крамер-Агеевым.

Авторы благодарны за полезные замечания в процессе рецензирования и коллегам по кафедре № 1 за возможность использования их накопленного опыта проведения занятий при подготовке пособия к изданию.

По мнению авторов, пособие может быть использовано в системе повышения квалификации кадров.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1. КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Прежде всего, кратко изложим базовые представления, на которых строится область знаний и практики, именуемая «Безопасностью жизнедеятельности».

Опасности всегда были и будут постоянными попутчиками человечества. Они преследуют людей в облике *опасных случаев*, которые целесообразно разграничить на две разновидности: *опасные ситуации* (потенциальные угрозы) и *опасные события* (состоявшиеся поражения чего-либо жизненно значимого для людей). Идентификация опасности термином «опасные случаи» подчеркивает то, что их проявление, как правило, случайно.

Опасности многообразны. При их систематическом исследовании, при выработке мер противодействия им они обычно подвергаются классификации по некоторым критериям, чем обеспечивается возможность обособленного изучения интересующей разновидности опасности.

Защита от опасностей нацелена на то, чтобы максимально снизить *вредоносность опасных случаев*, по крайней мере, до некоторого, установленного законодательными нормами и (или) экспертным путем *приемлемого уровня*. Сравнительно недавно обособившаяся область знаний и практики, на основе которой строится современная оборона от опасностей, носит название «Безопасность жизнедеятельности» (БЖД).

Алгоритм научного рассмотрения проблематики БЖД предусматривает использование постулатов, понятий. Исходными понятиями БЖД можно считать ущерб, риск, поток (или в более общем представлении – поле) опасных случаев.

Ущерб – количественное понятие, обозначающее вредоносность опасных случаев. Ущерб может быть материальным или моральным. В качестве количественной меры ущерба чаще всего используются денежные единицы. Помимо денежных единиц величину ущерба, особенно ущерба морального, часто бывает более целесообразно выражать степенью поражения (повреждения) и количеством пораженных каких-либо условно неделимых (унитарных) материальных объектов. Примерами таких единиц ущерба могут служить: один дом, одна квартира, один гектар леса или посевов, один человек, в каждом случае – с указанием степени их повреждения (поражения).

Риск – понятие, определяющее возможность подразумеваемого по умолчанию или оговоренного ущерба, который может быть нанесен рассматриваемой опасностью. Например, речь может идти о риске для пешехода погибнуть в ДТП при однократном переходе улицы, – один вариант и другой вариант – риск попасть в ДТП для человека, систематически переходящего конкретную улицу на протяжении, скажем, десяти лет, и получить при этом увечье. Другими словами, обстоятельства, в которых формируется риск, могут быть различными. С учетом этого термин «риск» следует толковать как качественное понятие, а для количественного выражения риска использовать следующие расширенные термины:

эпизодический риск – риск, определяющий возможность причинения опасностью подразумеваемого ущерба в конкретно рассматриваемой ситуации (эпизоде), его количественной мерой обычно служит вероятность;

индивидуальный (унитарный) риск – риск, определяющий среднестатистическую частоту подразумеваемых опасных случаев с оговоренным ущербом в истории индивидуума (или любого другого унитарного объекта поражения);

социальный (ассоциативный) риск – риск, определяющий частоту опасных случаев с числом пораженных элементов рассматриваемой ассоциации, не менее заданного (переменного) в каждом из них (социальный риск является функцией этого переменного числа).

Случайность опасных событий и ситуаций по времени их совершения чаще всего описывается моделью пуассоновского распределения:

$$P(n) = [(\lambda \tau)^n / n!] \exp(-\lambda \tau), \quad (1.1.1)$$

где $P(n)$ – вероятность того, что за промежуток времени τ произойдет ровно n опасных случаев при условии, что среднестатистическая частота их повторения равна λ и остается постоянной во времени.

При необходимости математически описать случайность опасных случаев и во времени, и по территории, может быть применена аналогичная по конструкции формула:

$$P(n) = [N\tau\sigma / TS]^n / n! \exp(-N\tau\sigma / TS), \quad (1.1.2)$$

где $P(n)$ – вероятность того, что за промежуток времени τ в регионе площадью σ произойдет ровно n опасных случаев; N – математическое ожидание числа опасных случаев за промежуток времени T на территории площадью S .

При исследовании совокупности опасных случаев (с большим перечнем объектов поражения или (и) с различной степенью их поражения) продуктивным может стать представление такой ситуации в виде марковского случайного процесса, который мыслится как случайные мгновенные изменения системой (совокупностью) объектов своих состояний S_i , $i = 1, 2, \dots, i, \dots, m$. Среднестатистическую частоту случайных событий изменений состояний в направлении из i -го в j -е обозначим λ_{ij} . Тогда производная по времени от вероятности i -го состояния может быть выражена уравнением Колмогорова:

$$dP_i(t)/dt = -P_i(t) \sum_{j=1}^m \lambda_{ij} + \sum_{j=1}^m P_j \lambda_{ji}, \quad i, j = 1, 2, \dots, m. \quad (1.1.3)$$

Элементы теории надежности. Техногенные опасности, когда они анализируются в «упаковке БЖД», чаще всего исследуются по критериям риска. В то же время применительно к некоторым из этих проблем существует более обстоятельный инструмент анализа функциональных качеств технических устройств – теория надежности. Ее методами можно эффективно исследовать техногенные предвестники опасных событий, прогнозировать показатели качества сложных технических изделий и систем, оптимизировать режим эксплуатации изделий и т.п.

В теории надежности всевозможные технические объекты условно делят на элементы и системы. *Элементом* именуется техническое устройство, условно не подлежащее расчленению и автономно характеризруемое каким-либо показателем надежности. *Сис-*

темой называется совокупность элементов определенным образом функционально объединенных между собой.

Надежность технического изделия – понятие сложное, его определение зависит от назначения изделия, цели проводимого анализа и т.д. В формате нашего рассмотрения проблемы надежности будем придерживаться следующего определения. *Надежность любого технического изделия* – его способность сохранять качества, совокупность которых определяет его пригодность для использования по назначению. К числу критериев, определяющих надежность, чаще всего относят: *безотказность*, *долговечность* и *ремонтпригодность*. В таких случаях надежность технического изделия количественно можно выражать вероятностью того, что в изделии не случится ни одного внезапного или постепенно созревающего отказа на протяжении заданного гарантийного срока с соблюдением регламента эксплуатации. Нетрудно видеть, что понятие «надежность» базируется на понятии «безотказность», правда с оговоркой о сроке службы и о соблюдении регламентов эксплуатации. Делая такие оговорки, многие авторы эти два понятия принимают как синонимы.

Исследование надежности с использованием критерия безотказности может быть основано на применении математических моделей теории случайных процессов, в частности применительно к внезапным отказам – с применением уравнений Колмогорова (см. формулу (1.1.3)).

Количественным показателем надежности чаще всего служит вероятность сохранения надежности или безотказности. Эта вероятность является убывающей функцией времени, обозначим ее $P(t)$ и будем именовать *законом надежности*. Время безотказной работы t – величина случайная, ее функция распределения $F(t)$ и плотность распределения $f(t)$ связаны с критерием надежности:

$$F(t) = 1 - P(t), \quad f(t) = dF(t)/dt = -dP(t)/dt. \quad (1.1.4)$$

Среднее время безотказной работы, т.е. его математическое ожидание равно:

$$\bar{t} = \int_0^{\infty} t f(t) dt. \quad (1.1.5)$$

Наиболее простой и распространенной математической моделью закона надежности является так называемый «экспоненциальный закон надежности», выражаемый формулой:

$$P(t) = e^{-\lambda t}, \quad (1.1.6)$$

λ – параметр с размерностью обратной размерности времени, в частном случае – константа.

Для такого частного случая справедливы соотношения:

$$F(t) = 1 - \exp(-\lambda t), \quad f(t) = \lambda \exp(-\lambda t),$$

откуда

$$\lambda = \frac{f(t)}{P(t)} = -P'(t) / P(t) = -\frac{d}{dt}[\ln P(t)] = 1 / \bar{t}. \quad (1.1.7)$$

Параметр λ называется интенсивностью потока отказов и имеет значимый физический смысл. Если взять для испытания на надежность n_0 однотипных элементов и в процессе испытания в промежуток времени от t до $t + \Delta t$ зарегистрировать число отказавших элементов $m(t, t + \Delta t)$, то при условии, что к моменту t число работоспособных элементов окажется равным $n(t)$, будет справедливым соотношение:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{m(t, t + \Delta t)}{n(t) \cdot \Delta t}. \quad (1.1.8)$$

Это позволяет трактовать λ как долю выходящих из строя элементов в единицу времени. Или по иному, λ – условная плотность вероятности отказа элемента в момент времени t , при условии, что до момента t он функционировал безотказно. Кстати, для $f(t)$ справедливо:

$$f(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{m(t, t + \Delta t)}{n(0) \cdot \Delta t}.$$

Численное значение интенсивности потока отказов элемента (любого технического устройства) можно найти опытным путем, подвергая опытные данные обработке согласно формуле (1.1.8). Параметр λ при этом может оказаться как постоянной, так и переменной во времени величиной. В любом случае вероятность безотказной работы на протяжении времени t может быть найдена по соотношению:

$$P(t) = \exp \left[- \int_0^t \lambda(t') dt' \right]. \quad (1.1.9)$$

Классическими задачами теории надежности являются задачи на исследование сложных систем, состоящих из элементов, надежность которых задана или ее требуется найти, удовлетворяя какому-либо условию. При этом возможны различные варианты функционального объединения элементов в систему, различные режимы их работы и другие нюансы. Приведем наиболее типичные варианты задач теории надежности.

А. Системы с нерезервированными элементами. В такой системе отказ любого элемента равносильен отказу всей системы. Физически элементы могут быть соединены между собой функциональными связями как угодно, но с позиций надежности системы они могут быть представлены в виде цепочки последовательно соединенных элементов системы. Отказ любого из них можно считать обрывом такой цепочки, а следовательно, выходом из строя всей системы. Пользуясь представлениями теории вероятности, надежность нерезервированной системы ($P_S(t)$) можно выразить через показатели надежности входящих в нее элементов $P_i(t)$, $i = 1, 2, \dots, k$:

$$P_S(t) = \prod_{i=1}^k P_i(t), \quad (1.1.10)$$

а интенсивность потока отказов в системе $\Lambda_S(t)$ – формулой:

$$\Lambda_S(t) = \sum_{i=1}^k \lambda_i(t). \quad (1.1.11)$$

Б. Системы с «горячим» режимом резервных элементов. В системах такой разновидности любой i -й из ее элементов может быть задублирован функционально идентичными элементами с функциями надежности $P_{i1}(t)$, $P_{i2}(t)$, ..., $P_{ij}(t)$, ..., $P_{ik}(t)$. Все задублированные элементы включены в рабочий режим, но функционально работают поочередно, по мере выхода из строя функционально нагруженного элемента. Переключение резервных элементов происходит мгновенно в момент отказа функционально нагруженного элемента. Зарезервированный элемент остается работоспособным до момента отказа последнего из резервных элементов. Надежность

задублированного таким образом элемента может быть определена по соотношению:

$$P_i(t) = 1 - \prod_{j=1}^k [1 - P_{ij}(t)] . \quad (1.1.12)$$

Определив таким образом надежность резервированной группы i -го элемента, в дальнейшем эту группу можно рассматривать как единый i -й элемент системы с показателем надежности, определяемым по формуле (1.1.12). Прделав эту процедуру с каждым элементом системы, получим преобразованную систему, надежность которой можно анализировать как для системы с условно нерезервированными элементами

В. Системы с облегченным и холодным режимами резервных элементов. В системах подобного типа каждый i -й элемент может иметь резервные элементы, но в отличие от предыдущего случая тот экземпляр зарезервированного элемента, который функционально нагружен, характеризуется интенсивностью потока отказов λ_{i0} , в то время как остальные резервные элементы, находясь в функционально облегченном режиме, подвержены потокам отказов с интенсивностью $\lambda_{ij} < \lambda_{i0}, j = 1, 2, \dots, k_i$. При отказе функционально нагруженного элемента мгновенно его функции переключаются на один из резервных и одновременно интенсивность потока отказов для него возрастает до значения λ_{i0} . Элемент остается работоспособным до момента отказа последнего резервирующего элемента.

Расчет показателей надежности зарезервированных таким способом элементов требует применения достаточно громоздкого аппарата теории вероятностей. Приведем формулу для расчета функции надежности элемента $P_i(t)$ при упрощающем условии: резервные (функционально не нагруженные) элементы находятся в «холодном» режиме, для них $\lambda_{ij} = 0$:

$$P_i(t) = \exp(-\lambda_{i0}t) \sum_{j=0}^{k_i} (\lambda_{i0}t)^j / (j!) . \quad (1.1.13)$$

Еще раз отметим, что исследование вопросов надежности в общем случае (в том числе, с комбинацией способов резервирования) можно успешно выполнять, используя аппарат теории марковских процессов.

Принципы обоснования приемлемого риска. В условиях непрерывного и возрастающего натиска опасностей человечество вынуждено принимать масштабные и часто весьма дорогостоящие проекты по обеспечению своей безопасности. Естественно, такие проекты должны быть адекватны угрозам, а затраты на них – обоснованными. Не ставя перед собой недостижимую цель – обеспечить абсолютную безопасность, люди стремятся минимизировать риски, уменьшить их, по крайней мере, до некоторого приемлемого уровня.

Вопрос о приемлемом риске является отправным в стратегии обеспечения безопасности жизнедеятельности. Субъективные представления об уровне приемлемого риска чрезвычайно разнообразны, они могут меняться под впечатлением от отдельных опасных событий и иных обстоятельств жизни и деятельности. Индивидуальные суждения о нем основываются на личных привычках, предпочтениях, предубеждениях. Часто многие люди осознанно идут на добровольное повышение риска ради удовольствий, развлечений, удовлетворение амбиций и т.п. Такими случаями являются табакокурение, автолихачество, участие в азартных играх с заведомо отрицательным суммарным итогом, многие виды спорта и т.д. Другие идут на очевидное повышение личного риска из альтруистических побуждений, например спасая других людей, животных, не принадлежащие им материальные ценности. Все такие случаи следует отнести к феномену добровольного повышения риска. В общем случае следует различать риск *добровольный* и *вынужденный*. Риск, порождаемый производственной деятельностью, относится к вынужденному.

В общественном сознании случаи добровольного принятия повышенного риска, как правило, поощряются, реже – осуждаются. Подобное поведение является элементом личной свободы. Какому-либо официальному нормированию добровольный риск не подлежит, за исключением, возможно, совсем экзотических случаев.

Другое дело – риск вынужденный. Общественное мнение воспринимает его, как правило, враждебно, как покушение на личную свободу или, по крайней мере, неприязненно. Такое восприятие усиливается в ситуациях, когда риск обусловлен опасностью, суть которой человеку не понятна или перед лицом которой он ощущает себя незащищенным.

Методологию обоснования приемлемого вынужденного риска мы бегло рассмотрим здесь применительно к техногенным опасностям. Эту проблему логично обозначить термином *безопасность деятельности*. Именно в такой постановке эта проблема обычно анализируется специалистами в области БЖД и чаще всего применительно к новым технологиям и крупномасштабным проектам. При этом обычно ограничиваются учетом *рисков техногенной гибели людей*. Приемлемые риски иного содержания часто изучаются, например, в целях технико-экономического обоснования проектов, применительно к страхованию и т.п.

В настоящее время специалисты по проблематике БЖД используют различные методики обоснования приемлемого техногенного риска смерти человека, различающиеся постановкой задачи и ее формализации. Например, при анализе техногенной смертности требуется принимать в учет возможность «инкубационного периода» проявления последствий поражения, возможность нелетальных разновидностей поражения и т.д.

Оставляя за границами нашего рассмотрения подобные тонкости проблемы, мы ограничимся рассмотрением не сложных по постановке методических приемов обоснования приемлемого риска.

Отправным моментом обоснования приемлемого риска является выбор значения индивидуального риска гибели, которое следует принять за *пренебрежимый индивидуальный риск* – $r_{\text{пр}}$. Его численное значение обычно выбирают, исходя из сформировавшегося фонового риска смертности, обусловленной всевозможными нетехногенными форс-мажорными обстоятельствами жизнедеятельности. Анализируя такие обстоятельства, можно оценить численное значение фонового индивидуального риска – $r_{\text{ф}}$. Для большинства регионов его значение находится в пределах от 10^{-5} до 10^{-6} год $^{-1}$. Производственная деятельность признается безопасной, если индивидуальный риск, обусловленный ею, на порядок ниже фонового:

$$R_{\text{пр}} = 0,1r_{\text{ф}}.$$

Для однозначности наших нестрогих рассуждений примем:

$$r_{\text{пр}} = 10^{-6} \text{ год}^{-1}.$$

Это значение, как и принято специалистами, примем за минимальное значение приемлемого риска $r_{\text{min}} = 10^{-6}$ год $^{-1}$.

Второй отправной момент обоснования приемлемого риска состоит обычно в принятии постулата: его максимальное значение принимается равным стократному значению минимального $r_{\max} = 100r_{\min}$; применительно к нашим суждениям – это 10^{-4} год⁻¹.

Таким образом, область приемлемого риска определяется границами его предельных значений (рис. 1.1).

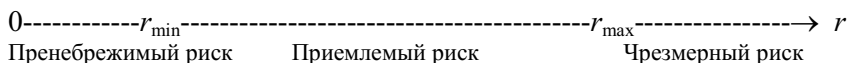


Рис. 1.1.1. Область приемлемого риска

В настоящее время как в нашей стране, так и в других технически развитых странах, безопасность производственной безопасности обеспечивается согласно трем принципам, которые в упрощенном виде могут быть выражены так:

- 1 – нормирование пределов приемлемого риска;
- 2 – целесообразность деятельности (превышение пользы над затратами);
- 3 – оптимизация мер обеспечения безопасности (выбор значения риска в пределах приемлемого риска с максимальной пользой).

Соблюдение первого принципа выполняется путем обоснования пределов приемлемого риска, о чем уже шла речь.

Второй и третий принципы обычно удовлетворяются путем проведения технико-экономического исследования, алгоритм которого будет понятен из следующего изложения.

Пусть проектная стоимость продукта, создаваемого некоторым видом проектируемой производственной деятельности, выражается величиной V (это польза от производственной деятельности). Допустим далее, что для реализации этой деятельности необходимо затратить материальные, трудовые и иные ресурсы общей стоимостью P . Разность $V - P$ представляет собой кажущуюся прибыль, обозначим ее S .

Предполагаемая деятельность, как и всякая иная, создает опасность. Индивидуальный риск гибели и иных поражений людей – участников данной производственной деятельности – составит некоторую предельно возможную величину $r_{\text{пред}} \geq r_{\max}$. Для предотвращения, точнее для снижения риска до некоторого приемлемого значения r^* , необходимо предусмотреть расходы на обеспечение

производственной безопасности; по логике вещей их величина (X) является убывающей функцией риска $X(r^*)$.

Согласно концепции БЖД, абсолютная безопасность не достижима, риск не может быть снижен до нуля. Следовательно, анализируемая деятельность практически обязательно будет сопровождаться опасными событиями. Для преодоления и ликвидации их негативных последствий необходимо предусмотреть дополнительные расходы, обозначим их величину $Y(r^*)$ и заметим, что она (также по логике наших рассуждений) является возрастающей функцией риска. Далее предположим, что функции $X(r^*)$ и $Y(r^*)$ каким-то образом установлены.

С учетом последних замечаний реальная прибыль от рассматриваемой производственной деятельности составит:

$$S = P - [V + X(r^*) + Y(r^*)] \quad (1.1.14)$$

и она зависит от значения приемлемого риска.

Второй принцип обоснования приемлемого риска будет удовлетворен, если для функции $S(r^*)$ найдутся такие значения $r_{\min} < r^* < r_{\max}$, при которых она будет положительна. Удовлетворение третьему принципу обеспечивается в точке максимума этой функции. Таким образом, процедура оптимизации может быть сведена к поиску экстремума функции $S(r^*)$.

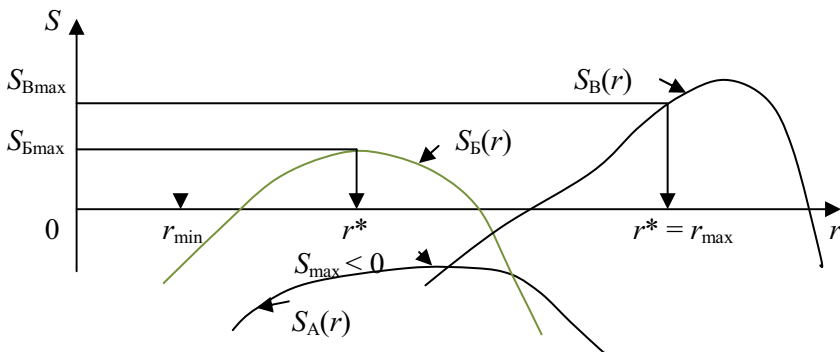


Рис. 1.1.2. Поиск экстремума функции $S(r)$

На рис. 1.1.2 приведено несколько гипотетических графиков этой функции. Графики Б и В соответствуют случаям допустимости анализируемой производственной деятельности с позиций норм безопасности, график А — случаю недопустимости по второму

принципу. В случае В, когда экстремум функции лежит правее точки $r_{\max}$, должно быть принято условие: $r^* = r_{\max}$.

Примеры и задачи *

1. Число шахтеров, работающих в шахтах региона, равно 10 000. За последние 5 лет в регионе имели место трагические случаи гибели шахтеров в производственных авариях и вызванного ими материального ущерба. Зарегистрированные данные по этим случаям приведены в табл. 1.1.1.

Таблица 1.1.1

Текущее время, сут.	Число погибших	Материальный ущерб, руб.
0	—	—
51	7	10^5
83	5	$2 \cdot 10^4$
105	4	10^6
185	2	$5 \cdot 10^5$
200	8	10^5
220	3	10^6
305	2	10^5
340	2	10^5
450	2	$7 \cdot 10^5$
490	3	$5 \cdot 10^4$
560	10	$8 \cdot 10^6$
640	15	10^6
750	3	$2 \cdot 10^6$
810	2	$9 \cdot 10^5$
990	4	10^6
1160	3	$5 \cdot 10^5$
1220	3	10^6
1300	6	$4 \cdot 10^5$
1400	5	10^6
1460	7	$8 \cdot 10^5$
1580	12	$5 \cdot 10^6$
1720	2	10^6

Используя данные приведенной таблицы, необходимо:

* Здесь и далее по тексту под N следует подразумевать число, равное порядковому номеру фамилии пользователя в алфавитном списке учебной группы.

определить индивидуальный риск гибели шахтера в производственной аварии;

рассчитать и построить график зависимости социального риска гибели шахтеров в производственных авариях;

определить унитарный риск уничтожения материальных ценностей, оцениваемых в рублях, если общая стоимость объектов шахтерского хозяйства составляет 10^8 руб.

2. За три года сейсмического мониторинга на сейсмической станции было зарегистрировано 72 сейсмических события.

Какова вероятность того, что за предстоящий месяц на станции будет зарегистрировано:

а) ровно N сейсмических событий;

б) не более $N + 1$ сейсмических событий?

При этом поток сейсмических событий считать пуассоновским.

Ответ (при $N = 2$): а) $2e^{-2}$; б) $\frac{19}{3}e^{-2}$.

3. Можно ли утверждать, что поток некоторых опасных случаев является пуассоновским, если для него математическое ожидание числа событий за заданный промежуток времени равно дисперсии этого числа?

4. В каком соотношении находятся математическое ожидание и дисперсия случайного времени между моментами опасных случаев, если их поток является пуассоновским?

5. Используя данные задачи 1, определить порядок потока Эрланга, который можно использовать в качестве математической модели приведенной в задании последовательности опасных событий.

Ответ: порядок потока равен трем.

6. Плотность распределения вероятности случайного времени между событиями потока линейно возрастает от нуля (при значении случайного времени, равном нулю) до максимального значения (при предельно возможном значении случайного времени, равном N секунд).

Определить порядок потока Эрланга, который можно использовать в качестве математической модели этого потока.

Ответ: 4.

7. Индивидуальный риск оказаться пострадавшим в ДТП для жителя некоторого региона с числом жителей в нем, равным 100000, составляет 10^{-4} год $^{-1}$.

Определить:

а) вероятность того, что произвольно взятый житель региона окажется пострадавшим в ДТП в период времени, равный N лет;

б) интенсивность потока пострадавших в ДТП среди жителей региона;

в) вероятность того, что в предстоящий год в регионе число пострадавших в ДТП окажется равным ровно N и не менее N .

Ответ:

а) приблизительно 0,001 (при $N = 10$);

б) 10 год^{-1} ;

в) $e^{-10} \cdot 10^{10} / 10!$ и $1 - e^{-10} \sum_{i=0}^9 (10^i) / i!$ (при $N = 10$).

8. На территории некоторого региона за прошедший достаточно длительный период времени среднестатистическая интенсивность некоторого вида опасных событий составила $\lambda \text{ год}^{-1} \cdot \text{км}^2$. Распределение событий по времени и территории региона соответствует модели пуассоновского поля. Выделим в этом регионе квартал площадью σ и зададимся предстоящим периодом времени длительностью τ . В обозначенном таким образом объеме пуассоновского поля может произойти любое число упомянутых событий с соответствующими вероятностями.

Определить, во сколько раз вероятность того, что в выделенном объеме пуассоновского поля произойдет ровно десять событий, окажется больше вероятности того, что десять событий произойдут в пределах заранее обособленной половины площади обозначенного квартала и к тому же в пределах обособленной половины обозначенного периода.

Ответ: $4^{10} e^{-3\lambda\sigma\tau/4}$.

9. Для графа состояний случайного процесса, приведенного на рис. 1.1.3, ввести обозначения состояний, выбрать значения интенсивностей потоков переходов для обозначенных стрелками переходов и для полученного таким образом размеченного графа процесса:

а) определить вероятность каждого состояния при бесконечной продолжительности процесса;

б) записать дифференциальное уравнение Колмогорова для одного из состояний процесса;

в) определить, будут ли вероятности всех обозначенных состояний процесса одинаковы, если интенсивности потоков событий по всем стрелкам графа состояний окажутся равными.

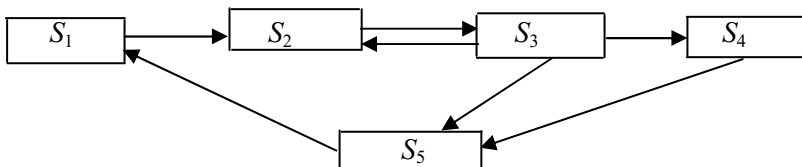


Рис. 1.1.3. Граф состояний случайного процесса

10. Лампа, используемая в уличном фонаре, выходит из строя с интенсивностью λ , поток отказов – эрланговский 2-го порядка. Вышедшая из строя лампа заменяется на новую, поток восстановлений – эрланговский 3-го порядка интенсивностью μ . Используя идею «псевдосостояний» случайного процесса, определить вероятности для двух возможных состояний лампы: а) лампа исправна; б) лампа неисправна. Процесс считать бесконечно длительным.

Ответ: $\mu / (\lambda + \mu)$, $\lambda / (\lambda + \mu)$.

11. Постоянная распада ядра материнского радионуклида равна λ_m . Дочернее ядро является также радионуклидом, для него постоянная распада равна λ_d . Ядро, образующееся при распаде дочернего (внучатое), – стабильное.

Методом теории марковских случайных процессов найти зависимости вероятностей от времени каждого из трех названных состояний ядра, начальное состояние которого – материнское.

Полученные соотношения использовать для преобразования их в зависимости активности от времени трех соответствующих радионуклидных препаратов.

12. На некотором полигоне запланировано проведение взрыва, момент которого равновероятно может быть в пределах от 12.00 до 14.00 объявленных суток. Приняты меры по обеспечению безопасности людей. Однако одна из малозаметных троп, проходящих через полигон, осталась бесконтрольной. По этой тропе намерен пройти путник. Момент его входа в опасную зону равновероятно может быть в пределах от 13.00 до 14.00, а время преодоления

опасной зоны составляет 30 мин. Если в момент взрыва путник окажется в опасной зоне, то он будет поражен.

Определить вероятность поражения путника.

Ответ: 3/16.

Подсказка. Задачу рекомендуется решить графически, рассмотрев разность двух случайных величин (моментов времени).

13. Интенсивность потока отказов некоторого изделия с момента включения его в работу увеличивается со временем t по закону: $\lambda(t) = 1 - \exp(-\alpha t)$, $\alpha = \text{const}$. Определить вероятность безотказной работы изделия при заданном времени безотказной работы T .

14. Некоторое изделие АЭС представляет собой совокупность трех элементов с интенсивностью потоков отказов в них, соответственно: $\lambda_i = i(N+10) \cdot 10^{-6} \text{ [ч}^{-1}\text{]}$; $i = 1; 2; 3$.

Отказы в элементах – независимые. Отказ изделия наступает при отказе хотя бы одного элемента.

Определить время безотказной работы изделия при вероятности безотказной работы равной 0,99.

15. Решить задачу 14 при условии: изделие становится отказавшим, когда откажут все три его элемента.

16. Решить задачу 14 при условии: изделие становится отказавшим, когда откажут любые два его элемента.

17. Элемент изделия с индексом $i = 1$, указанный в задаче 14, задублирован двумя элементами с одинаковыми показателями надежности для всех трех элементов задублированной группы. Дублирующие элементы включены в работу в режиме ненагруженного («холодного») резерва, без восстановления отказавших элементов.

Определить вероятность безотказной работы изделия при ее продолжительности равной 10^5 ч.

18. В условии задачи 17 изменить режим работы резервных элементов на нагруженный («горячий»), без восстановления.

Построить граф состояний задублированного элемента, записать уравнения Колмогорова, достаточные для решения вопроса, поставленного в задаче 17.

19. Выполнить задачу 18 при условии: режим работы резервных элементов – ненагруженный с восстановлением. Время восстановления – случайно, поток восстановлений каждого отказавшего элемента – пуассоновский интенсивностью μ .

20. Выполнить задачу 19, заменив в нем слово «ненагруженный» на «нагруженный».

21. С целью обеспечения надежности одного из функциональных блоков некоторого производственного комплекса предусмотрено дублирование данного блока. В рабочем режиме находится лишь один блок и в этом режиме в нем случаются отказы. Поток отказов является случайным пуассоновским интенсивностью λ . В резервном блоке в «холодном» режиме отказы не происходят. При отказе работающего блока в работу немедленно автоматически включается резервный, а отказавший блок поступает на ремонт. Среднее время восстановления отказавшего блока равно τ , поток событий восстановления блока – случайный, пуассоновский. Найти вероятность того, в процессе длительной эксплуатации производственного комплекса, в произвольный момент времени, он окажется неработающим по причине отказа в нем обоих блоков. Ремонтная бригада единственна и одновременно может заниматься восстановлением только одного блока.

Ответ: $(\lambda\tau)^2 / (1 + \lambda\tau + (\lambda\tau)^2)$.

22. Решить предыдущую задачу при условии, что в нормальном режиме работы комплекса оба задублированных комплекса включены в рабочий режим, отказы в них возникают независимо, с интенсивность λ в каждом, а комплекс сохраняет работоспособность при исправности хотя бы одного из зарезервированных блоков.

Ответ: $(\lambda\tau)^2 / \{2[1 + \lambda\tau + (\lambda\tau)^2 / 2]\}$.

23. Для оказания скорой медицинской помощи жителям некоторого населенного пункта создано медицинское учреждение с числом выездных бригад равным m . За одни сутки за медицинской помощью в учреждение поступает в среднем k вызовов, их поток – пуассоновский. Продолжительность обслуживания бригадой одного вызова – величина случайная, ее среднее значение равно τ , соответствующий поток обслуживаний – также пуассоновский.

Определить вероятность того, что на обращение нуждающегося в медицинской помощи будет немедленное реагирование, т.е. в момент обращения в учреждении будет хотя бы одна не задействованная выездная бригада.

Возможные значения параметров задачи:

$m = 3; 4; 5; 6$; $\tau = 1; 2; 3; 4; 5$ ч; $k = 10; 15; 20$ сут.⁻¹.

Ответ (при условии, что $m = 3$, $\tau = 3$ ч, $k = 10$ сут.⁻¹): 0,104.

24. $N + 10$ однотипных последовательно включенных элементов составляют рабочий блок некоторого агрегата. При отказе любого элемента блок становится неработоспособным. Поиск отказавшего элемента производится путем проверки работоспособности произвольно выбираемых участков последовательно включенных элементов. Если участок оказывается неработоспособным, делается вывод: отказавший элемент находится в контролируемом участке.

Какой тактики поиска отказавшего элемента следует придерживаться, чтобы число контрольных операций по проверке работоспособности участков элементов оказалось минимальным?

Чему равно минимальное число контрольных операций, создающих возможность однозначно определить отказавший элемент?

Ответ: минимальное число операций равно $\log_2(N + 10)$.

25. Проектный гарантированный срок работы производственного агрегата составляет 5 лет при вероятности безотказной работы равной 0,95. Определить вероятность того, что агрегат будет безотказно работать ровно N лет. Поток отказов считать пуассоновским.

Ответ: $0,95^{N/5}$.

26. Вероятность безотказной работы некоторого технического устройства $P(t)$ убывает по линейному закону от единицы при $t = 0$ до нуля при $t = T$.

Найти зависимость интенсивности отказов от времени, среднее время безотказной работы и значение гарантийного срока службы устройства, если требуемая надежность не должна быть ниже 0,90.

Рекомендация. По условию задачи $P(t) = 1 - \frac{t}{T}$. Положив $P(t) = 0,90$, можно найти гарантийный срок службы. Далее можно воспользоваться соотношением из (1.1.7) для определения $\lambda(t)$. Наконец, используя (1.5), можно определить среднее время безотказной работы.

27. Интенсивности потоков отказов для пяти элементов системы, изображенной на рис. 1.1.3, постоянны во времени и равны, соответственно, 0,1; 0,2; 0,3; 0,4 и 0,5 год⁻¹. Определить вероятность безотказной работы системы при непрерывной работе системы в течение одного года.

28. Решить задачу 19 при дополнительном условии: для одного из элементов системы предусмотрено резервирование двумя дополнительными элементами (конкретный задублированный элемент вы-

брать самостоятельно). Все дублирующие элементы идентичны с основными и функционируют в режиме «горячего» резерва.

29. Решить задачу 20 при измененном условии: дублирующие элементы функционируют в режиме «холодного» резерва.

30. Воспользуемся соотношением (1.1.14). Пусть $X = A \cdot r^{-a}$; $Y = B \cdot r^b$. Определить, при каких соотношениях между постоянными параметрами A, B, a, b производственная деятельность целесообразна.

Контрольные вопросы

1. Пояснить понятие «ущерб», способы его количественного выражения, привести пример.

2. Пояснить понятие «риск» и способы его количественного выражения с помощью трех расширенных понятий риска.

3. Пояснить понятие «социальный риск».

4. Какими тремя фундаментальными свойствами обладает стационарный пуассоновский поток случайных событий?

5. По какой логике формируются эрланговские потоки случайных событий и как по статистическим данным можно определить порядок эрланговского потока?

6. Как соотносятся между собой среднее значение и дисперсия для времени между событиями пуассоновского потока?

7. Записать и пояснить формулу Пуассона для случайного пуассоновского поля событий.

8. Записать в общем виде дифференциальное уравнение Колмогорова для вероятности произвольного состояния случайного процесса, заданного размеченным графом состояния.

9. В какие соотношения преобразуются дифференциальные уравнения Колмогорова при бесконечной продолжительности случайного беступикового процесса?

10. Как развивается случайный процесс, если граф состояний имеет тупиковые состояния?

11. Пояснить логику приведения размеченного графа состояний, содержащего эрланговские потоки случайных событий, к графу состояний с пуассоновскими потоками событий (введение «псевдосостояний»).

2. ИСТОЧНИКИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ И ДОЗИМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИХ ПОЛЕЙ

Начальные представления об ионизирующем излучении. Достижение выше обозначенной цели данного занятия будет более результативным, если в процессе его проведения возникающие идеи решений предлагаемых заданий исполнитель будет умозрительно согласовывать с фундаментальными физическими закономерностями, присущими ионизирующим излучениям. Имея это в виду, приведем предельно сжатое и, следовательно, упрощенное описание базовых основ физики ионизирующих излучений.

Вещество окружающего мира состоит из атомов, размер которых имеет порядок 10^{-8} см, и большая часть их массы сосредоточена в ядре, имеющем размер порядка 10^{-13} см. Главными идентифицирующими признаками атома являются два параметра: число Z (количество протонов в ядре атома, оно же число электронов, вращающихся вокруг ядра) и массовое число – A (округленное до целого числа масса ядра, выраженная а.е.м., оно же – количество протонов и нейтронов в ядре атома). Атом с конкретными значениями Z и A именуется *нуклидом*. Если химическим символом некоторого атома является X , то соответствующий нуклид принято обозначать так: A_ZX . Нуклиды, способные спонтанно излучать ионизирующие частицы, называются *радионуклидами*. Нуклиды с одинаковым значением Z , но разным числом A , называются *изотопами*. Нуклиды с одинаковым значением A называются *изобарами*. Нуклиды, имеющие одинаковое число нейтронов (или число $A - Z$), называются *изотонами*.

Всего в настоящее время известно около 2000 радионуклидов, из которых около 300 находят применение в хозяйственной деятельности – промышленности, сельском хозяйстве, медицине, биологии и т.д. Большинство радионуклидов являются искусственно полученными. Полный изотопно-изобарный (точнее, протонно-нейтронный) спектр известных в настоящее время нуклидов приведен на рис. 2.1, который, по существу, можно назвать «построенной в шеренги» таблицей Д.И. Менделеева. Цвет, в который окрашена клетка каждого нуклида, указывает на степень его стабильности. Например, в чер-

ный цвет окрашены клетки стабильных нуклидов, чем светлее цвет клетки нуклида, тем нестабильнее сам нуклид.

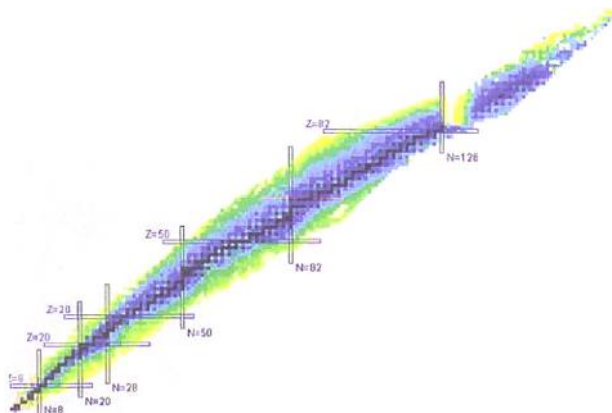


Рис. 1.2.1. Изотопно-изобарный спектр известных в настоящее время нуклидов

Превращения нуклидов сопровождаются испусканием элементарных частиц, которые обладают способностью ионизировать среду, через которую они проходят, а само явление самопроизвольного превращения нуклидов называется *радиоактивностью*. Скорость распадов радиоактивных атомов принято характеризовать *постоянной распада* λ , а также *периодом полураспада* $T_{1/2}$.

Основные типы радиоактивных превращений нуклидов показаны на рис. 1.2.2.

На рис. 1.2.3 в качестве примеров приведены схемы радиоактивных превращений:

а — простого (одноактного);

б — цепочного (многоактного), когда образующиеся нуклиды (дочерние), в свою очередь, подвержены радиоактивным превращениям до такой стадии, пока очередной дочерний нуклид окажется стабильным.

На рис. 1.2.3, *а* ядро материнского радионуклида, распадаясь, испускает электрон и два фотона с указанной в скобках энергией и превращается в ядро стабильного нуклида (никеля).

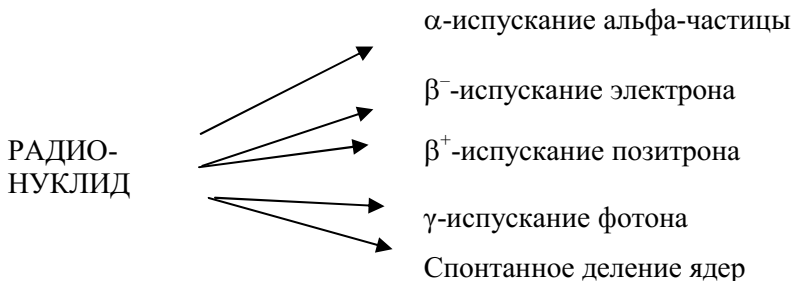
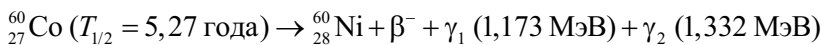
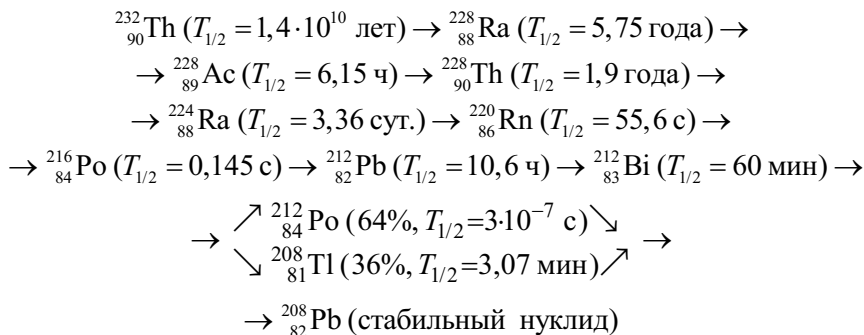


Рис. 1.2.2. Радиоактивные превращения нуклидов

На рис. 1.2.3, *б* в результате 10-ступенчатого распада ядро радионуклида тория превращается в стабильное ядро нуклида свинца. На каждой ступени распада испускается либо электрон, либо α -частица, а также (как и на рис. 1.2.3, *а*) фотоны.



а

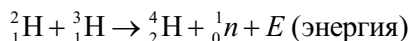


б

Рис. 1.2.3. Схемы радиоактивных превращений

Источниками ионизирующих частиц (ионизирующего излучения) могут быть не только радионуклидные препараты, но и специальные технические устройства, в которых создаются условия для

принудительного превращения ядер атомов. Простейшим примером такого рода может служить ядерная реакция:



Условием протекания этой реакции является высокая температура исходных компонентов реакции (большая скорость ядер при их соударении).

Другим примером источника ионизирующих частиц может служить электронно-лучевая трубка осциллографа.

Большое разнообразие ионизирующих излучений создается в процессах деления ядер тяжелых элементов – основы современной ядерной энергетики (рис. 1.2.4).

Ионизирующая радиация (излучение) – особый вид энергии, которая образуется в результате различных превращений в атомах и сопровождается возникновением рентгеновских лучей, нейтронов, альфа-, бета- и гамма-частиц.

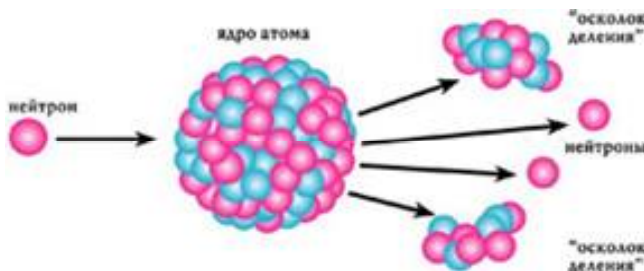


Рис. 1.2.4. Ионизирующее излучение

Ионизирующее излучение не может быть обнаружено органами чувств человека, но его можно обнаружить и измерить техническими средствами – детекторами (дозиметрами на основе фотографических пленок).

Главной количественной характеристикой ионизирующего излучения, которая определяет уровень его воздействия на биологические объекты и возможные последствия этого воздействия, является *доза радиации* – количество поглощенной энергии от этого излучения.

Пространство, в котором присутствуют ионизирующие частицы, называется *полем ионизирующего излучения*. В процессе физиче-

ских исследований и с целью оценки последствий взаимодействия ионизирующих излучений со средой всякое поле ионизирующих излучений может быть описано потоковыми и (или) дозовыми характеристиками (критериями). К первым можно отнести *флюенс* и *плотность потока* ионизирующих частиц (или энергии ионизирующего излучения). Дозовые критерии поля определяются по эффектам воздействия ионизирующего излучения на среду (*поглощенная* и *экспозиционная дозы, керма*) или на органы человека (*эквивалентная доза в органе*), или на человека (*эффективная доза*).

Изложенные здесь начальные представления о физике ионизирующих излучений могут служить лишь «маячками» в процессе умозрительного поиска решений предлагаемых ниже заданий. Конечно, для выполнения этих заданий требуется еще и самостоятельная работа с теоретическим материалом соответствующих тем лекций и учебников.

Примеры и задачи *

1. Активность одного грамма радионуклида $^{226}_{88}\text{Ra}$ принята за внесистемную единицу активности (кюри), она равна $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк.

Определить период полураспада указанного радионуклида, используя одну из двух справочных величин: число Авогадро ($6,02 \cdot 10^{23} \text{ (г} \cdot \text{моль)}^{-1}$) или массу атомной единицы массы ($1,66 \cdot 10^{-24} \text{ г}$).

2. Используя формулу закона радиоактивного распада, показать, что за время, равное периоду полураспада радионуклида, активность его препарата уменьшится в два раза.

3. Используя формулу закона радиоактивного распада, доказать, что $T_{1/2} = \ln 2 / \lambda$.

4. За сутки активность радионуклидного препарата уменьшилась в N раз. Определить период полураспада радионуклида.

5. За десять суток (t) непрерывного эксперимента с радионуклидным препаратом в нем было зарегистрировано $N \cdot 10^{10}$ распадов. Активность A препарата в момент окончания эксперимента соста-

* Здесь и далее по тексту под N следует подразумевать число, равное порядковому номеру фамилии пользователя в алфавитном списке учебной группы.

вила 10^7 Бк. Определить постоянную радиоактивного распада. Решение довести до получения уравнения с единственной переменной – искомой величиной λ .

Ответ. Значение λ определится из уравнения:

$$N \cdot 10^{10} = A e^{\lambda t} (1 - e^{-\lambda t}) / \lambda.$$

6. Радиоактивный препарат состоит из смеси двух радионуклидов с периодами полураспада T_1 и T_2 . Их начальная активность составляет A_1 и A_2 соответственно.

Определить:

а) активность препарата спустя время T после начального измерения активности;

б) при каком условии возможно достижение равенства активности радионуклидов двухкомпонентной смеси.

Ответ: а) $A_1 2^{-t/T_1} + A_2 2^{-t/T_2}$; б) $\ln(A_1 / A_2)(T_2 - T_1)^{-1} > 0$.

7. Начальная активность радиоактивного препарата равна 10^{10} Бк. Через десять суток она снизилась до 10^9 Бк.

Определить количество распадов, которое произойдет в препарате на протяжении третьей декады, отсчитываемой от указанного начального момента.

8. Решить задачу 7 при условии: вместо периода третьей декады взять период, лежащий между моментами $N + 20$ и $N + 30$ сут. За начало отсчета времени принять тот же момент, что и в предыдущей задаче.

9. Какая доля радиоактивного препарата распадется за время, равное N периодам полураспада?

10. Из некоторого раствора с помощью сепаратора извлекается радионуклидный продукт. Производительность сепаратора постоянна и равна V атомов в секунду. Продукт собирается в отдельную емкость, которая в начальный момент пуста. Постоянная распада радионуклида равна λ с $^{-1}$.

Определить предельно возможное значение активности продукта в емкости.

Подсказка. За бесконечно малый интервал времени dt приращение числа атомов радионуклида dN_p в емкости можно выразить как разность между числом отсепарированных за этот интервал атомов Vdt и числом распавшихся в емкости $\lambda N_p dt$ за тот же интервал. За-

писанное на этом основании выражение явится дифференциальным уравнением, которое легко решается. Устремив время к бесконечности, найдем ответ на вопрос задачи.

Заметим, что ответ на поставленный вопрос может быть найден и более оригинально – эвристически, путем логического умозаключения.

11. Рассмотрев цепочку радиоактивного распада, приведенную на рис. 2.3, б, перечислить радионуклиды этой цепочки, ядра которых распадаются с испусканием α -частицы, и те, ядра которых испускают β -частицу.

12. Воспользуемся данными рис. 1.2.3, б и сосредоточим внимание на одном отрезке этой цепочки. Представим, что в некоторый момент из смеси радионуклидов всей цепочки распадов выделен радионуклидный препарат $^{212}_{82}\text{Pb}$ активностью $N \cdot 10^5$ Бк.

Найти:

а) функцию зависимости от времени активности дочернего радионуклида (висмута);

б) время, по истечении которого активность образующегося препарата висмута достигнет максимума.

Примечание. Для решения первого вопроса данной задачи можно воспользоваться идеей методической подсказки к задаче 10. Ответ на второй вопрос можно найти как максимум полученной таким способом функции.

13. Применительно к радиоактивному распаду ядер кобальта (см. рис. 1.2.3, а) рассчитать массу никеля, образовавшегося в одном грамме кобальта за один год.

14а. В бетонных конструкциях производственного объекта содержится 10 г радионуклида радия-224 и это количество не меняется. Из прочтения цепочки распада, приведенной на рис. 1.2.3, б, следует, что период полураспада радия-224 много больше периода полураспада радона-220. Следовательно, количество радона в конструкциях объекта можно принять неизменным во времени. Используя идею задачи 10, определить объемную концентрацию радона в помещениях производственного объекта, считая, что они герметически изолированы от внешней среды и что внутрь помещений поступает 50 % радона, образующегося при распаде радия. Объем помещений объекта принять равным 200 м^3 .

Ответ: $2,5 \cdot 10^{16}$ атомов в кубическом метре.

14б. Приняв объем воздуха, находящегося в дыхательной системе человека, равным одному литру, рассчитать количество радиоактивных распадов радона в организме человека за 10 ч пребывания его в помещении производственного объекта с сохранением ситуации предыдущей задачи.

Ответ: $1,1 \cdot 10^{16}$ распадов.

14в. Соблюдая условие задачи 14б и принимая во внимание неизменность количества радона в дыхательной системе человека (за счет обмена воздуха в процессе дыхания), а также ориентируясь на методику решения задачи 10, определить активность радионуклида полония-216, образуемого в дыхательной системе человека, находящегося в упомянутом выше производственном помещении.

Ответ: $3 \cdot 10^8$ Бк.

14г. Энергия, выделяемая в одном акте радиоактивного распада ядра радона-220, равна 6,4 МэВ, а распада ядра полония-216 – 6,9 МэВ.

Используя ответы на вопросы трех предыдущих задач, определить мощность энергии, выделяемой в дыхательной системе человека.

Справка: $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$.

Ответ: 0,00064 мкВт.

15. Обратимся к схеме радиоактивного распада, приведенной на рис. 2.3, а. Пусть масса препарата кобальта составляет M [мг]. Считая этот источник ионизирующих частиц точечным (поглощение частиц в нем пренебрежимо мало), а окружающее пространство – вакуумом, рассчитать:

а) общую плотность потока ионизирующих частиц всех видов на расстоянии одного метра от источника;

б) плотность потока энергии фотонного излучения на расстоянии одного метра от источника;

в) флюенс фотонов и флюенс энергии фотонного излучения в точке, удаленной от источника на один метр за время 10 сут.

16. В воздухе на высоте проживания большинства людей Земли за счет ионизирующей компоненты вторичных частиц космического излучения в среднем образуется две пары ионов в 1 см^3 в секунду.

Определить поглощенную дозу в воздухе за один год на основе того, что на ионизацию одной молекулы воздушной среды затрачивается энергия 33,85 эВ.

Справка. Плотность приземного воздуха равна $1,29 \text{ кг/м}^3$, $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$.

17. Поглощенная доза в ткани тела человека при облучении потоком тепловых нейтронов составила 100 мкГр .

Определить, какой поглощенной дозе:

а) фотонного излучения она соответствует по биологическому действию;

б) нейтронного излучения при энергии нейтронов $0,1 \text{ МэВ}$ она соответствует по биологическому действию?

Необходимые для решения данной задачи справочные данные можно взять из разд. 2.3 учебного пособия «Основы безопасности жизнедеятельности» [3].

18. Несведущий человек, случайно попав на покинутую людьми территорию, загрязненную радионуклидными продуктами, и соблазнившись увиденным обильным урожаем диких ягод, произвел их сбор и сам употребил 1 кг ягод. Вскоре он был проинформирован об опасности и обратился в соответствующую службу радиационного контроля. Проведенный радиационный анализ ягод показал, что ягода содержит два радиационно значимых радионуклида. Распад ядер одного из них сопровождается испусканием β -частиц и выделением энергии (в среднем на один распад) $0,01 \text{ МэВ}$, а второго – с испусканием α -частиц и выделением энергии 5 МэВ . Удельная активность ягоды по этим компонентам составила 10^5 и $2 \cdot 10^4 \text{ Бк/г}$ соответственно. Считая, что период выведения продуктов питания из организма составляет одни сутки и вся выделяемая энергия продуктов распада радионуклидов передалась тканям органов пищеварения (условно считать – желудку) массой 1 кг , рассчитать эквивалентную дозу, полученную желудком человека в результате употребления ягоды.

Ответ: 28 мЗв .

19. Объемная концентрация радона-222 в воздухе шахты составляет 10^4 Бк/м^3 . Шахтер ежесуточно пребывает в шахте по 8 ч , число рабочих дней в году составляет 240 .

Определить эквивалентную дозу в тканях легких и соответствующую эффективную дозу, получаемые шахтером за один год от внутреннего облучения за счет распада радона, без учета активности дочерних продуктов распада. Энергия распада радона-222 составляет $5,6 \text{ МэВ}$, считать, что вся она поглощается тканями легких

общей массой в 1 кг. Объем воздуха в легких принять равным одному литру.

Результат сравнить с пределом дозы.

Ответ: 1,2 и 0,144 мЗв соответственно.

Контрольные вопросы

1. Что называется ионизирующим излучением и какие его виды возможны при спонтанных или индуцированных превращениях нуклидов?

2. Дать определение и привести пример радионуклидного источника ионизирующих излучений. Пояснить, какие именно ионизирующие частицы испускаются при распаде ядер в приведенном Вами примере.

3. Дать общее определение активности источника ионизирующих излучений и единиц ее измерения.

4. Записать изначальное дифференциальное уравнение закона радиоактивного распада. Пояснить параметры, используемые для выражения активности источника ионизирующих излучений.

5. Пользуясь записью закона радиоактивного распада, найти соотношение между λ и $T_{1/2}$.

6. Получить запись закона радиоактивного распада, в котором вместо классического экспоненциального множителя с основанием степени e используется множитель с основанием степени 2, а вместо λ используется $T_{1/2}$.

7. Изобразить, используя логику, характерные графики зависимости от времени числа атомов трех нуклидов, связанных цепочкой распадов: материнского, дочернего и стабильного внучатого, приняв, что в начальный момент препарат содержит только материнский препарат, и процесс превращений продолжается бесконечно долго.

8. Возможно ли повторение одного и того же радионуклида в длинных цепочках ядерных превращений?

9. Почему в общем случае неверно такое определение: «активность источника ионизирующих излучений равна числу испускаемых им частиц в единицу времени»?

10. Можно ли однозначно предсказать:

а) момент распада конкретного ядра радиоактивного нуклида;

б) точное число распавшихся ядер радионуклида за определенный промежуток времени?

11. Дать определение поля ионизирующих излучений и его количественных показателей:

а) флюенса ионизирующих частиц;

б) флюенса энергии ионизирующих частиц;

в) плотности потока энергии ионизирующих частиц.

12. Чем объясняется неравномерность поглощенной дозы по глубине при нормально падающем потоке ионизирующего излучения на поверхность полубесконечной среды (или биологической ткани)? Какие принципиально различные случаи такой неравномерности возможны?

13. Для каких объектов облучения ионизирующим излучением применимо понятие «эквивалентная доза»? Дать определение этого понятия и единиц измерения этой разновидности дозы, привести пример.

14. Чем объясняется необходимость введения понятия «эффективная эквивалентная доза ионизирующего излучения»? Дать определение этого понятия, привести пример.

15. Как соотносятся численные значения эквивалентной и эффективной эквивалентной доз ионизирующего излучения при равномерном облучении всего тела человека?

16. Пояснить понятие «мощность дозы ионизирующего излучения», привести пример.

17. Как, имея график (или функцию) зависимости числа облученных людей от величины эквивалентной дозы, определить значение коллективной эквивалентной дозы? Привести запись соответствующего расчетного выражения.

18. Что понимается под «относительной биологической эффективностью» ионизирующего излучения, как определяется ее численное значение?

3. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ С ВЕЩЕСТВОМ

3.1. Общие физические представления

Разнообразие ионизирующих излучений создается разнообразиями и энергией формирующих их ионизирующих частиц. Проблема радиационной безопасности человека обусловлена в основном теми видами ионизирующих частиц, которые были упомянуты ранее в теме 2. Излагаемые здесь представления о взаимодействии ограничиваются рассмотрением взаимодействия с веществом именно этих видов ионизирующих частиц. Заметим, что к ионизирующим частицам относятся и другие элементарные частицы, например частицы, присутствующие в космическом излучении, частицы, искусственно получаемые в ходе физических экспериментов, и т.д. Эти «тонкости» проблемы оставим без внимания.

Ионизирующие частицы, проходя через вещество, взаимодействуют с ним на «элементарном» уровне, т.е. через акты автономного взаимодействия отдельно взятой ионизирующей частицы с одной из встретившихся на ее пути элементарной частицей атома вещества. Отдельно рассматриваемый акт такого взаимодействия может приводить к изменению состояния атома в целом, к тому же отдельная ионизирующая частица, проходя через объем атома, может испытать несколько актов взаимодействия с его элементарными частицами. С учетом этого часто принято говорить о взаимодействии ионизирующей частицы с атомом. Механизмы взаимодействия специфичны, они не имеют аналогов, которые люди наблюдают в обыденной жизни. Макроскопические (наблюдаемые) эффекты актов взаимодействия обозначенных нами частиц индуцируются специфическими силами, отличающимися от привычно наблюдаемых в жизни сил по закономерностям их проявления.

Механизм взаимодействия ионизирующей частицы с веществом зависит не только от ее вида и ее энергии, но и от вида атомов (атомарных параметров A и Z) вещества. Наблюдаемые эффекты взаимодействия ионизирующего излучения с веществом формируются большим числом актов «элементарных» взаимодействий, которые могут индуцироваться силами различной природы, отличаться друг от друга последствиями. Любой из возможных вариан-

тов взаимодействия ионизирующего излучения с веществом может быть представлен следующей наглядной моделью. Каждый атом вещества и каждая составляющая его элементарная частица идентифицируются виртуальными сферами с площадью центрального сечения, равной σ . Этот параметр принято называть *микроскопическим сечением взаимодействия* (или просто – *сечением*) и выражать в *барнах* ($1 \text{ б} = 10^{-28} \text{ м}^2$). Для каждого из возможных видов взаимодействия с ионизирующей частицей «сечение» имеет свои размеры. Если пролетающая ионизирующая частица попадает в такую виртуальную мишень, то произойдет акт подразумеваемого «элементарного» взаимодействия между ними. Микроскопическое сечение взаимодействия является мерой возможности конкретного вида взаимодействия конкретных частиц. Его численное значение, понятно, зависит от вида и энергии ионизирующих частиц и от параметров A и Z атомов вещества и не зависит от его агрегатного состояния. Экспериментально полученные значения сечений приводятся в справочниках. Важно заметить, что при заданных обстоятельствах взаимодействия пары частиц результат взаимодействия может быть и неоднозначным. Например, фотон, взаимодействуя с электроном атома, может быть либо поглощен, либо рассеян. Для таких вариантов взаимодействий каждую частицу среды в обсуждаемой модели следует представлять в виде совокупности виртуальных мишеней (микроскопических сечений взаимодействия), каждая из которых соответствует одному из вариантов ее возможного взаимодействия с ионизирующей частицей.

Нетрудно видеть, что если фрагмент вещества, содержащий n частиц-мишеней, равномерно облучен потоком ионизирующих частиц, флюенс которого равен Φ , и в этом фрагменте произошло ΔN актов взаимодействия, то справедливо соотношение:

$$\sigma = \Delta N / \Phi n. \quad (1.3.1)$$

Такая умозрительная модель взаимодействия частиц хорошо согласуется с результатами экспериментов и позволяет описывать процессы взаимодействия математическими соотношениями. Вероятность взаимодействия можно выразить отношением: $-d\Phi / \Phi$ (Φ – флюенс ионизирующих частиц, вошедших в слой вещества; $d\Phi$ – убыль флюенса за счет взаимодействия). Следовательно, справедливо соотношение:

$$-d\Phi / \Phi = \sigma n S dx. \quad (1.3.2)$$

Если взаимодействие ионизирующих частиц с веществом происходит в геометрии узкого пучка, то флюенс Φ и плотность потока ϕ ионизирующих частиц ослабляются слоем вещества шириной d согласно зависимости (применительно к Φ):

$$\Phi_x = \Phi_0 \exp(-\sigma n x) = \Phi_0 \exp(-\Sigma x), \quad (1.3.3)$$

где Φ_0 и Φ_x – флюенс ионизирующих частиц на входе в слой вещества и на глубине x соответственно; n – объемная концентрация элементарных частиц вещества, взаимодействие с которыми приводит к выводу ионизирующих частиц из потока.

Параметр $\Sigma = \sigma n$ носит название *макроскопического сечения взаимодействия*. Для фотонного излучения эта величина часто называется *линейным коэффициентом ослабления излучения*. Величина

$$\Sigma = -\frac{d\phi}{\phi(x)dx} = -\frac{1}{dx} \frac{dN}{N}$$

есть отношение доли частиц испытавших взаимодействие на элементарном отрезке dx к длине этого отрезка и имеет размерность обратной длины. Для фотонного излучения эта же величина носит название *линейного коэффициента ослабления* и обозначается буквой μ . Величина обратная μ называется *средней длиной свободного пробега* и равна толщине поглотителя, ослабляющей плотность потока частиц в e раз. Иногда оказывается удобным использование параметра $\Sigma_m = \Sigma / \rho$ – *массового коэффициента ослабления*, где ρ – плотность вещества.

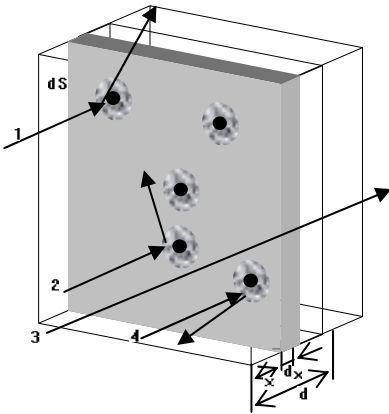


Рис. 1.3.1. Взаимодействие фотонов с веществом

Аналогичное соотношение можно записать и для плотности потока ионизирующих частиц.

Приведенное соотношение (1.3.3) легко доказывается с помощью описанной модели. В самом деле: умозрительно возьмем слой вещества бесконечно малой толщины dx с площадью граней, равной S (рис. 1.3.1). Тогда модели элементарных частиц (виртуальные шарики) спроецируются на грань слоя вещества в виде кругов (средняя площадь каждого из них равна σ) и без наложения друг на друга. Их количество равно $nSdx$, а суммарная площадь – $\sigma nSdx$. Вероятность того, что произвольно взятая ионизирующая частица попадет в один из таких кругов, а следовательно, и вступит во взаимодействие с соответствующей ей элементарной частицей вещества, можно выразить как $\sigma nSdx/S = \sigma ndx$. Вероятность взаимодействия можно выразить отношением: $-d\Phi / \Phi$ (Φ – флюенс ионизирующих частиц, вошедших в слой вещества; $d\Phi$ – убыль флюенса за счет взаимодействия). Следовательно, справедливо соотношение:

$$-d\Phi / \Phi = \sigma nSdx . \quad (1.3.4)$$

Описание механизмов взаимодействия ионизирующих частиц с веществом с помощью «сечений» плодотворно в тех случаях, когда ионизирующая частица, войдя в вещество, в одном или всего в нескольких актах растрчивает свою энергию и утрачивает способность дальнейшего взаимодействия.

В подобных случаях, если взаимодействие ионизирующих частиц с веществом сопровождается их рассеянием (в геометрии широкого пучка), зависимость (1.3.3) приобретает вид

$$\Phi_x = \Phi_0 \exp(-\sigma nx) B_x , \quad (1.3.5)$$

где B_x – множитель, называемый фактором накопления, который учитывает эффект возвращения ионизирующих частиц в их поток после многократных актов рассеяния. Его значение (приводимое в справочниках) зависит от вещества, геометрии эксперимента и параметров ионизирующего излучения.

Если взаимодействие ионизирующих частиц с веществом происходит по нескольким схемам (например, рассеяние и поглощение) и каждая схема взаимодействия характеризуется соответствующим значением микроскопического сечения $\sigma_1, \sigma_2, \dots$, то в вышеприведенных соотношениях следует подразумевать:

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 + \dots = \sum_i \sigma_i . \quad (1.3.6)$$

Любое вещество можно представить как смесь некоторого количества видов элементарных частиц, входящих в состав атомов, с соответствующими концентрациями – $n_1, n_2, \dots, n_j, \dots, n_k$. Если частицы каждого вида отличаются друг от друга значениями σ , то в приведенных соотношениях следует подразумевать:

$$n\sigma = \sum_j (n_j \sigma_j). \quad (1.3.7)$$

Если к тому же каждый вид частиц взаимодействует с ионизирующими частицами по нескольким схемам, то

$$n\sigma = \sum_j n_j \left(\sum_i \sigma_i \right)_j. \quad (1.3.8)$$

Помимо сечений в качестве количественных критериев способности взаимодействия ионизирующих излучений с веществом используются и др. Пояснения в отношении их будут более логичными в контексте нижеследующего рассмотрения наиболее значимых видов взаимодействия.

3.2. Особенности взаимодействия некоторых видов ионизирующих частиц с веществом

А. Электрически заряженные частицы. При практически интересных значениях энергии заряженных частиц, они, попав в объем атома, в результате кулоновского взаимодействия с его электрически заряженными частицами, расходуют основную часть энергии на *ионизацию* (вырывание электрона из оболочки атома) и *возбуждение* (перемещение электронов на другие энергетические уровни атома). Соответствующие этому энергетические потери называются *ионизационными*. Кулоновское взаимодействие заряженных частиц с ядром атома приводит к *упругому рассеянию* ионизирующих частиц. В актах электромагнитного взаимодействия заряженных частиц с ядрами атомов вещества порождается фотон рентгеновского диапазона частот, ему и передается теряемая ионизирующей частицей энергия. Эти потери энергии называются *радиационными*.

В каждом отдельно взятом акте взаимодействия заряженная частица теряет часть своей энергии. Многократные акты ионизационного и радиационного взаимодействия отдельно рассматриваемой

частицы оказываются плотно «упакованными» в траектории движения заряженной частицы в веществе, поэтому процесс взаимодействия можно представлять как процесс непрерывной передачи энергии ионизирующей частицей веществу. Такой процесс удобно характеризовать (описывать) средней энергией, теряемой ионизирующей частицей на единицу длины пути $-dE/dx$, называемой *тормозной способностью* вещества. Тормозная способность зависит от вида вещества (параметров A и Z), а также от вида (массы), заряда и энергии ионизирующей частицы. Заряженная частица с начальной энергией E_0 , проходя через вещество, будет передавать ему энергию в многократных актах элементарных взаимодействий до момента снижения этой энергии до некоторого порогового значения $E_{\text{пор}}$. С учетом непрерывного уменьшения энергии частицы тормозная способность вещества по пути движения изменяется.

Другой, более наглядной, характеристикой процесса взаимодействия ионизирующей частицы с веществом является длина ее пробега или просто – *пробег*. Если зависимость тормозной способности вещества от энергии частицы задана в виде функции $S(E)$, то пробег ионизирующей частицы в веществе можно вычислить по соотношению:

$$R = \int_{E_0}^{E_{\text{пор}}} (1 / S(E)) dE. \quad (1.3.9)$$

Проникающая способность заряженной частицы (т.е. способность проникать через слой вещества) зависит не только от пробега, но и от траектории ее движения. Тяжелые частицы массой M в каждом акте взаимодействия с электроном могут потерять энергию не более $E \frac{m}{M}$ (m – масса электрона) и лишь незначительно изменить направление движения. За счет этого пробег моноэнергетических тяжелых заряженных частиц определенного вида (например, протонов) в конкретном веществе – величина практически детерминированная, по крайней мере, его дисперсия незначительна. Пробег и проникающая способность для них практически не отличаются, а траектории их движения в веществе – практически прямыми.

Легкие заряженные частицы (электроны, позитроны) могут потерять до половины их энергии в одном акте и отклоняться на большие углы. Для каждой из них пробег и проникающая способность – величины стохастические, а среднее значение проникающей способности существенно меньше пробега. Траектории их движения в веществе не прямолинейны, также стохастичны. Направления их движения после нескольких актов взаимодействия с атомами вещества можно считать изотропными, т.е. равновероятными по всем направлениям.

Радиационное взаимодействие заряженных частиц с ядрами атомов возникает за счет торможения частицы полем ядра. Из перечня упоминаемых ранее ионизирующих частиц оно существенно лишь для электронов, да и для них оно играет заметную роль при энергии электронов выше 1 МэВ. Суждение о значимости радиационного взаимодействия электронов с ядрами (зарядом Z) может быть построено на анализе соотношения между ионизационными и радиационными потерями, полученного Бете и Гайтлером:

$$\left(\frac{dE}{dx} \right)_{\text{рад}} / \left(\frac{dE}{dx} \right)_{\text{ион}} \approx E_0 Z / 800, \quad (1.3.10)$$

E_0 – энергия электрона, МэВ.

Тормозная способность тяжелых заряженных частиц веществом за счет упругого кулоновского взаимодействия возрастает с увеличением массы частицы. Для протонов и α -частиц она составляет доли процента от общей тормозной способности.

Общая тормозная способность вещества за счет всех видов взаимодействия определяется как сумма тормозных потерь каждого вида.

В заключение отметим, что проникающая способность заряженных ионизирующих частиц с позиций радиационной опасности для человека невелика, практически она возникает при непосредственном контакте с источниками излучений или при попадании радиоактивных препаратов внутрь организма. Так, в воздухе длина пробега протона с энергией в несколько мегаэлектрон-вольт составляет всего несколько сантиметров, а длина пробега электронов – до нескольких метров.

Б. Фотоны. Фотоны (γ -кванты) с энергией до 10 МэВ испытывают более десяти видов взаимодействия с атомами вещества; из

них с позиций проблемы радиационной безопасности значимыми являются следующие три вида взаимодействия:

- 1) фотоэффект (фотоэлектрическое поглощение фотона электронной оболочкой атома вещества);
- 2) рассеяние на электроны атома (комптоновское рассеяние);
- 3) образование электронно-позитронной пары (с поглощением фотона).

Полное микроскопическое сечение σ взаимодействия фотонов с атомами среды складывается из суммы сечений вышеуказанных процессов:

$$\sigma = \sigma_{\phi} + \sigma_p + \sigma_{\pi}. \quad (1.3.11)$$

Гамма-излучение по сравнению с ионизирующими частицами, имеющими электрический заряд, обладает несравненно большей проникающей способностью в веществе, т.е. сечения взаимодействия фотонов с атомами вещества значительно меньше, чем для электрически заряженных частиц.

Фотоэффект. В акте фотоэффекта фотон поглощается атомом путем передачи всей энергии одному из орбитальных электронов, который покидает атом. Кинетическая энергия электрона E_e равна разности между первичной энергией фотона E_0 и энергией, затраченной на вырывание электрона из оболочки атома, – энергии связи $E_{св}$:

$$E_e = E_0 - E_{св}. \quad (1.3.12)$$

С увеличением энергии связи электрона в атоме повышается вероятность фотоэффекта, а следовательно, и соответствующее этому парциальное микроскопическое сечение взаимодействия. Электроны ближайшей к ядру K -оболочки обладают максимальной энергией связи, и около 80 % сечения фотоэффекта приходится на электроны этой оболочки. Если энергия фотона недостаточна для вырывания электрона с K -оболочки, то фотоэффект происходит на электронах, более удаленных от ядра оболочек.

Фотоэффект сопровождается характеристическим фотонным излучением, порождаемым переходом электронов с внешних оболочек на вакантные места более близких к ядру оболочек. Такое «переселение» электронов необязательно приводит к характеристическому излучению; выделяемая при переходе электрона энергия может быть передана и одному из электронов внешней оболоч-

ки. Выбиваемые таким образом электроны носят название *оже-электронов*.

Зависимость сечения фотоэффекта от атомов вещества приближенно выглядит так:

$$\sigma_{\phi} \sim Z^5 / (E_0)^c, \quad (1.3.13)$$

где c – число, уменьшающееся от 3,5 до 1 с увеличением E_0 .

Комптоновское рассеяние. При энергии фотона значительно больше энергии связи электрона в атоме процесс взаимодействия между ними может протекать по схеме упругого столкновения. В результате такого столкновения фотон теряет часть своей энергии и изменяет направление движения (испытывает комптоновское рассеяние), а электрон приобретает кинетическую энергию.

Приведем формулу для расчета энергии E_s фотона после рассеяния:

$$E_s = E_0 / [1 + E_0 (1 - \cos\theta) / mc^2]. \quad (1.3.14)$$

Здесь mc^2 – энергия массы покоя электрона.

Угол θ между первоначальным направлением движения фотона и направлением вылета электрона определяется соотношением:

$$\operatorname{ctg}\theta = \operatorname{tg}(\theta/2) / [1 + E_0 / (mc^2)]. \quad (1.3.15)$$

Образование пар. Фотон в электрическом поле электрона или ядра может быть преобразован в пару электрон-позитрон. Такое преобразование фотона в вакууме невозможно, так как при этом не выполнялся бы закон сохранения количества движения. Процесс образования пар – эндотермический (точнее, эндоэнергетический) и может происходить в том случае, если энергия фотона превосходит сумму энергий масс покоя электрона и позитрона:

$$E_0 \geq 2mc^2 = 1,022 \text{ МэВ}. \quad (1.3.16)$$

Акты образования электронно-позитронных пар в основном происходят в поле ядра. Энергия фотона в актах образования пар распределяется почти поровну, однако за счет кулоновской силы по мере удаления от ядра электрон будет тормозиться, а позитрон – ускоряться.

Сравнивая между собой три рассмотренных процесса, следует отметить такую закономерность. При малых значениях энергии фотонов преобладающим является фотоэффект, с увеличением энергии более эффективным становится комптоновское рассеяние,

а затем – образование пар. Для каждого вещества существуют свои энергетические пределы преобладания каждого из механизмов взаимодействия.

Видим, что в каждом акте взаимодействия с веществом фотон передает ему либо всю свою энергию, либо значительную ее долю. До момента каждого акта взаимодействия фотон может проходить в веществе значительные расстояния. Поглощение энергии фотонов характеризуется сечением σ_{en} .

Иногда для характеристики ослабления потока фотонов используют толщину слоя половинного ослабления $\Delta_{1/2}$:

$$\Delta_{1/2} = \ln 2 / \Sigma ; \quad \Sigma = \sigma n. \quad (1.3.17)$$

Заметим еще, что среднестатистическое значение пробега R фотона в вещества составит:

$$R = 1 / \Sigma . \quad (1.3.18)$$

В. Нейтроны. Нейтроны, не имея электрического заряда, не испытывают действия электрических полей заряженных частиц атомов вещества при прохождении через него. Они взаимодействуют лишь с полями ядер атомов вещества. Как и для уже рассмотренных ионизирующих частиц, акты взаимодействия могут приводить к неоднозначным последствиям. Приведем обзор характерных типов взаимодействия ионизирующих частиц с ядрами атомов вещества.

Упругое рассеяние. По законам классической механики несложно установить зависимость между долей энергии, оставшейся у нейтрона после акта упругого рассеяния с ядром атома с массовым числом A , и углом рассеяния нейтрона в системе центра масс – φ :

$$E_s/E_0 = (A^2 + 2A\cos\varphi + 1)/(A + 1)^2. \quad (1.3.19)$$

Упругое рассеяние нейтронов ядрами атомов вещества приводит к постепенному сбросу энергии нейтронами до значения менее электрон-вольта и тогда включаются иные механизмы взаимодействия.

Нейтроны с энергией приблизительно до 1 МэВ испытывают преимущественно упругое рассеяние ядрами атомов веществ.

Неупругое рассеяние. Механизм неупругого рассеяния в упрощенной трактовке состоит в следующем. При подлете нейтрона к ядру силой их взаимодействия часть энергии нейтрона передается ядру, оно возбуждается. Поскольку разрешенные энергетические

уровни любого ядра дискретны, количество передаваемой энергии должно быть, соответственно, дискретным. Неупругое рассеяние нейтронов является пороговым видом взаимодействия; нейтрон должен обладать энергией, превышающей энергию первого (низшего) порога возбуждения ядра-мишени – E^* . В результате акта неупругого рассеяния остаток энергии нейтрона составит $E_0 - E^*$, а ядро-мишень становится возбужденным. Это возбуждение в последующем снимается путем испускания фотона. При возбуждении ядра-мишени до уровня более высокого, чем первый, может быть испущено несколько фотонов за счет ступенчатого снятия возбуждения ядра-мишени.

Неупругое рассеяние нейтронов характерно лишь для средних и тяжелых ядер-мишеней. Упругое рассеяние нейтронов на таких ядрах менее эффективно, чем на легких, поэтому и замедление нейтронов с энергией менее порога E^* тяжелыми ядрами также малоэффективно.

Поглощение нейтронов. Этот вид взаимодействия также относится к классу неупругих и для большинства атомов происходит в области малых значений энергии нейтронов. В акте поглощения происходит захват нейтрона ядром атома. Это увеличенное за счет захвата нейтрона ядро находится в возбужденном состоянии. Его переход в нормальное (невозбужденное) состояние в большинстве случаев осуществляется путем испускания одного или нескольких фотонов. Уровни возможных возбужденных состояний захватившего нейтрон ядра имеют значения 6 – 8 МэВ, соответствующее количество энергии «выплескивается» возбужденным ядром в форме фотонного излучения.

Специфическим видом поглощения нейтронов являются акты их взаимодействия с ядрами некоторых легких атомов. При захвате таким ядром нейтрона с энергией более 1 МэВ в составном ядре происходит «обособление» протона или альфа-частицы и им передается энергия, достаточная для преодоления потенциального барьера сил ядерного притяжения. В результате реализуются реакции, обозначаемые как (n, p) или (n, α) .

Нейтроны, замедлившись до тепловой энергии, взаимодействуют с атомами среды путем реакции радиационного захвата ядрами атомов или реакций (n, p) , (n, α) . Например, реакция захвата

нейтрона ядром водорода с образованием ядра дейтерия и испусканием фотона с энергией 2,26 МэВ.

Информация о сечениях взаимодействия нейтронов с ядрами различных атомов приведена в соответствующей справочной литературе.

Как и для фотонов, акты взаимодействия нейтронов с веществом приводят либо к выводу нейтрона из потока, либо к потере нейтроном значительной энергии. Для описания этого взаимодействия применимы те же критерии, что и приведенные нами для фотонного излучения.

Примеры и задачи

1. В процессе эксперимента регистрировалась относительное число альфа-частиц, проникающих через алюминиевую фольгу. Падающий поток альфа-частиц был мононаправленным и моноэнергетическим. Обнаружено, что с увеличением толщины фольги до некоторого предела регистрируемое число альфа-частиц остается практически неизменным и при дальнейшем увеличении толщины фольги резко уменьшается до нуля.

Дать объяснение данному феномену.

2. Применительно к условию предыдущей задачи пояснить, как будет трансформироваться энергетический спектр альфа-частиц с увеличением толщины фольги.

3. Применительно к условию задачи 1 пояснить, какой будет зависимость относительного числа проникающих через фольгу альфа-частиц от толщины фольги при условии:

а) энергетический спектр падающих на фольгу альфа-частиц – непрерывный в пределах некоторого диапазона значений;

б) энергетический спектр падающих на фольгу альфа-частиц представляет несколько дискретных значений.

4. Как будет изменяться относительное число электронов, проникающих через алюминиевую фольгу, с увеличением ее толщины, если падающий поток электронов является мононаправленным и моноэнергетическим?

5. Как будет трансформироваться энергетический спектр электронов, прошедших через фольгу, с изменением толщины фольги при сохранении условий предыдущей задачи?

6. Какая доля теряемой электронами энергии моноэнергетических электронов будет израсходована на радиационные потери при прохождении их через цинковую среду, если при вхождении электронов в цинковую среду они имеют энергию равную 10 МэВ?

Ответ: 3/11.

7. Произвести оценку возможного количества актов ионизации атомов среды протоном с начальной энергией в 1 МэВ, приняв условие, что в каждом акте ионизации протон теряет максимально возможную энергию. Пороговое значение энергии ионизации среды принять равным 30 эВ.

Справка. Масса электрона и масса протона, выраженные в энергетических единицах, составляют 0,511 и 938 МэВ соответственно.

Рекомендация. Для решения вопроса можно воспользоваться идеей: в каждом акте ионизации протон будет терять энергию по закону геометрической прогрессии до тех пор, пока она не достигнет значения 30 эВ. Показателем прогрессии для данного случая является величина $(1 - m/M)$, см. пояснение после соотношения (3.9).

Ответ: Приблизительно 4000.

8. Оценить энергию электронов, при которой имеет место равенство ионизационных и радиационных потерь в алюминии и свинце.

Ответ: 62 и 9,8 МэВ соответственно.

9. В предположении, что энергия фотонов достаточна для фотоэффекта со всеми электронами атомов железа и меди, оценить, во сколько раз отличаются для них значения микроскопических сечений фотоэффекта.

Ответ: приблизительно в 1,72 раза.

10. На какой угол отклонится фотон с начальной энергией $E_0 = 2,75$ МэВ в результате комптоновского рассеяния, если его энергия после рассеяния составит 24 % начальной?

Ответ: 66°.

11. В результате комптоновского рассеяния фотона с начальной энергией 1 МэВ эта энергия распределилась поровну между рассеянным фотоном и электроном.

На какой угол отклонился фотон?

Под каким углом к вектору начального движения фотона был выбит электрон?

Ответ: 61° и 27° соответственно (округлено до градуса).

12. Пользуясь вышеприведенными формулами, показать, что при комптоновском рассеянии фотона в обратном направлении его энергия не может превысить 0,255 МэВ, а угол между начальным направлением движения фотона и направлением движения комтоновского электрона лежит в пределах от 0 до 90° .

13. Определить кинетическую энергию электрона (позитрона), образовавшегося в элементарном акте образования пар, если энергия фотона равна 6 МэВ.

Ответ: 2,49 МэВ.

14. Микроскопическое сечение взаимодействия фотонов с атомами свинца при энергии фотонов 1 МэВ равно 23,4 б. Определить линейный и массовый коэффициенты ослабления фотонов свинцовой средой и толщину слоя половинного ослабления. Плотность свинца равна 11,34 г/см³.

Ответ: $0,772 \text{ см}^{-1}$; $0,068 \text{ см}^2/\text{г}$ и 0,9 см.

15. В бесконечной воздушной среде находится источник ^{137}Cs , изотропно испускающий 10^9 фотонов в секунду с энергией 0,662 МэВ. Найти плотность энергии не рассеянных фотонов на расстоянии 100 м от источника, если линейный коэффициент ослабления потока фотонов в воздухе (с учетом всех возможных видов взаимодействия!) составляет $9,95 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}$.

Ответ: $0,195 \text{ МэВ}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$.

16. Железная пластина толщиной 4 см ослабляет плотность потока не рассеянных фотонов в 10 раз (с учетом всех возможных видов взаимодействия!). Рассчитать линейный и массовый коэффициенты ослабления и среднестатистическое значение пробега фотонов в железе.

Ответ: $0,58 \text{ см}^{-1}$; $0,074 \text{ см}^2$; 1,73 см.

17. Два нейтрона с энергией 0,5 и 2 МэВ испытали однократное упругое рассеяние на ядрах водорода. Определить углы рассеяния для каждого из рассеянных нейтронов в системе центра масс, если во всех случаях взаимодействия энергия рассеянного нейтрона оказалась одинаковой и равной 0,3 МэВ.

Ответ: 78° и 134° соответственно.

18. Пояснить, в какую сторону изменятся значения углов, найденных в процессе решения предыдущей задачи, если их определять в лабораторной системе отсчета?

19. Используя соотношение (1.3.19), показать, что эффективность замедления нейтронов атомами среды повышается с уменьшением атомной массы атомов замедлителя и что нейтрон при упругом столкновении с ядром атома теряет максимальную долю своей энергии в случаях рассеяния в обратном направлении.

20. В эксперименте регистрируется ослабление ионизирующего излучения двухслойной пластиной из разных материалов. Пользуясь соотношениями (1.3.5) – (1.3.8), показать, будет ли изменяться ослабляющая способность пластины:

при перемене местами слоев пластины;

при уплотнении вещества слоев пластины в направлении падающего на них пучка частиц при неизменной массе пластин;

при перемешивании веществ слоев пластины до однородного гомогенного состояния?

Контрольные вопросы

1. Какие разновидности сил могут проявляться при взаимодействии элементарных частиц?

2. Пояснить различие понятий «микроскопическое сечение взаимодействия» и «макроскопическое сечение взаимодействия» ионизирующих частиц с веществом.

3. Что называется фактором накопления и какие обстоятельства взаимодействия ионизирующего излучения с веществом учитываются им при расчетах проникающей способности излучения?

4. В чем суть различия между упругим и неупругим взаимодействием ионизирующих частиц с атомами вещества?

5. Поясните понятие «тормозная способность вещества» применительно к ионизирующему излучению.

6. Какая математическая зависимость существует между тормозной способностью вещества и пробегом в нем ионизирующей частицы?

7. Почему траектории движения в веществе протонов и α -частиц прямолинейны, а электронов – нет?

8. Какие потери энергии заряженных частиц в веществе называются ионизационными, а какие радиационными?

9. Описать механизмы трех основных видов взаимодействия фотонного излучения с атомами среды.

10. Под какими углами по отношению к направлению начального движения фотона могут разлетаться фотон и электрон в результате акта комптоновского рассеяния?

11. На что расходуется в актах фотоэффекта разность между начальной энергией фотона и кинетической энергией фотоэлектрона? Почему значения этой разности дискретны?

12. На сколько величина кинетической энергии электрона и позитрона, образующихся в актах образования пар, меньше энергии порождающего их фотона?

13. В каких интервалах значений энергии фотонов преобладают известные виды их взаимодействия с атомами среды?

14. Во сколько раз будет ослаблен поток фотонного излучения слоем вещества толщиной в три слоя половинного ослабления в геометрии узкого пучка?

15. Каким является распределение направлений упругорассеянных ядрами атомов нейтронов в системе центра масс?

16. По какой причине неупругое рассеяние нейтронов на ядрах атомов среды является энергетически пороговым?

17. В каких пределах может быть суммарная энергия фотонного излучения ядра, поглотившего нейтрон?

4. НОРМИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ. ЗАЩИТА ОТ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Основополагающие требования государственного обеспечения радиационной безопасности в Российской Федерации содержатся в «Нормах радиационной безопасности (НРБ-99/2009)», а способы их обеспечения – в «Основных санитарных правилах обеспечения радиационной безопасности».

В дозиметрии ионизирующего излучения основной величиной является *поглощенная доза* D , равная отношению переданной энергии в данном объеме к массе вещества, заключенного в этом объеме:

$$D = \Delta w / \Delta m . \quad (1.4.1)$$

Если известен энергетический спектр флюенса фотонов $\Phi(E)$, поглощенная доза может быть рассчитана по формуле

$$D = \int_E \Phi(E) E \mu_{en}(E) dE , \quad (1.4.2)$$

где E – энергия фотонов; μ_{en} – массовый коэффициент поглощения энергии.

Предполагается, что линейные размеры данного объема вещества превосходят пробеги самых быстрых электронов, рожденных фотонами, но меньше величины $1/\mu_t$, что позволяет не учитывать ослабление флюенса.

Другой величиной, которая используется только для характеристики гамма- и рентгеновского излучений, является экспозиционная доза. *Экспозиционная доза* – отношение полного заряда dQ всех ионов одного знака, созданных в воздухе, когда заряженные частицы, образованные фотонами в элементарном объеме, полностью остановились в воздухе, к массе Δm этого объема:

$$X = \Delta Q / \Delta m . \quad (1.4.3)$$

Зная заряд электрона $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, работу образования пары ионов в воздухе 33,85 эВ (точно), можно определить энергетический эквивалент экспозиционной дозы.

Долгое время применялась, иногда и сейчас применяется, внесистемная единица экспозиционной дозы – *рентген* (Р). При созда-

нии этой единицы пользовались не СИ, а системой сантиметр–грамм–секунда, в которой заряд электрона равен $4,8 \cdot 10^{-10}$ единицы заряда. Полный заряд ионов относился не к кг, а к см^3 при нормальных условиях.

Можно рассчитать энергетический эквивалент рентгена:

$$1 \text{ Р} = \frac{1}{4,8 \cdot 10^{-10}} = 2,08 \cdot 10^9 \text{ пар ионов в } \text{см}^3 \text{ воздуха или, переходя к энергии,}$$

$$\begin{aligned} 2,08 \cdot 10^9 \cdot 33,85 \text{ эВ} &= 1,04 \cdot 10^{10} \text{ эВ/см}^3 = 1,13 \cdot 10^{-8} \text{ Дж/см}^3 = \\ &= 8,73 \cdot 10^{-3} \text{ Дж/кг.} \end{aligned}$$

С развитием атомной науки и техники, радиобиологии, радиационной медицины было установлено, что альфа-излучение, протоны, нейтроны создают одинаковые биологические эффекты при дозах, отличных от доз гамма-излучения.

Поэтому был введен *эквивалент дозы (H)*:

$$H = D \cdot k. \quad (1.4.4)$$

Здесь k – коэффициент качества излучения, определенный экспертами и являющийся функцией линейной передачи энергии заряженных частиц (L), пошедшей на ионизацию:

$$L = \Delta E / \Delta l, \quad (1.4.5)$$

где ΔE – энергия, потерянная заряженной частицей при прохождении расстояния Δl в данной среде, при этом Δl много меньше пробега частицы R . Международная комиссия по радиологической защите (МКРЗ) не считает нужным устанавливать различные коэффициенты качества для фотонов, электронов и позитронов. Заметим, что в мышечной ткани значения L изменяются от $23 \text{ МэВ} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{см}^2$ при 10 кэВ до $1,8 \text{ МэВ} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{см}^2$ при 1 МэВ , а при больших энергиях наблюдается плавный медленный подъем и к 10 МэВ величина L возрастает до $8,16 \text{ МэВ} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{см}^2$. Для α -частиц значение L имеет максимум при энергии $1,3 \text{ МэВ}$, где величина L достигает $2,34 \cdot 10^3 \text{ МэВ} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{см}^2$.

Если L выражать в $\text{МэВ} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{см}^2$, то зависимость k от L видна из табл. 1.4.1.

Таблица 1.4.1

L	1,84 – 35	70	230	530	> 1750
k	1	2	5	10	20

Эквивалентная доза в органе $H_{T,R}$ определяется как $H_{T,R} = w_R D_T$, где w_R – взвешивающий коэффициент для отдельных видов излучения; как и коэффициент качества, он лежит в пределах 1÷20. Значения коэффициента табулированы в табл. 1.4.2.

Таблица 1.4.2

Вид излучения	w_R
Фотоны любых энергий	1
Электроны любых энергий	1
Нейтроны с энергией	
Менее 10 кэВ	5
От 10 кэВ до 100 кэВ	10
От 100 кэВ до 2 МэВ	20
От 2 до 20 МэВ	10
Более 20 МэВ	5
Протоны, кроме протонов отдачи, с энергией более 2 МэВ	5
Альфа-частицы, осколки деления, тяжелые ядра	20

Эффективная эквивалентная доза $E = \sum w_{Ti} H_{T,R}$, где w_{Ti} –

взвешивающий коэффициент для тканей и органов, учитывающий их радиочувствительность. Для 12 органов и тканей эти коэффициенты рекомендованы НРБ для расчета радиационной защиты, их значения, согласно НРБ-99 приведены в табл. 1.4.3.

Эффективная доза объединяет результаты воздействия от внешних и внутренних источников. Однако эффективная доза не является метрологической величиной и используется исключительно в расчетах.

Для наиболее полной оценки вреда, вызванного облучением в малых дозах (менее 100 мЗв), используется концепция риска возникновения онкологических заболеваний и наследственных изменений. Международные рекомендации и НРБ исходят из модели беспорогового линейного увеличения с дозой H риска r стохастических эффектов ($r = \rho H$), проявляющихся в возрастании частоты

онкологических заболеваний и передаваемых потомству мутаций. В настоящее время приняты следующие коэффициенты радиационного риска (ρ) – $0,057 \text{ Зв}^{-1}$ для всего населения: $0,042 \text{ Зв}^{-1}$ – для взрослых, или усредненных $0,05 \text{ Зв}^{-1}$.

Таблица 1.4.3

Орган или ткань	Заболевание	w_{Ti}
Гонады	Наследственные дефекты	0,20
Костный мозг (красный)	Лейкемия	0,12
Толстый кишечник	Рак	0,12
Легкие	Рак	0,12
Желудок	Рак	0,12
Мочевой пузырь	Рак	0,05
Грудная железа	Рак	0,05
Печень	Рак	0,05
Пищевод	Рак	0,05
Щитовидная железа	Рак	0,05
Кожа	Рак	0,01
Клетки костных поверхностей	Злокачественные новообразования	0,01
Остальные*	То же	0,05

* При пользовании взвешивающими коэффициентами следует учитывать, что «Остальные» включает: надпочечники, головной мозг, экстрагортальный отдел органов дыхания, тонкий кишечник, почки, мышечную ткань, поджелудочную железу, селезенку, вилочковую железу и матку. В тех случаях, когда один из перечисленных органов или тканей получает эквивалентную дозу, превышающую самую большую дозу, полученную любым из двенадцати органов или тканей, для которых определены взвешивающие коэффициенты w_{Ti} , согласно НРБ, следует приписать этому органу или ткани взвешивающий коэффициент – 0,025, а оставшимся органам или тканям из рубрики «Остальные» приписать суммарный коэффициент – 0,025.

Для измерения дозовых эквивалентов внешнего облучения были введены операционные величины: *индивидуальный* эквивалент дозы H_p и *амбиентный* эквивалент дозы H^* , применяемый для мониторинга радиационных полей и групповой дозиметрии.

Предел индивидуального риска в производственных условиях при нормальной эксплуатации принимается округленно $1,0 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1}$. Для

населения приемлемый индивидуальный риск установлен равным $5 \cdot 10^{-5}$ год⁻¹. Уровень пренебрежимого риска принят равным 10^{-6} в год.

Допустимые пределы эффективных доз для выделенных категорий облучаемых лиц приведены в табл. 1.4.4. В той же таблице отдельно выделены величины допустимых эквивалентных доз: для кожи, кистей, стоп и глаз. В России принята продолжительность рабочего времени 1700 ч (за рубежом – 2000 ч). Если человек профессионально связан с работой в условиях действия радиации в течение всего рабочего дня и всех рабочих дней в году, то допустимая мощность дозы равна $11,76 \approx 12$ мкЗв/ч, или 3,3 нЗв/с.

Таблица 1.4.4

Нормируемые величины*	Пределы дозы	
	Персонал (группа А)**	Население
Эффективная доза	20 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 50 мЗв в год	1 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 5 мЗв в год
Эквивалентная доза за год:		
в хрусталике глаза***	150 мЗв	15 мЗв
коже****	500 мЗв	50 мЗв
кистях и стопах	500 мЗв	50 мЗв

* Допускается одновременное облучение до указанных пределов по всем нормируемым величинам.

** Основные пределы доз, как и все остальные допустимые уровни облучения персонала группы Б, составляют 0,25 от пределов доз для персонала группы А.

*** Относится к дозе на глубине 300 мг/см².

**** Относится к среднему по площади в 1 см² значению в базальном слое кожи толщиной 5 мг/см² под покровным слоем толщиной 5 мг/см². На ладонях толщина покровного слоя – 40 мг/см². Указанным пределом допускается облучение всей кожи человека при условии, что в пределах усредненного облучения любого 1 см² площади кожи этот предел не будет превышен. Предел дозы при облучении кожи лица обеспечивает непревышение предела дозы на хрусталик от бета-частиц.

При проектировании защитных мероприятий установлен коэффициент запаса два, т.е. при расчете защиты следует принимать допустимую мощность дозы, равную 6 мкЗв/ч.

На предприятиях и в институтах для действующих рабочих мест устанавливаются контрольные уровни, которые меньше предельно допустимой мощности дозы и дозы. Они согласуются с санитарными службами.

Обеспечение допустимой дозы на рабочем месте может быть достигнуто простейшими мероприятиями: защитой, временем, количеством и расстоянием. Это означает, что следует использовать минимальную активность источника, минимально возможное время пребывания в поле излучения и находиться как можно дальше от источника. Действительно, для точечного изотропного гамма-источника имеем

$$D_{\text{раб}} = \frac{A\Gamma_{\text{СИ}}}{R^2} t_{\text{раб}} < \text{ПДД}. \quad (1.4.6)$$

Здесь $D_{\text{раб}}$ – доза, получаемая за рабочее время $t_{\text{раб}}$; A – активность источника; $\Gamma_{\text{СИ}}$ – гамма-постоянная, табулированная для каждого радионуклида и равная дозе (аГр – аттагрей) на расстоянии 1 м от источника активностью 1 Бк; R – расстояние до источника; ПДД – предельно допустимая доза.

Если между работником и источником фотонов находится защита, то ее толщина может быть рассчитана, исходя из соотношения

$$D_{\text{раб}} = \frac{A\Gamma}{4\pi R^2} t_{\text{раб}} \cdot e^{-\mu_t x} B_D(E_0, \mu_t x), \quad (1.4.7)$$

где μ_t – полный коэффициент ослабления гамма-излучения; x – толщина защиты; B_D – дозовый фактор накопления E_0 , выбранного материала защиты и ее толщины ($\mu_t x$). Фактор накопления отражает множественные процессы рассеяния фотонов. Величина $K = \frac{e^{\mu_t x}}{B}$ называется *кратностью ослабления*. Значения K для различных защитных материалов и энергий фотонов были рассчитаны и табулированы [4].

Например, для энергий фотонов 1,25 МэВ ослабление в 10 раз достигается толщиной бетона 31,9 см, а в 20 раз – 39,9 см. Таким образом, слой $\Delta_{1/2} = 8$ см.

С другой стороны, для кратности ослабления $5 \cdot 10^4$ требуется бетон толщиной 111,5 см, а для 10^5 – 116,9 см, т.е. слой $\Delta_{1/2} = 5,4$ см.

Таким образом, использование слоев ослабления возможно только на ограниченном интервале кратностей ослабления.

Защита от β -излучения существенна при работе с радиоактивными материалами в перчаточных боксах, в перчатках за стеклянным экраном, а также в случае радиационной аварии. Для защиты от β -излучения, если позволяют условия, достаточно взять материал с малым Z , толщина которого была бы равна пробегу электронов с максимальной энергией β -спектра. Если такая толщина окажется чересчур большой, то коэффициент ослабления равен $e^{\mu_{\beta}x}$ (μ_{β} – коэффициент ослабления потока β -частиц, x – толщина материала):

$\mu_{\beta} = 8,6 \cdot \frac{Z}{A} \cdot \bar{E}_{\beta}^{1,254}$. Единицы измерения приведенных в формуле

величин следующие: для μ_{β} – $\text{см}^2/\text{г}$; $\bar{E}_{\beta}$ – МэВ. Значения $\bar{E}_{\beta}$ даны в справочнике.

Для защиты от нейтронов требуемый коэффициент ослабления находят как отношение плотности потока нейтронов без защиты к уменьшенной вдвое предельно допустимой плотности потока нейтронов (ПДП). Для нейтронов спектра деления можно выбрать ПДП для нейтронов с энергией 1 МэВ.

Плотность потока от изотропных радионуклидных источников без защиты

$$\varphi = \frac{Q}{\pi R^2},$$

где Q – выход нейтронов (поток), с^{-1} ; R – расстояние от источника до точки наблюдения. При работе на реакторах и ускорителях плотность потока нейтронов – результат измерения. Необходимая толщина материала (как правило, борированный полиэтилен, вода, железобетон) определяется из простого соотношения

$$K = \frac{\varphi}{\text{ПДП}} = e^{x/\lambda}, \quad (1.4.8)$$

λ – длина релаксации нейтронов с учетом многократного рассеяния (табл. 1.4.5).

Следует подчеркнуть, что на долю быстрых нейтронов приходится $60 \div 80$ % общей эквивалентной дозы нейтронов.

Таблица 1.4.5

Материал	Энергия нейтронов (МэВ) или тип источника	λ
Вода	2	4,5
	4	6,2
	Спектр деления	7,6
	$14 \div 15$	14,5
	Pu- α -Be	10,5
Al	4	38,1
	14	42,6
	Спектр деления	32,4
Полиэтилен	4	5,05
	Спектр деления	5,78
	$14 \div 15$	12,8
Бетон (обычный)	Спектр деления	27,8
Железо	4	59,5
	14,9	64,2
	Спектр деления	59

Конечно, приведенные здесь способы расчета защит носят оценочный характер. Расчет с учетом геометрических условий, спектра излучения и т.п. – задача специалистов.

Защита органов дыхания осуществляется с помощью фильтрации воздуха от аэрозолей. Большую популярность завоевали волоконные фильтры Петрянова-Соколова. Они удерживают 99,9 % радиоактивных аэрозолей. Принято считать, что пакет из n стандартных фильтров ослабляет количество аэрозолей в $(1 - \delta)^n$ раз (δ – коэффициент удержания аэрозолей). Обычно задача оценки количества стандартных пакетов для индивидуальной защиты органов дыхания возникает только в аварийных ситуациях. Требуемый коэффициент ослабления определяется как отношение измеренной концентрации аэрозолей к ДОА.

Примеры и задачи

1. При аварии на радиохимическом предприятии произошел выброс радиоактивных газов внутри рабочего зала, а также радиоактивное загрязнение пола гамма-излучающими нуклидами. При этом мощность эквивалентной дозы внешнего гамма-излучения составила H (мкЗв/ч). Концентрации радиоактивных газов ^{41}Ar , ^{133}Xe , ^{135}Xe в МБк/м³ приведены в табл. 1.4.6. Предельно допустимые концентрации для каждого из этих газов установлены в нормативных документах, как 1,7; 13; 2,8 кБк/л.

Может ли персонал проводить работы в этом помещении без предварительной дезактивации и очистки?

Таблица 1.4.6

№ варианта	H , мкЗв/ч	^{41}Ar , МБк/м ³	^{133}Xe , МБк/м ³	^{135}Xe , МБк/м ³
1	2	0,8	3,0	1,0
2	5	0,8	3,0	1,0
3	2	0,5	2,0	1,0
4	5	0,5	2,0	0,5

2. Возраст профессионального работника предприятия ЯТЦ 40 лет. Он начал свою производственную деятельность на этом предприятии в 25 лет. Определить максимальную эффективную дозу, которую он мог получить за время работы.

3. На каком расстоянии от источника ионизирующего излучения может быть расположено рабочее место работника категории А при условии соблюдения норм НРБ, если на расстоянии 3 м от точечного изотропного источника ^{60}Co мощность дозы гамма-излучения составляет 0,1 мкЗв/с.

4. Экспериментатор работает в реакторном зале в поле смешенного гамма-нейтронного излучения. Мощности поглощенной дозы в ткани, создаваемые быстрыми, тепловыми нейтронами и гамма-излучением за смену, равны 2; 3 и 4,2 мкГр/ч соответственно. Определить мощность эквивалентной дозы в мЗв/нед. при 6-дневной рабочей неделе. Может ли персонал работать полный рабочий день в реакторном зале в таких условиях в течение года?

5. В реакторном зале исследовательского реактора при проведении эксперимента в течение всего года мощность поглощенной до-

зы фотонного излучения реактора составила D [мкГр/ч], плотность потока быстрых, промежуточных и тепловых нейтронов составили ϕ (табл. 1.4.7).

Может ли персонал работать в реакторном зале весь рабочий день (при 36-часовой рабочей неделе), если допустимая Нормами плотность потока быстрых, промежуточных и тепловых нейтронов составляет 20, 33, 750 нейтр./($\text{см}^2 \text{ с}$) соответственно?

Таблица 1.4.7

№ варианта	P , мкЗв/ч	$\phi_{\text{б}}$, нейтр./($\text{см}^2 \text{ с}$)	$\phi_{\text{пр}}$, нейтр./($\text{см}^2 \text{ с}$)	$\phi_{\text{т}}$, нейтр./($\text{см}^2 \text{ с}$)
1	2	4	6	100
2	2	12	6	100
3	5	4	6	100
4	2	4	18	100

6. В рабочее помещение предприятия ЯТЦ происходит выход смеси радиоактивных инертных газов, который распределен по активности в соотношении (%): $^{41}\text{Ar} = 45$, $^{133}\text{Xe} = 40$, $^{135}\text{Xe} = 15$.

Определить допустимую концентрацию смеси радиоактивных инертных газов в воздухе рабочих помещений, если допустимые концентрации каждого из этих газов найдены как 1,7; 13; 2,8 кБк/л соответственно.

7. При проведении медицинской процедуры опухоли щитовидной железы внутривенно вводится препарат $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (технеций) с периодом полураспада 6,05 ч. Данный нуклид является аналогом йода и избирательно накапливается в щитовидной железе и выводится из организма с мочой. При проведении данной процедуры пациент получает следующие значения эквивалентных доз на различные органы, приведенные в табл. 1.4.8. Облучением остальных органов пренебречь. Определить эффективную дозу, которую получил пациент.

Таблица 1.4.8

Орган	Взвешивающий коэффициент w_T для тканей и органов	Эквивалентная доза, мкЗв		
		Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Щитовидная железа	0,05	300	200	500
Легкие	0,12	20	50	50
Молочные железы	0,05	10	50	30
Красный костный мозг	0,12	40	40	40
Гонады	0,2	20	20	20
Печень	0,05	150	100	100
Костная ткань	0,01	10	10	10
Почки*	—	150	100	100
Селезенка*	—	150	100	100

* Для этих органов не определены взвешивающие коэффициенты w_T , но известно, что суммарный взвешивающий коэффициент для органов и тканей, не приведенных в таблице взвешивающих коэффициентов w_T , рекомендованных для проведения расчетов радиационной защиты значений, составляет 0,05. Поэтому взвешивающий коэффициент для почек и селезенки будет 0,25 соответственно.

8. При рентгенографии грудной клетки радиационно-чувствительные органы человека получили следующие значения эквивалентной дозы рентгеновского излучения (табл. 1.4.9).

Таблица 1.4.9

Орган	Эквивалентная доза, мкЗв	Взвешивающий коэффициент w_T для тканей и органов
Гонады	10	0,20
Красный костный мозг	110	0,12
Толстый кишечник	20	0,12
Легкие	180	0,12
Желудок	30	0,12
Мочевой пузырь	20	0,05
Грудная железа	30	0,05
Печень	20	0,05
Пищевод	10	0,05
Щитовидная железа	50	0,05
Кожа	20	0,01
Костная ткань	50	0,01
Остальные	0	0,05

Определить эффективную дозу, которую получил пациент.

9. Поглощенная доза в ткани при облучении потоком тепловых нейтронов составляет 100 мкГр. Какой поглощенной дозе фотонного излучения она соответствует по биологическому действию на человека?

10. Мощность поглощенной дозы фотонного излучения с энергией 2 МэВ в воздухе в условиях электронного равновесия заряженных частиц равна 15 мкГр/ч. Чему равна мощность эквивалентной дозы воздействия этого излучения на человека?

11. Определить наиболее оптимальный (с точки зрения радиационного воздействия на человека) маршрут перемещения из Лондона в Нью-Йорк. Расстояние – 3000 км.

Возможные варианты (табл. 1.4.10):

- 1 – регулярный авиарейс;
- 2 – сверхзвуковой самолет (Конкорд, снят с эксплуатации 25.10.2003);
- 3 – морской транспорт;
- 4 – орбитальный самолет (проект).

Таблица 1.4.10

Вариант	Высота перемещения на маршруте	Время нахождения на высоте маршрута, ч	Мощность дозы ионизирующего излучения на высоте маршрута, мкЗв/ч
1	10	*	5
2	17	4	13
3	0	*	*
4	70	1	60

* Значения задать самостоятельно.

12. Усредненное значение годовой дозы дополнительного (сверхестественного фона) облучения для человека, проживающего в непосредственной близости от предприятия ЯТЦ, оценивается в 10 мкЗв.

Определить число дополнительных случаев заболевания раком и суммарное число негативных стохастических эффектов среди 150 тыс. жителей.

Коэффициенты вероятности заболевания раком и появления стохастических генетических эффектов для населения составляют $5,5 \cdot 10^{-2}$ и $0,2 \cdot 10^{-2} \text{ Зв}^{-1}$ соответственно.

13. Годовая доза, которую получают самозаселенцы, проживающие в 30-км зоне Чернобыльской АЭС, оценивается в 20 мкЗв.

Оценить риск заболевания раком для жителей 30-летнего возраста, если коэффициент вероятности заболевания раком составляет $5,5 \cdot 10^{-2} \text{ Зв}^{-1}$.

14. Проводится экспериментальное исследование эффекта скай-шайн (Sky-shine – отражение гамма-излучения от неба), рис. 1.4.1.

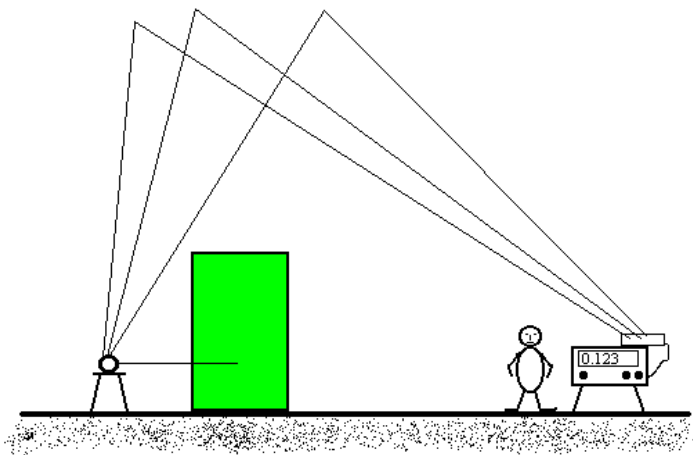


Рис. 1.4.1. Исследование эффекта скай-шайн

В качестве источника используется мощный источник ^{60}Co . Для обеспечения радиационной безопасности и корректного проведения измерений скай-шайн необходимо уменьшить уровень прямого (мешающего) облучения в 10000 раз. Предлагается использовать бетонную защиту.

Определить требуемую толщину защиты. Известно, что:

$$\mu = 1,131 \text{ см}^{-1};$$

$$B = A \exp(-\alpha_1 \mu d) + (1 - A) \exp(-\alpha_2 \mu d);$$

$$A = 84; \alpha_1 = 0,035; \alpha_2 = 0,018.$$

15. Известно, что пластина железа толщиной 4 см ослабляет плотность потока не рассеянных фотонов в 10 раз. В геометрии

«узкого пучка» рассчитать линейный коэффициент ослабления μ , слой половинного ослабления $\Delta_{1/2}$, слой десятичного ослабления $\Delta_{1/10}$, длину релаксации L и массовый коэффициент ослабления μ_m фотонов в железе.

16. Рассчитать слой половинного ослабления $\Delta_{1/2}$, слой десятичного ослабления $\Delta_{1/10}$, длину релаксации L и массовый коэффициент ослабления μ_m фотонов ^{60}Co в железе. Расчет провести для средней энергии фотонов ^{60}Co , равной 1,25 МэВ, для которой линейный коэффициент ослабления $\mu = 0,42 \text{ см}^{-1}$.

17. Определить фактор накопления, характеризующий прохождение гамма-излучения точечного изотропного источника ^{137}Cs в бесконечной защите из железной стружки с насыпной плотностью $5,2 \text{ г/см}^3$, если расстояние между точечным источником и детектором равно 13 см.

Вычисления произвести:

- 1) с использованием табл. 4.11;
- 2) используя коэффициенты для экспоненциального представления фактора накопления.

Факторы накопления

$$B = A \exp(-\alpha_1 \mu d) + (1 - A) \exp(-\alpha_2 \mu d).$$

Таблица 4.11

Энергия фотонов, МэВ	μd					A_1	$-\alpha_1$	α_2
	1	2	4	7	10			
0,5	2,02	3,20	6,16	12,1	19,9	11	0,0884	0,0185
1,0	1,84	2,84	5,17	9,95	15,8	9,0	0,082	0,0257
2,0	1,60	2,28	3,82	6,54	9,78	6,0	0,0735	0,040

18. Определить, какой материал экономически выгоднее применить для защиты от гамма-излучения точечного изотропного источника ^{137}Cs , если он должен в барьерной геометрии ослабить поглощенную дозу в 20 тыс. раз. В качестве альтернативных можно использовать: свинец (стоимость – 100 руб./кг, плотность $11,3 \text{ г/см}^3$) и железо (17 руб./кг, плотность $7,86 \text{ г/см}^3$). Линейные коэффициенты ослабления: $\mu_{\text{Pb}} = 1,18 \text{ см}^{-1}$; $\mu_{\text{Fe}} = 0,57 \text{ см}^{-1}$.

19. В лабораторных условиях произведены измерения защитных свойств свинца с источником гамма-квантов от неизвестного радионуклида в условиях геометрии узкого пучка.

Первое измерение произведено при толщине свинцового листа 1 см. Затем толщина защиты была увеличена в 4 раза. Отношение дозиметрических характеристик в этих измерениях составило 7,2.

Определить радионуклид, используемый в этих измерениях (табл. 4.12).

Таблица 4.12

Нуклид	^{203}Hg	^{198}Au	^{137}Cs	^{60}Co	^{24}Na
Энергия фотонов, МэВ	0,279	0,412	0,662	1,25	2,75
μ , см $^{-1}$	4,65	2,32	1,18	0,658	0,476

5. ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ. НАЧАЛЬНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

Современный человек не может представить себе жизни без использования электричества, электрической энергии. Создавая за счет этого комфортность своего бытия, человечество одновременно с этим подвергается опасности поражения людей, а также опасности возникновения пожаров, взрывов.

Опасность поражения человека электричеством может возникнуть как при непосредственном нештатном контакте его с деталями электросетей и электроустановок, так и при отсутствия такого контакта, — при попадании человека в создаваемые электричеством поля, например при стекании электричества в землю. Наиболее частыми являются случаи контактного поражения, когда два участка тела человека оказываются в контакте с предметами, имеющими разный электрический потенциал.

Степень опасности поражения человека электричеством определяется, прежде всего, величиной протекающего через его тело электрического тока, в меньшей степени она зависит от частоты переменного тока, пути протекания тока, состояния здоровья и других обстоятельств. Механизм поражения человека электричеством не однороден: в тканях человека под действием протекающего тока развиваются химические, физические, биологические процессы, результатом которых могут быть электротравмы и электрические удары (последние классифицируются на четыре степени тяжести).

Линии электропередач (ЛЭП) и иные электроустановки могут иметь разнообразные конструктивные построения и в зависимости от этого создавать разную потенциальную опасность. ЛЭП переменного тока могут быть однофазными и трехфазными, изолированными от земли и с глухозаземленной нейтралью. Степень опасности поражения человека, создаваемой ЛЭП, конечно, зависит от величины напряжения, протяженности линии, режима нейтрали. Снижение, а в идеале – исключение, опасности поражения человека электричеством достигается различными способами обеспечения электробезопасности.

Практически обязательные способы обеспечения электробезопасности:

- защитное электрическое заземление;
- защитное электрическое зануление;
- защитное быстрodeйствующее отключение;
- организационные меры.

Специфическая электрически опасная ситуация возникает при стекании электричества в землю. Две разновидности такой ситуации называются, соответственно, *шаговым напряжением* и *напряжением прикосновения к проводнику, по которому стекает электричество*.

Эксплуатация электроопасных объектов нормируется законами, инструкциями. Помимо упомянутых мер безопасность обеспечивается строгим режимом подготовки рабочих кадров и допускаемых к эксплуатации объектов электрохозяйства.

Примеры и задачи *

1. Человек, находясь в домашних условиях, занимаясь ремонтом бытовой аппаратуры, по оплошности ладонями рук оказался в контакте с деталями с разностью потенциалов 220 В. Определить величину тока, который потечет через тело человека, рассчитав сопро-

* При решении задач, если необходимо учитывать удельное сопротивление земли, принимать его равным $100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Допустимым для человека значением тока в неаварийных ситуациях считать 0,3 мА, в аварийных (с несмертельным исходом) – 6 мА (для профессионалов) и 2 мА (для обычного человека).

тивление тела по известным соотношениям электротехники. При этом необходимые геометрические параметры органов человека, по которым по условию задачи потечет ток, оценить самостоятельно, умозрительно представив путь протекающего тока [3]. Электротехнические параметры тканей тела человека принять равными:

относительная диэлектрическая проницаемость кожи – 150;

объемное удельное электрическое сопротивление кожи – $10^4 \text{ Ом} \cdot \text{м}$;

объемное удельное электрическое сопротивление тканей внутренних органов – $10 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Продолжительность контакта – более 1 с.

2. Рассчитать величину тока через тело человека, попавшего под переменное напряжение (50 Гц) величиной 380 В, и степень его возможного поражения при условии: продолжительность протекания тока – более 1 с. Значения электрических параметров ткани органов тела человека принять такими, какими они приведены в предыдущей задаче. Вариант условий прохождения тока через тело человека выбрать из табл. 1.5.1. Землю в данной задаче считать идеальным проводником.

Таблица 1.5.1

Параметры электрической цепи	Варианты			
	1	2	3	4
Площадь контакта с токоведущими деталями, см^2	2	0,7	0,5	0,3
Толщина кожи, мм	1	1,5	0,07	0,5
Длина пути тока в теле, м	2	1,5	1	0,5
Среднее значение площади сечения органов по пути тока, см^2	200	150	120	100

3а. Человек, стоя на земле, рукой коснулся одного провода изолированной от земли воздушной линии электропередачи. Электрическое сопротивление изоляции этого провода относительно земли – r_1 [Ом], то же сопротивление для второго провода – r_2 [Ом]. Электрическое сопротивление тела человека – R [Ом], электрическое напряжение между проводами составляет U [В]. Варианты числовых значений этих параметров приведены в табл. 1.5.2.

Определить величину тока через тело человека для одного из вариантов численных значений, приведенных в таблице параметров.

Таблица 1.5.2

Параметры	Варианты			
	1	2	3	4
U , В	127	220	380	1000
R , Ом	700	1000	2000	3000
r_1 , Ом	10^4	$2 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^4$
r_2 , Ом	$2 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$

3б. Выполнить задачу 3а при дополнительном условии: провод, который в задаче назван вторым, оборвавшись, упал на землю, замкнувшись на нее через сопротивление 20; 30; 40; 50 Ом, соответственно, для каждого из вариантов предыдущей задачи.

В каком из состояний сети (неаварийном или при упавшем на землю проводе) опасность поражения человека выше?

3в. Выполнить задачу 3б при дополнительном условии: на землю упали оба провода сети и замкнулись на нее, образовав с нею электрическое сопротивление, одинаковое для обоих проводов и равное тому, которое указано в задаче 3б.

3г. Выполнить задачу 3а при условии: провод, названный в задаче 3г, глухо заземлен через сопротивление, равное 10 Ом. Остальные параметры, необходимые для решения, приведены в табл. 1.5.2.

4. Человек, стоя на земле, рукой коснулся одного провода трехфазной изолированной от земли ЛЭП. Фазное напряжение в линии равно 220 В. Электрическое сопротивление изоляции проводов относительно земли составляет $r = 10^4$ Ом. Электрическое сопротивление тела человека равно $R_h = 1000$ Ом.

Определить величину тока через тело человека.

Рекомендация. Провод ЛЭП, к которому коснулся человек (назовем его первым), с каждым из других проводов ЛЭП (например, вторым) образует источник электрического напряжения (линейного!), его значение равно 380 В. К этому источнику последовательно подключены два сопротивления r , а параллельно одному из этих сопротивлений оказалось включенным тело человека. По известным законам электротехники нетрудно найти величину тока через тело человека. Аналогичная электрическая цепь будет образована

парой проводов: первого и третьего. Приближенно можно считать, что за счет этого величина тока через тело человека удвоится.

5а. Станочное оборудование цеха подключено к трехфазной ЛЭП напряжением 220/380 В. Нейтраль ЛЭП заземлена через сопротивление 10 Ом. В станке одного из рабочих во время работы возникла неисправность, в результате чего один из фазных проводов замкнулся на корпус станка. К тому же данный станок оказался незаземленным. Электрическое сопротивление тела человека равно 1000 Ом. Заземлитель нейтрали представляет собой погруженный в землю металлический стержень длиной 3 м, диаметром 3 см.

Рассчитать электрическое сопротивление заземлителя нейтрали и величину тока через тело человека. При этом принять во внимание сноску к разделу «Примеры и задачи».

5б. Выполнить задачу 5а при условии: аварийный станок заземлен. Заземлитель представляет собой металлический шар диаметром 10 см и погруженный в землю на глубину 3 м.

6а. Один из фазных проводов трехфазной ЛЭП с фазным напряжением 6000 В, с глухозаземленной нейтралью упал на землю и соприкасается с ней поверхностью в форме полусферы радиусом 2 см. Заземлитель нейтрали представляет собой погруженный в землю металлический цилиндрический стержень длиной 2 м, диаметром 2 см.

Рассчитать электрическое сопротивление двух заземлителей, указанных в данной задаче, и величину тока, который потечет по образованной ими цепи. Сопротивление других участков образованной электрической цепи считать пренебрежимо малым (см. также сноску к разделу «Примеры и задачи»).

6б. Определить электрическое напряжение прикосновения к каждому из заземлителей, используя условие предыдущей задачи. Удаление человека от заземлителей принять равным N [м]. Прикосновение к какому из двух заземлителей, упомянутых в задаче 6а, более опасно для человека?

6в. Используя условие задачи 6а, определить шаговое напряжение на удалении, равном 5 м от заземлителей, указанных в нем, приняв ширину шага равным 1 м.

7. Человек коснулся нулевого провода в точке, находящейся на удалении, равном половине общей длины линии электропередачи. Нулевой провод линии глухо заземлен через сопротивление равное

10 Ом. Электрическое напряжение в ЛЭП составляет 220 В. В момент касания линия была нагружена на полную проектную мощность.

Определить величину тока через тело человека, приняв его электрическое сопротивление равным 1000 Ом. Сопротивление земли в данной задаче считать равным нулю.

Для решения данной задачи проектную норму допустимого падения напряжения в проводах сети при ее предельной нагрузке; принять равной 10 %.

Контрольные вопросы

1. Ориентируясь на эквивалентную электрическую схему человеческого тела, пояснить, как будет изменяться его электрическое сопротивление:

при увеличении площади контакта тела человека с деталями электроустановки, оказавшихся под напряжением;

при наличии повреждений кожи в местах ее контакта с теми же деталями электроустановки?

2. Какие поражающие процессы развиваются в теле человека при прохождении через него электрического тока?

3. По каким признакам поражения человека электрические удары подразделяются на общепринятые четыре степени тяжести?

В каком диапазоне значений величины тока, протекающего через тело человека, возможно его поражение электрическим ударом с признаками каждой степени тяжести?

4. Какими факторами определяется степень возможного поражения человека электричеством? Какой из этих факторов является преобладающим?

5. Какие линии электропередач используются в энергетическом хозяйстве по признаку:

а) числа проводов в линии;

б) возможного режима нулевого провода?

6. Из каких соображений протяженные линии электропередач проектируются и создаются высоковольтными?

7. За счет чего возникает опасность поражения человека при его контакте с нулевым глухозаземленным проводом ЛЭП?

8. За счет чего возникает опасность поражения человека при его контакте с одним из проводов ЛЭП, изолированной от земли?

Как изменится степень опасности для человека, если при этом второй провод ЛЭП окажется упавшим на землю?

9. Два провода воздушной ЛЭП имеют разную изоляцию относительно земли. При касании к какому из проводов (с большим или меньшим значением сопротивления изоляции) опасность поражения человека, стоящего на земле, будет выше?

10. Почему при анализе электробезопасности протяженных высоковольтных ЛЭП становится актуальным учет электрической емкости, создаваемой между проводами и землей?

11. В чем состоит метод зеркальных отображений, используемый при расчете потенциальных полей заземлителей?

12. Как будет изменяться потенциальное поле на поверхности земли от шарового заземлителя, через который стекает ток в землю при увеличении:

- а) тока;
- б) радиуса шарового заземлителя;
- в) глубины погружения в землю?

13. Ответить на вопрос 12 при условии: заземлитель (цилиндрический, радиусом r и длиной l) погружен в землю на всю его длину.

14. Как будет изменяться напряжение прикосновения человека к проводнику, через который стекает электричество в землю, с увеличением расстояния между точкой стекания электричества и человеком?

15. Как будет изменяться шаговое напряжение вблизи проводника, через который стекает электричество в землю, с увеличением:

- а) размера шага;
- б) удаленности человека от точки стекания электричества?

16. Перечислить и пояснить суть известных способов обеспечения электробезопасности.

17. В чем состоит суть группового заземлителя и с какой целью осуществляется групповое заземление электроустановок?

18. Зачем при использовании электрического защитного зануления в токоподводящие провода, через которые питаются электроустановки, включаются быстродействующие автоматические выключатели?

19. Пояснить, какие устройства в электрохозяйстве вашей квартиры используются в качестве быстродействующих защитных выключателей.

20. Какими организационными мерами обеспечивается электробезопасность в условиях производства?

21. Какие правила должен соблюдать человек, оказавшийся в потенциальном поле, создаваемом стоком электричества в землю?

22. Какими приемами должен пользоваться человек при оказании помощи другому человеку, попавшему под электрическое напряжение?

23. Каков порядок расследования несчастных случаев поражения работников в процессе производственной деятельности?

6. ОСОБЕННОСТИ ОПАСНОСТЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ПРИРОДЫ

Природные и антропогенные электрические и магнитные (по существу, электромагнитные) поля, которые неизбежно присутствуют в окружающем пространстве, способны неблагоприятно воздействовать на людей, вызывая соматические и (или) генетические поражения. Физическая сторона этих опасностей ныне хорошо изучена, однако механизмы поражающего воздействия исследованы слабо. В то же время опасности электромагнитной природы стремительно возрастают благодаря интенсивному внедрению электромагнитных технологий в производственные процессы, бытовую технику, средства вооруженной борьбы, средства связи и автоматизации управления, космические системы и т.д. Начало XX столетия можно считать отсчетной точкой массового использования электромагнитных технологий.

Будучи слабо информированы о быстро возрастающей электромагнитной опасности, большинство людей в погоне за комфортом бытия все более и более окружают себя генерирующей электромагнитной техникой, проявляя инфантильность в отношении сопутствующей этому опасности. Большая часть человечества игнорирует мудрое предупреждение: «бесплатный сыр бывает только в мышеловке». Впрочем, в жизни возникают всполохи противопо-

ложного отношения к электромагнитной опасности, когда в сообществе людей порождается эпидемия электромагнитной фобии.

Истина, видимо, находится между этими крайностями: опасности электромагнитной природы реальны, они способны специфически, а главное неблагоприятно, воздействовать на человека, но человечество обладает набором инструментов и мер, с помощью которых оно может эффективно защищаться от них. Люди должны быть научены грамотно использовать такие инструменты защиты от электромагнитной опасности.

Рассмотрение сути электромагнитной опасности предполагает понимание нижеизложенных физических основ теории электромагнетизма.

Известно, что электрические поля порождаются электрическими зарядами, а магнитные – электрическими токами (движущимися зарядами); намагниченные вещества создают магнитное поле за счет однопоравленной ориентации орбит электронов в атомах.

Электромагнитное излучение можно назвать *симбиозом изменяющихся во времени и за счет этого порождающих друг друга электрического и магнитного полей*.

Каждая точка окружающего пространства (будем далее его называть полем – электрическим, магнитным или электромагнитным – в зависимости от его свойств) может быть охарактеризована некоторыми количественными показателями. К числу базовых характеристик полей относятся следующие четыре векторные величины:

напряженность электрического поля – $\mathbf{E}$;

электрическая индукция – $\mathbf{D} = \epsilon_0 \epsilon \mathbf{E}$ (значение $\mathbf{E}$ – в вакууме);

магнитная индукция – $\mathbf{B}$ (в вакууме):

напряженность магнитного поля – $\mathbf{H} = \mathbf{B} / \mu_0 \mu$.

В приведенных соотношениях: $\epsilon_0 = (4\pi \cdot 10^9)^{-1}$ Ф/м (фарады на метр) и $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м (генри на метр) – универсальные размерные константы; $\epsilon \geq 1$ – относительная диэлектрическая проницаемость среды, безразмерная характеристика поляризуемости (восприимчивости к напряженности поля) молекул среды под действием электрического поля (например, для воздуха она равна 1,0006, для воды – 80); μ – относительная магнитная проницаемость среды, безразмерная характеристика, может быть как больше, так и меньше

ше единицы. Для вакуума: $\varepsilon = \mu = 1$. Величины ε_0 и μ_0 , введенные в физику в целях рационализации системы единиц мер, связаны соотношением: $\varepsilon_0 \mu_0 = c^{-2}$ (c – скорость света).

Единицами измерения перечисленных базовых показателей поля в системе СИ являются: 1 В/м (вольт на метр) – для **E**; 1 А/м (ампер на метр) – для **H**; 1 Кл/м² (кулон на квадратный метр) – для **D**; 1 Тл (тесла) = 1 Н/(А · м) – для **B**.

Произведения $\varepsilon\varepsilon_0$ и $\mu\mu_0$ некоторые авторы именуют абсолютной диэлектрической проницаемостью и абсолютной магнитной проницаемостью соответственно.

Направление вектора **E** в каждой точке поля совпадает с направлением создаваемой в этой точке силы, действующей на пробный электрический заряд, помещенный в эту точку.

Если окружающее заряд пространство заполнено средой, то напряженность **E**_{ср} уменьшится в согласии с формулой:

$$\mathbf{E}_{\text{ср}} = \mathbf{E}/\varepsilon, \quad (1.6.1)$$

а электрическая индукция не изменится:

$$\mathbf{D}_{\text{ср}} = \mathbf{D}. \quad (1.6.2)$$

Электрический заряд величиной q в среде на расстоянии **r** создает электрическое поле, напряженность **E** которого на удалении r от него определяется формулой

$$\mathbf{E} = (4\pi\varepsilon\varepsilon_0)^{-1} \cdot \frac{q}{r^2} \cdot \mathbf{e}_r, \quad (1.6.3)$$

где $\mathbf{e}_r$ – орт радиус-вектора **r**.

Магнитная индукция в точке магнитного поля, создаваемого в среде бесконечно длинным прямолинейным проводником с током I , на удалении r от проводника определяется по соотношению:

$$B_{\text{ср}} = \frac{2I\mu\mu_0}{2\pi r}. \quad (1.6.4)$$

В среде с относительной магнитной проницаемостью μ :

$$\mathbf{H}_{\text{ср}} = \mathbf{H}, \quad \mathbf{B}_{\text{ср}} = \mu\mathbf{B} = \mu_0\mu\mathbf{H}_{\text{ср}}. \quad (1.6.5)$$

В точке пространства с заданными векторными характеристиками электромагнитного поля на заряд q , движущийся со скоростью **V**, действует сила **F**, равная:

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_{\text{эл}} + \mathbf{F}_{\text{магн}} = q\mathbf{E} + q[\mathbf{V} \times \mathbf{B}]. \quad (1.6.6)$$

Произвольно взятое реальное электромагнитное излучение можно упрощенно представить себе в виде суперпозиции элементарных волновых процессов. Отдельный элементарный процесс можно представить в виде синфазных гармонических колебаний векторов $\mathbf{E}$ и $\mathbf{H}$ во взаимно-перпендикулярных плоскостях. При этом изменение одного вектора (например, электрического) создает соответствующее переменное поле, которое индуцирует сопутствующее поле (в данном случае – магнитное). И наоборот.

Этот феномен описывается уравнениями Максвелла, приведем два из них, представляющих интерес для наших заключений:

$$[\nabla \mathbf{E}] = -\partial \mathbf{B} / \partial t, \quad [\nabla \mathbf{H}] = \mathbf{j}_t + \partial \mathbf{D} / \partial t. \quad (1.6.7)$$

Первое из этих уравнений говорит о том, что если в некоторой точке поля вектор магнитной индукции ($\mathbf{B}$) изменяется во времени, то в этой точке индуцируется электрическое вихревое поле (т.е. поле, не обусловленное присутствием в нем электрических зарядов), ротор напряженности (степень и направление завихрения) которого в данной точке равен векторному произведению оператора Гамильтона

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{k}$$

и вектора $\mathbf{E}$.

Второе из приведенных уравнений утверждает, что сумма токов: создаваемого электрическими зарядами ($\mathbf{j}_t$), по-иному – тока проводимости, и вихревого (ему соответствует последнее слагаемое в уравнении (1.6.7)) – порождает вихревое магнитное поле, ротор напряженности которого равен сумме плотностей названных токов.

Если в некоторой точке поля возбудить гармоническое электромагнитное поле частотой ν , то колебания векторов $\mathbf{E}$ и $\mathbf{H}$ электромагнитного поля будут происходить во взаимно-перпендикулярных плоскостях и распространяться в пространстве в направлении вектора $\mathbf{S}$:

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad (1.6.8)$$

со скоростью

$$v = c / \sqrt{\epsilon \mu} \quad (1.6.9)$$

(c – скорость света в вакууме). Модуль вектора $\mathbf{S}$ равен мощности энергии, переносимой электромагнитной волной через единицу перпендикулярной этому вектору площади (плотность потока энергии). При достаточно большом удалении волны от места генерирования электромагнитной волны ее фронт можно считать плоским, и тогда колебание векторов, образующих волну, может быть описано формулами:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_m \cos 2\pi v(t - r/v); \quad \mathbf{H} = \mathbf{H}_m \cos 2\pi v(t - r/v), \quad (1.6.10)$$

r – удаление фронта волны от точки ее генерирования; $2\pi v$ – круговая частота.

При этом амплитуды гармонических колебаний связаны соотношением:

$$E_m \sqrt{\varepsilon \varepsilon_0} = H_m \sqrt{\mu \mu_0}. \quad (1.6.11)$$

Приведем принятую в практике упрощенную шкалу электромагнитных излучений, воздействующих на современного человека в тех или иных обстоятельствах (табл. 1.6.1).

Рентгеновское и гамма-излучения относятся к ионизирующим.

Физические аспекты поражающего действия электрических и магнитных полей и электромагнитных излучений на человека в упрощенном представлении состоят в следующем. Ткани органов человека, как и всякое вещество, обладают определенными электрическими и магнитными свойствами, в частности характеризуются вышеупомянутыми показателями – ε и μ . По этим показателям ткань любого органа может быть условно отнесена либо к диэлектрическим, либо к электропроводящим материалам и, кроме того, либо к диамагнитным ($\mu < 1$), либо к парамагнитным ($\mu > 1$), либо к ферромагнитным материалам ($\mu \gg 1$).

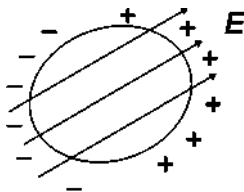
При воздействии стационарного электрического поля на ткань органа со свойствами электропроводника (рис. 1.6.1) свободные носители электрических зарядов – ионы и электроны (их наличие – неотъемлемое свойство проводников) – под действием поля придут в движение: положительные – в направлении силовых линий поля, отрицательные – в противоположном. На противоположных (по направлению силовых линий поля) поверхностях подразумеваемого органа сосредоточатся заряды разноименных знаков. Эти индуцированные заряды создадут электрическое поле, противоположное

ленное по отношению к внешнему. Такое «переселение» зарядов будет продолжаться (фактически оно происходит практически мгновенно) до тех пор, пока электрическое поле внутри подразумеваемого органа исчезнет ($E = 0$). Важно отметить, что в процессе «переселения» свободных зарядов имеет место импульс тока – направленного движения зарядов.

Таблица 1.6.1

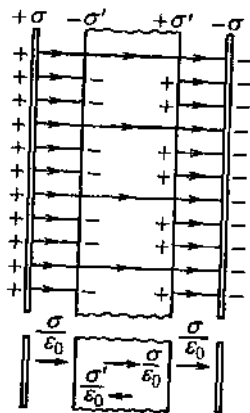
Название излучения	Примеры	Частота	Длина волны	Особенности воздействия
Статические электрические и магнитные поля	Земные поля, постоянные магниты, грозовые облака, наэлектризованные трением предметы	Практически нулевая	Практически бесконечная	Обсуждается далее
Низкие (промышленные) звукового диапазона излучения	Линии электропередачи, электроустановки, магнитные бури	0,003 – 3000 Гц	$10 - 10^8$ км	Главная опасность создается электрической компонентой
Радиоволны	Средства связи, навигации, локации	3000 – $3 \cdot 10^9$ Гц	$10^{-1} - 10$ км	Опасность возрастает с увеличением частоты
Ультракороткие радиоволны	Системы дальнего (глобального) наблюдения, разведки	$3 \cdot 10^9 - 3 \cdot 10^{12}$ Гц	0,1 – 100 мм	Повышенно-опасны
Инфракрасные лучи	Солнечное излучение, бытовая техника, промышленные средства	$3 \cdot 10^{12} - 3 \cdot 10^{14}$ Гц	1 – 100 мкм	
Видимый свет	Солнечное излучение	$5 \cdot 10^{14}$ Гц	0,39 – 0,75 мкм	
Ультрафиолетовые лучи	Солнечное излучение	$5 \cdot 10^{14} - 10^{17}$ Гц	0,39 – 0,001 мкм	
Рентгеновские лучи	Лабораторная и медицинская аппаратура	$10^{17} - 10^{20}$ Гц	$10^{-3} - 10^{-6}$ мкм	Относятся к радиационно-опасным, ионизирующим
Гамма-лучи	Космические лучи, ядерные реакции	$> 10^{20}$ Гц	$< 10^{-6}$ мкм	Относятся к радиационно-опасным, ионизирующим

Рис. 1.6.1. Воздействие стационарного электрического поля на ткань органа



В диэлектрическом теле свободные носители зарядов отсутствуют. Поэтому при воздействии на такое тело стационарного электрического поля молекулы ткани могут лишь вытягиваться в направлении поля и ориентироваться в направлении его силовых линий. Импульса тока в таком случае не будет, но противоположные поверхности приобретут заряд за счет упорядоченно ориентированных молекул и атомов. За счет такого процесса внешнее поле внутри подразаумываемого органа будет ослаблено в ϵ раз (рис. 1.6.2).

Рис. 1.6.2. Ослабление внешнего поля внутри органа в ϵ раз



Эффекты, происходящие в тканях органов при воздействии стационарного магнитного поля, подобны описанным. Молекулы диамагнитных тканей в отсутствии внешнего магнитного поля не обладают магнитными свойствами, но под действием внешнего магнитного поля в них индуцируются элементарные токи, создающие встречное магнитное поле. В результате поток магнитной индукции уменьшается ($\mu < 1$). Парамагнитные ткани имеют слабые собственные магнитные моменты, их ориентация по силовым линиям внешнего магнитного поля усиливает его. Магнитная индук-

ция за счет этого повышается, хотя и не значительно ($\mu > 1$). Молекулы ферромагнитных тканей обладают большим собственным магнитным моментом, ориентация их во внешнем магнитном поле существенно усиливает последнее, магнитная индукция поля в тканях подразумеваемого органа увеличивается в μ раз (см. соотношения (1.6.5)). Отметим, что значение μ зависит от напряженности внешнего магнитного поля H и его максимум может иметь большое значение. Например, для железа $\mu_{\max} = 5000$ (при $H = 80$ А/м), для сплава супермалой $\mu_{\max} = 800000$ (при $H = 0,3$ А/м).

Таким образом, если человек попадает в стационарное электрическое или магнитное поле, то в его тканях происходят процессы перемещения или (и) поляризации и ориентации молекул. Последствия такого насилия над организмом до конца не исследованы, ясно, что они негативны. Впрочем, при определенных условиях могут иметь место и позитивные последствия и это обстоятельство ныне используется в целях терапии.

Неблагоприятные ощущения у человека при воздействии на него стационарного электрического поля появляются при напряженности поля 500 В/м. Опасность поражения человека стационарным электрическим полем создается еще и за счет того, что тело человека обладает свойством электроконденсатора. В нем за счет разделения зарядов (см. рис. 1.6.1) создается разность потенциалов между областями с разноименными зарядами. Если в такой ситуации человек находится на земле, будучи электрически изолированным от нее, то при касании заземленного металлического предмета через такой «конденсатор» возникнет импульс тока – «конденсатор» разрядится. Такой же импульс тока возникнет, если человек находится в электрическом контакте с землей и коснется изолированного от земли металлического предмета, например крыши дома. Подобные ситуации могут создаваться, например, грозовыми облаками (нижние слои облаков оказываются заряженными, как правило, отрицательно, а приземный слой воздуха и земная поверхность – положительно). Напряженность электрического поля при этом может достигать 3 кВ/м. К слову, в невозмущенном состоянии напряженность электрического поля Земли вблизи ее поверхности составляет около 100 В/м.

Стационарное магнитное поле неблагоприятно воздействует на человека при значении напряженности 160 А/м. В спокойном со-

стоянии напряженность магнитного поля Земли составляет 25 А/м – на экваторе и 56 А/м – у полюсов Земли. Сильные искусственные магнитные поля могут неблагоприятно воздействовать на кровь человека, вызывать повышение кровяного давления, раздражительность, усталость, головную боль, нарушение биоритмов и т.п. Считается (но официально это не нормируется), что допустимым для человека является воздействие на человека стационарного магнитного поля с напряженностью 8 кА/м.

Электрическое и магнитное поля, создаваемые линиями электропередач и другими электроустановками промышленной частоты, действуют на человека подобно описанному, их переменность (с частотой обычно 50 Гц) существенно не изменяет физической картины воздействия. При этом по воздействию на человека электрическая компонента является преобладающей, поэтому опасность этих таких полей принято оценивать только по электрической компоненте. Существенным моментом оценки опасности электрического поля промышленной частоты является учет тока через тело человека, который непрерывно протекает через него за счет перезарядки тела («конденсатора») с той же частотой. Если электрическое поле создает на теле человека эффективную разность потенциалов U , а электрическая емкость тела равна C_h , то величина тока за счет этого составит:

$$I_h = 2\pi f C_h U, \quad (1.6.12)$$

f – частота (промышленная – 50 Гц).

Электрическое напряжение в объектах промышленной частоты (в частности, для ЛЭП) может достигать 1000 кВ. Напряженность электрического поля вблизи них может иметь величину в сотни киловольт на метр. Предельно допустимый уровень этого параметра для профессионалов считается 5 кВ/м – при непрерывном воздействии в течение полного рабочего дня и 500 В/м – для районов проживания. Недопустимо воздействие на человека поля такой природы с напряженностью более 25 кВ/м.

Теперь обратим внимание на опасности, порождаемые электромагнитным излучением радиочастотного диапазона. Эта проблема электромагнитной опасности является наиболее значимой – с учетом интенсивного развития и внедрения в практику коммутационных и других подобных средств.

При воздействии на ткани электромагнитного излучения радиочастотного диапазона электрическое поле можно принять изменяющимся по гармоническому закону. С учетом электрических свойств тканей межклеточную жидкость и внутриклеточную ткань можно считать проводниками, а мембраны клеток – диэлектриками. Следовательно, тело человека можно представить эквивалентной электрической схемой из параллельно соединенных активного (омического) сопротивления (R_h) и емкости (C_h), к которым приложено гармонически изменяющееся напряжение $U = U_m \sin \omega t$, создаваемое в теле человека электромагнитным излучением. Здесь $\omega = 2\pi f$ – круговая частота электромагнитного импульса. Если излучение является немонochастотным, его представляют в виде некоторой суммы монochастотных составляющих, а суммарный эффект находят по принципу суперпозиции.

По законам электротехники несложно получить следующее математическое соотношение для определения тока, протекающего через тело человека в условиях воздействия на него электромагнитного поля:

$$I_h = Ed / (R_3 + R_h / \sqrt{1 + 2\pi f C_h R_h}) . \quad (1.6.13)$$

Здесь $I_h = I_m / \sqrt{2}$ и $E = E_m / \sqrt{2}$ – так называемые действующие значения тока и напряженности электрической компоненты электромагнитного излучения; d – размер тела человека в направлении проходящего через него излучения; R_3 – сопротивление между телом человека и землей (в частном случае, когда человек стоит на земле в токопроводящей обуви, оно может быть равным нулю).

При малой частоте электромагнитного излучения ток протекает в основном через активное сопротивление, поскольку при этом $2\pi f C_h \ll 1$. С увеличением частоты, как нетрудно видеть из (1.6.13), емкостное сопротивление уменьшается, оно начинает играть ведущую роль в пропускании тока через тело человека. Одновременно с этим при росте частоты проводимость тканей увеличивается (т.е. активная составляющая сопротивления R_h уменьшается), вредоносность электромагнитного излучения усиливается. При частоте более 10 МГц клетки тканей приобретают свойства высокоэлектропроводящей цепи.

Протекание электрического тока, колебательные и вращательные движения молекул и атомов ткани, индуцируемые электрической и

магнитной компонентами излучения, вызывают в тканях термические (нагрев) и атермальные эффекты. Их опасность обусловлена еще и тем, что в биопроцессах живых тканей наблюдаются ритмы и на определенных частотах излучение может вызывать резонанс этих ритмов и создавать ложные биоимпульсы в организме.

Как следствие воздействия электромагнитного излучения на человеческий организм могут иметь место многообразные симптомы неблагополучия, степень которых зависит от переданной человеку энергии, спектрального состава излучения, продолжительности воздействия и других обстоятельств. Человек может ощущать тепло (не комфортно), недомогание, головную боль, головокружение, тошноту, жажду, страх, тревожность, слабость, боли в конечностях, нарушение сердечно-сосудистой деятельности, повышение кровяного давления. Такие симптомы принято именовать *радиоволновой болезнью*. Многие из землян переживают подобное после солнечных ванн на пляжах в периоды солнечных бурь.

Большинство симптомов радиоволновой болезни являются проходящими через несколько суток, иногда мучительных. Возможность хронических последствий радиоволновой болезни ныне исследована недостаточно и однозначности мнений специалистов в этом вопросе нет. Имеются публикации об обнаружении патологии рака в связи с электромагнитным воздействием, более достоверными являются случаи катаракты, нарушение слуха (щелчки, жужжание в ушах) у операторов радиоизлучающей техники. Бытовая радиоизлучающая техника, соблазняющая современного человека (телевизоры, мобильная связь, компьютеры, навигаторы, кухонные агрегаты и т.п. техника), реально загрязняет среду обитания, делая ее вредоносной. Мощные радиоизлучающие системы способны губительно воздействовать на человека.

Электромагнитная безопасность в РФ нормируется ГОСТами и Санитарными правилами путем задания предельно допустимых уровней (ПДУ) электрических и магнитных полей и электромагнитных излучений для разных контингентов (профессионалов и непрофессионалов) и для различных условий воздействия.

При обосновании ПДУ принимаются версия о пороговости воздействия и условие недопустимости возникновения у человека отклонений в состоянии здоровья, обнаруживаемых современными медицинскими методами, в период воздействия или в отдаленные

сроки после воздействия. В качестве параметров электромагнитных воздействий принимаются: для электрического поля – E , для магнитного поля – H , для электромагнитного излучения – плотность потока энергии – S или только напряженность электромагнитной компоненты E , поскольку преимущественно она предопределяет вредность излучения. В РФ приняты очень жесткие ПДУ. Например, бытовая техника должна удовлетворять требованию: на расстоянии 0,5 м от корпуса прибора ПДУ по напряженности электрического поля установлен в зависимости от частоты f (табл. 1.6.2).

Таблица 1.6.2

F	50 Гц	0,3 – 300 кГц	0,3 – 3 МГц	3 – 30 МГц	30 – 300 МГц	0,3 – 30 ГГц
E , В/м	500	25	15	10	3	$S = 10 \text{ мкВт/см}^2$

Еще примеры: ПДУ по E для воздушных ЛЭП составляет 0,5 кВ/м – внутри помещений; 1 кВ/м – на территории населенного пункта; 5 кВ/м – вне жилых кварталов. ПДУ для сотового телефона составляет 100 мкВт/см² – на уровне головы.

Для профессионалов, кроме того, нормируется экспозиция за рабочий день $E^2 \cdot T$ и $H^2 \cdot T$ (табл. 1.6.3).

Таблица 1.6.3

F	$E^2 \cdot T$, (В/м) ² · ч	$H^2 \cdot T$, (А/м) ² · ч
30 кГц – 3 МГц	20000	200
3 – 30 МГц	7000	–
30 – 50 МГц	800	0,72
50 – 300 МГц	800	
300 МГц – 300 ГГц	По $S = 200 \text{ (мкВт/см}^2) \cdot \text{ч}$	

Примеры и задачи

1. Определить силу F , с которой действует на положительный точечный заряд величиной $+Q$ электрический диполь, заряды которого равны $+q$ и $-q$ и удалены друг от друга на расстояние l . Заряд Q находится в плоскости, проходящей через центр диполя перпендикулярно его оси, и на удалении L от нее. Пояснить, куда будет

направлен вектор искомой силы. Окружающее пространство считать вакуумом.

Ответ: $F = qQl/[4\pi\epsilon_0(L^2 + (l/2)^2)^{3/2}]$, сила параллельна оси диполя и направлена в сторону от положительного к отрицательному заряду диполя.

2. Используя ответ предыдущей задачи, записать формулу для напряженности электрического поля в той же точке и при тех же условиях.

3а. Над поверхностью земли на высоте H сформировалось грозовое облако в форме тонкого плоского круга, в котором равномерно распределены заряды суммарной величиной Q . Какая напряженность электрического поля создается этим зарядом у поверхности земли в точке, совпадающей с вертикальной проекцией на землю центра облака. Радиус облака равен R . Воздушное пространство считать вакуумом.

Ответ: $\left[QH \left(1/H - 1/\sqrt{H^2 + R^2} \right) \right] (2\pi\epsilon_0 R^2)^{-1}$.

3б. Как изменится напряженность электрического поля при условии предыдущей задачи, если гипотетически предположить, что строго под облаком находится участок земли одинаковой с облаком геометрии, со свойствами идеального проводника?

Ответ: увеличится в два раза.

4. Пояснить физическую сторону феномена, состоящего в том, что в проводниковых материалах, внесенных в электрическое поле, внутри них напряженность поля равна нулю.

5а. Изобразить картину силовых линий электрического поля, образуемого двумя одинаковыми по величине и знаку точечными электрическими зарядами, отстоящими друг от друга на расстоянии (выбрать произвольно) и находящимися в вакуумном пространстве. Картину построить в плоскости, проходящей через точки расположения зарядов.

5б. Выполнить предыдущее задание при условии, что подразумеваемые заряды имеют разные знаки.

5в. Потренироваться на задачах типа двух предыдущих, усложняя условие за счет увеличения числа зарядов (не более четырех), комбинации знаков и геометрии их расположения.

6. Изобразить картину силовых линий магнитного поля, образуемого тремя фазными проводами воздушной линии электропередачи,

расположенными в одной плоскости на равных расстояниях одного из них от двух других (расстоянием задаться). Токи в проводах линии считать переменными, частотой 50 Гц, равными. Картину построить в плоскости, перпендикулярной проводам, и для момента времени, когда фаза тока в среднем проводе линии составляет $\pi/6$. Принять, что токи в проводах изменяются по синусоиде.

7. По проводам одной воздушной ЛЭП течет постоянный электрический ток, по проводам второй (территориально разделенной от первой) – переменный (50 Гц).

А. Будет ли образовано магнитное поле вокруг проводов каждой из линий электропередачи?

Б. Чем будет отличаться ситуация вокруг проводов разных линий с позиции магнетизма?

Г. Будет ли происходить электромагнитное излучение проводов подразумеваемых линий электропередачи?

Д. Какое силовое взаимодействие будет происходить между проводами каждой из двух линий электропередачи?

8. Что может произойти со спиралевидным проводником из эластичного материала, если по нему пустить электрический ток: будет ли он растягиваться, сжиматься в осевом направлении или сохранит начальное состояние? Ответ мотивировать с позиций физики.

9. Какое элементарное устройство можно создать, чтобы с его помощью получить возможность бесконтактно использовать электрическую энергию высоковольтной воздушной линии электропередачи? От каких обстоятельств зависит эффективность применения такого устройства?

10. Измеренная напряженность E электрической компоненты электромагнитного поля, создаваемого высоковольтной ЛЭП с рабочим напряжением 330 кВ, в точке, где находится человек в контакте с землей, составляет 9 кВ/м. Определить ток I_h , протекающий через тело человека.

Справка. Используя закономерности электротехники, можно получить следующее соотношение для определения искомой величины:

$$I_h = 2E\varepsilon_0\pi^2r^2f[\ln(2r/h) - 1]. \quad (1.6.14)$$

Здесь $f = 50$ Гц – частота переменного тока; h – рост человека, м; r – радиус круга, по площади равного поперечному сечению туловища человека, м. Остальные параметры названы ранее.

11. В какой из двух точек местоположения человека под проводами высоковольтной ЛЭП на металлических опорах напряженность электрического поля, образуемого ЛЭП, будет больше: вблизи опоры или посередине между опорами? Ответ мотивировать.

12. Электромагнитной волной переносится энергия, плотность потока которой определяется формулой (1.6.8). В монохроматической волне векторы **E** и **H** изменяются во времени согласно (1.6.10).

А. Найти формулу зависимости плотности потока энергии от времени для электромагнитной волны частотой f .

Б. Показать, что поток энергии в любой момент времени направлен в сторону распространения волны.

В. Определить среднее во времени значение плотности потока энергии.

Ответ. А. $S = 0,5 E_m H_m [1 - \cos(4\pi t)]$. Б. $S \geq 0$. В. $S_{\text{ср}} = 0,5 E_m H_m$.

13. Во сколько раз скорость распространения электромагнитной волны в вакууме больше ее скорости в среде с параметрами ϵ и μ ?

Контрольные вопросы

1. Чем образуется стационарное электрическое поле? Что понимается под силовыми линиями электрического поля и как они изображаются для одиночного электрического заряда, помещенного в вакуум?

2. В чем состоит принцип суперпозиции электрических полей в тканях тела человека от нескольких точечных электрических зарядов? Как определяется направление силовой линии электрического поля, образуемого несколькими точечными электрическими зарядами?

3. Как изменится напряженность электрического поля в тканях тела человека по сравнению с ее значением в вакууме?

4. Будет ли создаваться электрическое поле вокруг проводника, по которому течет постоянный электрический ток? Если «да», то будет ли оно стационарным или нестационарным?

5. При каких условиях электрическое поле, образуемое электрическим зарядом (или электрическими зарядами), будет нестационарным?

6. Чему равна напряженность электрического поля внутри человеческого органа со свойствами проводника, находящегося в стационарном электрическом поле?

7. При каких условиях электрические заряды образуют стационарное магнитное поле?

8. При каких условиях электрические заряды образуют нестационарное магнитное поле?

9. Какие взаимные генные процессы, образующие электромагнитную волну, протекают в пространстве?

10. Пояснить принцип экранирования (защиты) от электромагнитного излучения с помощью «одежды» из токопроводящего материала.

11. Почему «зонтик» (односторонний экран) из токопроводящего материала не защищает от электромагнитного излучения и почему он приобретает экранирующие свойства при его заземлении?

12. Как изменятся параметры монохроматической электромагнитной волны (скорости распространения, длины волны, частоты, напряженности электрического и магнитного полей) при вхождении ее из вакуума в среду с параметрами ϵ и μ ?

13. В чем состоит механизм поражающего воздействия электромагнитного излучения на человека? Как влияет частота излучения на поражающую способность?

14. Какие нормы электрической, магнитной и электромагнитной безопасности приняты в России для населения и профессионалов?

15. Какие симптомы неблагополучия возникают у человека в результате воздействия на него электромагнитных полей?

7. ПОРАЖАЮЩИЕ ФАКТОРЫ ЯДЕРНОГО ВЗРЫВА

Поражающая способность ядерного взрыва в отношении людей и объектов определяется величиной его тротилового эквивалента (q), т. е. количеством тротила (в тонах, мегатоннах или иных единицах массы), при взрыве которого выделяется столько же энергии, сколько и при данном ядерном взрыве.

Энергия ядерного взрыва передается окружающей среде, порождая в ней различные физические процессы. Некоторым из них передается значительная доля энергии взрыва и за счет этой энергии они обладают способностью поражать объекты и людей. Такие процессы принято называть *поражающими факторами ядерного взрыва*. Физическая сторона поражающих факторов зависит от свойств среды, в которой произведен взрыв и в которых развива-

ются соответствующие физические процессы. Картина поражающих факторов ядерного взрыва, произведенного в атмосфере, существенно зависит от высоты взрыва.

Наибольший эффект поражения наземных объектов достигается в большинстве ситуаций приземным ядерным взрывом, который считается таковым, если светящаяся область, образованная им, касается поверхности земли. Перечень поражающих факторов, формируемых в таких случаях, включает в себя:

- воздушную ударную волну;
- световое излучение области взрыва;
- проникающую радиацию;
- радиоактивное загрязнение местности;
- электромагнитный импульс.

Воздушная ударная волна представляет собой область сжатого воздуха, движущуюся в атмосфере со сверхзвуковой скоростью. На передней границе ударной волны – ее фронте – имеет место скачок давления и других физических параметров атмосферного воздуха, а сама область сжатия за ее фронтом плавно переходит в область разряжения, в конце которой давление воздуха возвращается к начальному. Основным параметром ударной волны, которым определяется ее поражающая способность, является избыточное давление воздуха (скачок давления) во фронте. Кстати говоря, любой параметр ударной волны по законам термогазодинамики может быть оценен по значению избыточного давления во фронте.

Избыточное давление во фронте ударной волны на заданном удалении от приземного ядерного взрыва определяется величиной тротилового эквивалента и удаленностью от взрыва. На долю воздушной ударной волны расходуется примерно 50 % энергии ядерного взрыва.

Световое излучение ядерного взрыва излучается поверхностью светящейся области, образуемой при взрыве высокотемпературными продуктами взрыва и окружающей среды. Радиус этой области (называемый еще огненным шаром) увеличивается во времени на протяжении нескольких секунд, по истечении которых область, остыв, прекращает свое существование. Основным показателем поражающей способности светового излучения ядерного взрыва служит световой импульс, под которым понимается величина энергии светового излучения, приходящейся на единицу облучаемой

поверхности, перпендикулярно расположенной к направлению излучения, за все время существования светящейся области. На световое излучение приземного ядерного взрыва расходуется примерно 35 % всей энергии взрыва.

Проникающей радиацией ядерного взрыва военные специалисты называют ионизирующее излучение, испускаемое областью ядерного взрыва. Оно состоит из потока нейтронов, рентгеновского излучения и фотонов. Ее источниками являются мгновенное излучение и излучение образовавшихся радионуклидов. Продолжительность поражающего действия проникающей радиации на людей составляет около 15 мин, по истечении которых радиоактивное облако поднимается на высоту, достаточную для того, чтобы ионизирующее излучение на пути к поверхности земли существенно поглощалось воздухом.

Радиоактивное загрязнение земли происходит при приземных ядерных взрывах за счет выпадения на землю радиоактивной пыли из пылевого облака, образованного за счет перемешивания пылеобразного грунта и радиоактивных продуктов взрыва и поднятого «архимедовой» силой в верхние слои атмосферы. При конденсации продуктов этого «коктейля» в процессе перемещения облака по направлению ветра происходит конденсация продуктов облака, образование пылинок и высеивание их на поверхность земли. Образующийся радиоактивный след облака принято аппроксимировать эллипсами, на границах которых мощность дозы на момент загрязнения принимается одинаковой.

Электромагнитный импульс генерируется областью ядерного взрыва за счет несимметричного движения носителей заряда, образуемых действием ионизирующего излучения на окружающий атмосферный воздух. Диапазон волн, составляющих этот импульс, соответствует диапазону длинных радиоволн. Поражающей способностью для человека электромагнитный импульс не обладает, но способен эффективно поражать радиоэлектронные средства.

Примеры и задачи*

1. Масса заряда плутония-239 в ядерном боеприпасе равна 6 кг, тротильный эквивалент данного боеприпаса составляет 20 тыс. т.

* При решении использовать [3].

Определить долю общей массы плутония, ядра которой будут подвергнуты делению при взрыве такого боеприпаса.

Справка. Энергия, освобождаемая при делении ядра одного атома плутония-239, составляет 200 МэВ, удельная энергия взрыва тротила равна $4,2 \cdot 10^6$ Дж/кг, число Авогадро равно $6,02 \cdot 10^{23}$ (г-моль)⁻¹, атомная единица массы равна $1,66 \cdot 10^{-24}$ г.

2а. Рассчитать избыточное давление во фронте ударной волны приземного ядерного взрыва тротиловым эквивалентом $10N$ [тыс. т], на удалении от взрыва $200N$ [м].

2б. Рассчитать давление скоростного напора ударной волны ядерного взрыва при условии предыдущей задачи.

2в. Рассчитать продолжительность свечения светящейся области ядерного взрыва и величину максимального радиуса этой области при значении тротилового эквивалента, соответствующем задаче 2а.

2г. Рассчитать величину светового импульса ядерного взрыва при значениях тротилового эквивалента и расстояния до взрыва, соответствующих задаче 2а.

3. Измеренная мощность дозы на следе радиоактивного облака ядерного взрыва на удалении 10 км на оси следа составила 100 рентген в час. Скорость ветра на высоте движения облака составляет 5 м/с. Определить мощность дозы через 2 ч после выпадения радиоактивных продуктов в указанной точке. Какую дозу радиации получит человек за те же 2 ч пребывания в той же точке на открытой местности?

4. Какими могут быть последствия облучения для человека при условиях задачи 3.

Контрольные вопросы

1. Какие средства вооруженной борьбы относятся к оружию массового поражения? По какому признаку обособляется эта разновидность средств вооруженной борьбы? Какими нормами международного права ограничивается статус этих видов оружия?

2. Пояснить принцип устройства и срабатывания ядерного боеприпаса и получения при этом энергии взрыва.

3. Какие государства современного мира владеют ядерным оружием и какой видится перспектива его всеобщего уничтожения или, наоборот, его дальнейшего «расползания» по миру?

4. Какой параметр ядерного взрыва (ядерного боеприпаса) называется тротиловым эквивалентом?

5. Какие поражающие факторы создаются при приземных ядерных взрывах? Как трансформируются они с увеличением высоты взрыва? В какой пропорции распределяется полная энергия ядерного взрыва между поражающими факторами?

6. Пояснить физическую сторону механизма образования ударной волны при ядерном взрыве и ее распространения в атмосфере. Может ли человек услышать звук взрыва до момента прихода ударной волны в пункт его местонахождения?

7. Какими количественными показателями принято характеризовать поражающую способность ударной волны?

8. Во сколько раз отличается тротиловый эквивалент двух ядерных взрывов, если избыточное давление во фронте их ударных волн оказалось одинаковым на расстояниях, отличающихся в два раза?

9. Изобразить график изменения давления воздуха от времени для гипотетического ядерного взрыва в пункте, удаленном от него на некоторое расстояние, приняв за начало временной оси момент взрыва. Какие характерные фазы имеют место в этом процессе?

10. За счет чего и в каких ситуациях создается давление скоростного напора и какой поражающий эффект ударной волны при этом создается?

11. Какой видится картина развития светящейся области приземного ядерного взрыва, какова продолжительность этого процесса? Какая доля полной энергии ядерного взрыва расходуется на световое излучение?

12. Каким параметром светового излучения принято характеризовать его поражающую способность, от каких обстоятельств зависит его численное значение?

13. Что понимается под «проникающей радиацией» ядерного взрыва? Какие компоненты излучения формируют этот поражающий фактор? Какова продолжительность его поражающего действия на человека при приземном ядерном взрыве?

14. При каких высотах ядерного взрыва возможно радиоактивное загрязнение местности? Какими показателями принято характеризовать поражающую способность этого поражающего фактора?

15. Пояснить феномен «ядерной ночи» и «ядерной зимы».

8. ХИМИЧЕСКАЯ ОПАСНОСТЬ И ПРИНЦИПЫ ЕЕ НОРМИРОВАНИЯ

Особенности возникновения и развития аварий на химически опасных объектах (ХОО). Теоретически любое химическое вещество может находиться в 3-фазовых состояниях: жидкость, газ (пар) и твердое состояние.

Установлено, что этапы развития аварий и их последствия с участием аварийным химически опасным веществом (АХОВ) находятся в прямой зависимости от соотношения критической температуры, температуры внешней среды и условий хранения. Согласно принятой на сегодняшний день классификации все АХОВ разбиваются на четыре основные группы.

Первая группа. К этой группе относятся вещества, критическая температура которых ниже температуры окружающей среды. Вещества этой группы, как правило, хранятся на ХОО в жидком состоянии при температуре, ниже критической. В случае разлива жидкости, хранящейся при нормальном давлении, вся жидкость перейдет в режим кипения без образования первичного облака. Скорость образования вторичного облака будет определяться температурой окружающей среды и физико-химическими свойствами АХОВ.

Для сжижения некоторых из АХОВ этой группы требуется дополнительно увеличение давления (относительно атмосферного). При разгерметизации емкостей, содержащих химическое вещество данной группы, переведенного в жидкое состояние с увеличением давления выше атмосферного, часть жидкости «мгновенно» испарится, образуя первичное облако паров АХОВ. Оставшаяся часть жидкости переходит в режим кипения с образованием вторичного облака.

Вторая группа. Вещества, у которых критическая температура выше, а температура кипения ниже температуры окружающей среды, относятся ко второй группе. В случае возникновения аварии с этими веществами образование первичного и вторичного облаков также зависит от условий хранения АХОВ.

Если АХОВ хранятся в жидком состоянии под высоким давлением и при температуре выше температуры кипения, но ниже температуры окружающей среды $T_{\text{хр1}}$, то при разгерметизации емкости часть АХОВ «мгновенно» испарится, образуя первичное облако паров АХОВ. Оставшаяся часть пролившейся жидкости будет ис-

паряться постепенно за счет тепла окружающей среды, образуя вторичное облако. Наибольшую опасность в данном случае будет представлять первичное облако паров АХОВ за счет того, что процесс его образования протекает очень интенсивно с разбрызгиванием значительной части жидкости в виде пены и капель.

Если АХОВ хранятся в изотермических хранилищах при температуре хранения, ниже температуры кипения, и при давлении, близком к атмосферному, то в случае разгерметизации емкости в первичное облако переходит только 3 – 5 % от общего количества АХОВ. Оставшаяся часть жидкости при испарении ведет к образованию вторичного облака паров АХОВ.

Третья группа. Вещества, у которых критическая температура и температура кипения выше температуры окружающей среды, т.е. вещества, хранящиеся при атмосферном давлении в жидкой или твердой фазе, относятся к третьей группе. Разрушение емкостей, в которых хранятся вещества данной группы, приводит к разливу или рассыпанию АХОВ, т.е. в первую очередь загрязнению почвы и водоемов. В случае же возгорания АХОВ этой группы образуется газовое облако.

Четвертая группа. Вещества, относящиеся к третьей группе, при использовании их в технологических процессах при повышенных температуре или (и) давлении относятся к четвертой группе. При авариях с АХОВ, относящихся к четвертой группе, возможно образование как первичных, так и вторичных облаков.

В случае разрушения оболочки резервуара при давлении, близком к атмосферному, и разлива АХОВ в поддон первичное облако практически отсутствует. Основная часть АХОВ идет на формирование вторичного облака.

В табл. 1.8.1 сгруппированы возможные ситуации протекания аварий с АХОВ.

Обеспечение химической безопасности предполагает выполнение прогноза развития аварийных ситуаций на ХОО. Прогноз позволяет обоснованно сформировать резервы средств защиты, своевременно подготовить персонал и население территорий, которые могут попасть в зону поражения АХОВ.

Химически опасные аварии характеризуются масштабом аварии, т.е. глубиной и площадью зоны загрязнения АХОВ.

Глубина и площадь зоны загрязнения при аварии с АХОВ зависят от физических свойств и агрегатного состояния АХОВ. Расчет проводится либо для первичного и вторичного облаков, либо только для первичного (вторичного) облака, согласно табл. 1.8.1. Так, для сжиженных газов глубина зоны загрязнения АХОВ рассчитывается отдельно для первичного и вторичного облаков, а затем определяется полная глубина зоны загрязнения Г. Для сжатых газов глубина и площадь зоны загрязнения определяются только для первичного облака.

Таблица 1.8.1

Группа	Пример АХОВ	Вид хранения	Последствия аварии
Первая	Метан, кислород, этилен	Жидкость, хранящаяся при нормальном давлении	Вторичное облако АХОВ
		Жидкость, хранящаяся при повышенном давлении	Первичное и вторичные облака АХОВ
		Газ под давлением	Первичное облако АХОВ
Вторая	Хлор, аммиак	Жидкость при повышенном давлении и температуре выше температуры кипения АХОВ, но ниже температуры окружающей среды	Первичное и вторичные облака АХОВ
		Жидкость при температуре ниже температуры кипения	Первичное и вторичное облака АХОВ
		Газ под давлением	Первичное облако АХОВ
Третья	Тетраэтилсвинец, диоксин	Жидкость при нормальном давлении	Вторичное облако АХОВ, разлив или загрязнение поверхности земли твердой фракцией вещества
Четвертая	– « –	Жидкость, хранящаяся при повышенном давлении и температуре	Первичное и вторичное облака АХОВ

Обязательные исходные данные для прогнозирования включают в себя: вид (название) химически опасного вещества; его количество, выброшенное в окружающую среду; характер разлива на поверхность; метеорологические условия на момент аварии (температура воздуха, скорость ветра, степень вертикальной устойчивости воздуха).

По этим исходным данным можно оценить количество мгновенно испарившегося продукта (оценить размеры первичного обла-

ка) и продолжительность испарения оставшегося жидкого продукта (размеры вторичного облака).

Как правило, прогнозирование проводится с использованием методик, в которых физика процессов рассеяния химических агентов в окружающих средах представляется упрощенными схемами, прошедшими апробацию в реальных условиях. Одну из таких методик и предполагается использовать при решении описанных в данной теме задач*.

Выполнение прогноза осуществляется в следующей последовательности.

1. С помощью табл. 1.8.2 устанавливается состояние вертикальной устойчивости атмосферы на момент аварии.

Таблица 1.8.2

Скорость ветра по прогнозу, м/с	Ночь			День		
	0 – 2 балла**	3 – 7 балла	8 – 10 балла	0 – 2 балла	3 – 7 балла	8 – 10 балла
0,5	ин*	ин	из	конв.	конв.	–
0,6 – 2,0	ин	из	из	конв.	конв.	из
2,1 – 4,0	ин	из	из	конв.	из	из
> 4,0	из	из	из	из	из	из

* Введены следующие сокращения: ин – инверсия, состояние приземного воздуха, при котором температура нижнего его слоя меньше температуры верхнего слоя; из – изотермия, равенство вышеупомянутых температур; конв. – конвекция, противоположность инверсии.

** Состояние облачности оценивается по десятибалльной шкале для облачности в баллах: ясно – 0 – 2 балла; полужасно – 3 – 7; пасмурно – 8 – 10.

2. В зависимости от физических свойств АХОВ и агрегатного состояния на момент аварии определяется эквивалентное по хлору количество вещества в первичном облаке (если оно образуется по условиям аварии).

Под эквивалентным количеством АХОВ понимается такое количество хлора, масштаб загрязнения которым при инверсии равен масштабу загрязнения при данной вертикальной устойчивости атмосферы данным количеством АХОВ, перешедшим в первичное (вто-

* РД 52.04.253-90. Методика прогнозирования масштабов заражения сильнодействующими ядовитыми веществами при авариях (разрушениях) на химически опасных объектах и транспорте.

ричное) облако. Эквивалентное количество АХОВ в первичном облаке определяется следующим соотношением:

$$G_{\Sigma 1} = K_1 \cdot K_3 \cdot K_5 \cdot K_7 \cdot G_0, \quad (1.8.1)$$

где K_1 – коэффициент, зависящий от условий хранения АХОВ (для сжатых газов $K_1 = 1$); K_3 – коэффициент, равный отношению пороговой токсодозы хлора PD к пороговой токсодозе PD другого АХОВ (здесь под пороговой токсодозой принимается такое значение заражения, равное произведению концентрации ОХВ на время пребывания человека в данном месте без средств защиты органов дыхания, в течение которого проявляются первые слабые признаки отравления); K_5 – коэффициент, учитывающий степень вертикальной устойчивости воздуха: для инверсии $K_5 = 1$ (для изотермии $K_5 = 0,23$; для конвекции $K_5 = 0,08$); K_7 – коэффициент, учитывающий влияние температуры воздуха (для сжатых газов $K_7 = 1$); G_0 – количество, попавшего в окружающую среду АХОВ, т. Коэффициенты для расчета эквивалентного количества АХОВ в первичном и вторичном облаках для хлора и аммиака приведены в табл. 1.8.3.

3. В случае, если необходимо, определяется эквивалентное количество вещества во вторичном облаке. Для этого выполним ряд действий.

А. Определяем время испарения $T_{\text{исп}}$ [ч] пролившегося АХОВ с площади разлива:

$$T_{\text{исп}} = \frac{hd}{K_2 \cdot K_4 \cdot K_7}, \quad (1.8.2)$$

где h – толщина слоя АХОВ, м; d – плотность АХОВ, т/м³; K_2 – коэффициент, зависящий от физико-химических свойств АХОВ (его значения приведены в табл. 1.8.3); K_4 – коэффициент, учитывающий скорость ветра (его значения приведены в табл. 1.8.4).

Б. Эквивалентное количество вещества вторичного облака зависит от времени, прошедшего от момента аварии, и определяется следующим соотношением:

$$G_{\Sigma 2} = (1 - K_1) \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6 \cdot K_7 \cdot G_0 / (h \cdot d), \quad (1.8.3)$$

где K_6 – коэффициент, зависящий от времени, прошедшего после начала аварии $T_{\text{нач}}$, $K_6 = T_{\text{нач}}^{0,8}$ при $T_{\text{нач}} < T_{\text{исп}}$; $K_6 = T_{\text{исп}}^{0,8}$ при $T_{\text{нач}} \geq T_{\text{исп}}$; если $T_{\text{исп}} > 1$ ч, то K_6 принимается равным для 1 ч.

Таблица 1.8.3

№ п/п	Наименование АХОВ	Плотность АХОВ т/м ³		T _{квп}	PD, мг · мин/л	Значения вспомогательных коэффициентов						
		газ	жид- кость			К1	К2	К3	К7			
									для -40 °С	для -20 °С	для 0 °С	для 20 °С
1	Аммиак: хра- нение под дав- лением	8 · 10 ⁻⁴	0,681	-33,42	15	0,18	0,025	0,04	0/0,9	0,3/1	0,6/1	1/1
2	Аммиак: изотермиче- ское хранение	–	0,681	-33,42	15	0,01	0,025	0,04	0/0,9	0,3/1	0,6/1	1/1
3	Хлор	32 · 10 ⁻⁴	1,553	-34,1	0,6	0,18	0,052	1,0	0/0,9	0,3/1	0,6/1	1/1

Примечание. Коэффициенты для К7 даны с разделителем для первичного и вторичного облаков.

Таблица 1.8.4

Скорость ветра, м/с	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15
К4	1	1,33	1,67	2,0	2,34	2,67	3,0	3,34	3,67	4,0	5,68

4. По табл. 1.8.5 устанавливается глубина и площадь зоны загрязнения от первичного (Γ_1 и S_1) и вторичного (Γ_2 и S_2) облаков соответственно, т.е. глубина (км)/площадь заражения (км²) первичным (в числителе) и вторичным (в знаменателе) облаками при аварийных выбросах АХОВ.

5. Полная глубина зоны загрязнения АХОВ Γ [км], обусловленная воздействием первичного и вторичного облака АХОВ, определяется как сумма $\Gamma = \Gamma' + 0,5\Gamma''$, где Γ' –наибольший; Γ'' – наименьший из размеров первичного и вторичного облаков, соответственно, на время, прошедшее от начала аварии $T_{нач}$.

6. Значения скорости переноса переднего фронта воздушных масс U в зависимости от скорости ветра и степени вертикальной устойчивости приведены в табл. 1.8.6.

7. Порядок нанесения зон загрязнения на топографические карты и схемы.

Зона возможного загрязнения облаком АХОВ на картах (схемах) ограничена окружностью, полуокружностью или сектором, имеющим угловые размеры ϕ и радиус, равный глубине зоны загрязнения Γ . Угловые размеры в зависимости от скорости ветра V по прогнозу приведены в табл. 1.8.7. Центр окружности, полуокружности или сектора совпадает с источником загрязнения (место аварии).

Наряду с аварийными выбросами АХОВ определенную опасность в загрязнении окружающей среды представляют выбросы вредных химических веществ, образующихся при различных технологических процессах на базе сжигания органического топлива, в первую очередь это выбросы тепловых электростанций (ТЭС), в металлургии и автомобильном транспорте. Особенностью этих выбросов является их длительность воздействия на окружающую среду. В настоящее время на их долю приходится 3/4 от суммарных промышленных выбросов.

Основными вредными веществами, образующимися при сжигании ТЭС твердого, жидкого и газообразного топлива, являются: оксиды серы (SO_2 и SO_3), оксиды азота (NO и NO_3), оксид углерода (CO), соединения ванадия (в основном, пентаксид ванадия V_2O_5).

Таблица 1.8.5

Скорость ветра по прогно- зу, м/с	Количество АХОВ, т									
	0,1	0,3	0,5	1,0	5,0	10	30	50	100	500
Инверсия										
1	<u>0,50/0,01</u> 1,3/0,14	<u>0,88/0,045</u> 2,4/0,5	<u>1,17/0,084</u> 3,2/0,9	<u>1,74/0,2</u> 4,8/2,1	<u>4,44/1,56</u> 12,5/13,6	<u>6,71/3,87</u> 19,17/31,8	<u>13,0/16,8</u> 20,0/42,8	<u>17,5/33,5</u> 20,0/42,7	<u>20,0/42,7</u> 20,0/42,7	<u>20,0/42,7</u> 20,0/42,7
2	<u>0,35/0,005</u> 0,916/0,07	<u>0,61/0,017</u> 1,58/0,21	<u>0,79/0,03</u> 2,06/0,35	<u>1,12/0,66</u> 3,02/0,75	<u>2,6/0,44</u> 7,53/4,69	<u>3,9/1,05</u> 11,3/10,5	<u>7,5/4,3</u> 21,7/39,0	<u>10,1/8,3</u> 29,6/72,5	<u>15,3/20,8</u> 40,0/171,0	<u>40,0/171,0</u> 40,0/171,0
3	<u>0,28/0,003</u> 0,76/0,046	<u>0,50/0,01</u> 1,32/0,14	<u>0,65/0,018</u> 1,70/0,23	<u>0,92/0,04</u> 2,41/0,46	<u>2,05/0,22</u> 5,75/2,64	<u>2,98/0,51</u> 8,53/5,80	<u>5,52/2,0</u> 16,1/20,8	<u>7,4/3,8</u> 21,8/38,1	<u>11,1/9,4</u> 33,0/87,3	<u>29,2/78,068</u> 64,0/437,9
4	<u>0,25/0,002</u> 0,67/0,035	<u>0,43/0,01</u> 1,16/0,10	<u>0,56/0,012</u> 1,5/0,17	<u>0,79/0,026</u> 2,12/0,35	<u>1,77/0,15</u> 4,84/1,81	<u>2,51/0,33</u> 7,10/3,90	<u>4,5/1,2</u> 13,2/13,6	<u>6,0/2,3</u> 17,8/24,6	<u>9,0/5,56</u> 26,8/55,7	<u>23,1/44,4</u> 70,7/540,3
Конвекция										
1	<u>0,14/0,002</u> 0,36/0,03	<u>0,25/0,007</u> 0,62/0,1	<u>0,32/0,01</u> 0,80/0,16	<u>0,45/0,038</u> 1,16/0,34	<u>1,04/0,17</u> 2,85/2,05	<u>1,55/0,41</u> 4,26/4,57	<u>2,91/1,67</u> 8,15/16,7	<u>3,39/3,23</u> 11,0/30,8	<u>5,9/8,0</u> 16,86/71,4	<u>15,7/68,5</u> 28,0/243,1
2	<u>0,101/0,01</u> 0,26/0,02	<u>0,17/0,003</u> 0,45/0,05	<u>0,22/0,005</u> 0,58/0,08	<u>0,32/0,01</u> 0,82/0,16	<u>0,71/0,07</u> 1,84/0,81	<u>1,01/0,14</u> 2,69/1,74	<u>1,78/0,49</u> 4,97/5,93	<u>2,37/0,92</u> 6,7/10,7	<u>3,51/2,2</u> 10,0/23,9	<u>8,9/17,3</u> 26,1/171,3
3	<u>0,086/0,0</u> 0,212/0,01	<u>0,14/0,002</u> 0,37/0,03	<u>0,18/0,003</u> 0,48/0,05	<u>0,26/0,006</u> 0,68/0,10	<u>0,58/0,04</u> 1,53/0,54	<u>0,82/0,08</u> 2,17/1,09	<u>1,43/0,28</u> 3,86/3,45	<u>1,8/0,5</u> 5,12/6,08	<u>2,6/1,1</u> 7,57/13,2	<u>6,61/8,1</u> 19,3/86,3
4	<u>0,71/0,00</u> 0,1/0,00	<u>0,12/0,001</u> 0,33/0,02	<u>0,16/0,002</u> 0,42/0,04	<u>0,223/0,00</u> 0,6/0,08	<u>0,50/0,03</u> 1,35/0,40	<u>0,71/0,06</u> 1,9/0,81	<u>1,24/0,19</u> 3,30/2,45	<u>1,6/0,34</u> 4,3/4,2	<u>2,2/0,76</u> 6,3/9,0	<u>5,3/4,8</u> 15,8/56,1

Скорость ветра по прогнозу, м/с	Количество АХОВ, т									
	0,1	0,3	0,5	1,0	5,0	10	30	50	100	500
<i>Изотермия</i>										
1	0,24/0,00 0,60/0,04	0,41/0,01 1,06/0,12	0,53/0,018 1,40/0,217	0,76/0,04 2,06/0,47	1,89/0,29 5,3/3,00	2,81/0,70 7,87/6,82	5,37/2,91 15,3/25,6	7,29/5,70 20,8/52,88	11,1/14,3 24,0/78,34	24,0/78,3 24,0/78,3
3	0,14/0,00 0,36/0,01	0,24/0,002 0,63/0,04	0,31/0,004 0,81/0,07	0,43/0,01 1,15/0,13	0,98/0,05 2,59/0,67	1,38/0,11 3,74/1,42	2,42/0,40 6,89/4,81	3,22/0,75 9,22/8,65	4,77/1,79 13,8/19,3	12,1/13,9 35,9/95,5
5	0,10/0,00 0,29/0,01	0,18/0,001 0,50/0,024	0,24/0,002 0,65/0,04	0,34/0,005 0,91/0,08	0,76/0,03 2,02/0,40	1,07/0,06 2,90/0,81	1,86/0,20 5,08/2,46	2,40/0,36 6,71/4,32	3,40/0,77 9,86/9,3	8,3/5,5 24,9/59,5
7	0,09/0,00 0,25/0,00	0,15/0,001 0,45/0,017	0,20/0,001 0,56/0,029	0,28/0,003 0,79/0,058	0,64/0,02 1,77/0,29	0,90/0,04 2,50/0,58	1,57/0,13 4,34/1,74	2,03/0,23 5,60/2,90	2,87/0,50 8,08/6,0	6,5/3,08 19,8/36,45
9	0,08/0,00 0,22/0,00	0,14/0,001 0,39/0,013	0,17/0,001 0,50/0,02	0,25/0,002 0,71/0,045	0,56/0,01 1,59/0,22	0,80/0,03 2,24/0,45	1,38/0,09 3,89/1,35	1,79/0,16 5,02/2,25	2,56/0,36 7,11/4,5	5,6/2,12 17,0/25,8
11	0,07/0,00 0,20/0,00	0,12/0,001 0,35/0,01	0,16/0,001 0,46/0,02	0,22/0,002 0,65/0,037	0,51/0,01 1,45/0,18	0,72/0,02 2,06/0,37	1,25/0,07 3,57/1,10	1,62/0,12 4,61/1,84	2,29/0,27 6,52/3,69	5,1/1,36 15,1/19,85
13	0,06/0,00 0,19/0,00	0,11/0,00 0,33/0,001	0,15/0,001 0,43/0,016	0,21/0,001 0,60/0,031	0,47/0,01 1,35/0,15	0,66/0,02 1,91/0,31	1,15/0,05 3,32/0,93	1,49/0,10 4,29/1,56	2,11/0,22 6,07/3,13	4,7/1,31 13,7/16,0
15	0,06/0,00 0,1/0,002	0,1/0,00 0,3/0,01	0,14/0,001 0,040/0,01	0,19/0,001 0,57/0,027	0,43/0,007 1,27/0,13	0,62/0,01 1,80/0,27	1,07/0,04 3,13/0,81	1,38/0,08 4,03/1,35	1,96/0,18 5,71/2,7	4,3/1,09 12,7/13,5

Примечание. В приведенной таблице указываются: глубина (в верхней строке), км, и площадь зоны загрязнения (в нижней строке), км², при аварийном выбросе (выливе) хлора (свободный разлив) в заданном количестве тонн: в числителе — от первичного облака, в знаменателе — от вторичного облака.

Таблица 1.8.6

Скорость ветра, м/с	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Скорость переноса, км/ч	<i>Инверсия</i>														
	5	10	16	21											
	<i>Изотермия</i>														
	6	12	18	24	29	35	41	47	53	59	65	71	76	82	88
	<i>Конвекция</i>														
	7	14	21	28											

Таблица 1.8.7

V , м/с	$\leq 0,5$	$0,6 - 1$	$1,1 - 2$	≥ 2
φ , град.	360	180	90	45

Для оценки концентрации от такого рода выбросов разработана соответствующая методика*, позволяющая оценивать максимальное значение приземной концентрации вредного вещества C_m [мг/м³] на расстояния X_m [м] от источника. При выбросе горячей газовой смеси из одиночного источника с круглым устьем приземная концентрация определяется по следующей формуле, пригодной для расчета газообразных вредных веществ, выбрасываемых тепловыми электростанциями, при условии ровной или слабо пересеченной местности с перепадом высот, не превышающих 50 м на 1 км:

$$C_m = AMm/H^2 \cdot \sqrt[3]{V_1 \cdot \Delta T}, \quad (1.8.4)$$

где A – коэффициент, зависящий от температурной стратификации атмосферы; M – масса вредного вещества, выбрасываемого в атмосферу в единицу времени, г/с; m – коэффициент, учитывающий условия выхода газовой смеси из устья источника выброса; H – высота источника выброса над уровнем земли (для наземных источников при расчетах принимается $H = 2$ м), м; ΔT – разность между температурой, выбрасываемой газовой смеси T_c и температурой окружающего атмосферного воздуха T_b , °C; V_1 – расход газовой смеси, м³/с, ($V_1 = 0,25\pi D^2 w_0$), где D – диаметр устья источника выброса, м; w_0 – средняя скорость выхода газовой смеси из устья выброса, м/с.

Значения коэффициента A для разных регионов РФ лежат в диапазоне 250 – 140 в зависимости от климатических условий турбулентного обмена. Для Москвы и Московской области этот коэффициент равен 140.

Значения коэффициентов m рассчитываются следующим образом. Сначала находится параметр f по соотношению:

$$f = 1000 \frac{w_0^2 D}{H^2 \Delta T}. \quad (1.8.5)$$

Затем в зависимости от величины f определяется значение коэффициента m :

* Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных примесей, содержащихся в промышленных выбросах (ОНД-86).

если $f < 100$, то

$$m = \frac{1}{0,67 + 0,1\sqrt[3]{f} + 0,34\sqrt[3]{f}};$$

при $f \geq 100$

$$m = \frac{1,47}{\sqrt[3]{f}}.$$

Формула (8.4) позволяет определить максимально-разовую концентрацию загрязняющих веществ в атмосферном воздухе на уровне дыхания человека. Максимальная концентрация вредных веществ наблюдается на линии, являющейся проекцией дымового факела (шлейфа) на земную поверхность на расстоянии x_m от основания дымовой трубы. Расстояние x_m , при котором концентрация будет максимальна, определяется соотношением: $x_m = dH$, где коэффициент d вычисляется по формуле: $d = 7\sqrt{V_m}(1 + 0,28\sqrt[3]{f})$.

Примеры и задачи

1. На одной из водопроводных станций г. Москвы при перекачке АХОВ из цистерны в емкость для хранения произошла авария с разливом АХОВ на землю без поддона. Агрегатное состояние АХОВ – сжиженный газ, хранящийся при давлении.

С учебной целью предполагается, что ветер дует от ХОО, на котором произошла авария, в сторону НИЯУ МИФИ. ХОО на карте г. Москвы соединяются с НИЯУ МИФИ линией, которая будет осью следа облака, ориентированной по направлению ветра.

Необходимо определить:

а) масштаб зоны загрязнения хлором и нанести ее размеры на карту г. Москвы (условия аварии берутся из табл. 1.8.2, согласно полученному варианту);

б) время подхода облака с АХОВ к территории НИЯУ МИФИ.

Примечание. Для определения времени T подхода облака, загрязненного АХОВ к НИЯУ МИФИ, необходимо найти расстояние от объекта S [км], где произошла авария с выбросом АХОВ до НИЯУ МИФИ (расстояние определяется по

карте г. Москвы) и вычислить U – скорость перемещения переднего фронта облака с АХОВ по табл. 1.8.6, км/ч. Время определяется как

$$T = S/U.$$

Варианты условий аварии с выбросом АХОВ для прогноза зоны загрязнения даны в табл. 1.8.8, где ЗВС – Западная водопроводная станция; ВВС – Восточная водопроводная станция; РВС – Рублевская водопроводная станция.

Таблица 1.8.8

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ХОО	ЗВС	ВВС	РВС	ЗВС	ВВС	РВС	ЗВС	ВВС	РВС
Количество АХОВ, т	50	50	50	25	25	25	30	30	30
Процент разлива, %	30	30	30	20	20	20	50	50	50
Вид АХОВ	Хлор	Аммиак	Хлор	Аммиак	Хлор	Аммиак	Хлор	Аммиак	Хлор
Скорость ветра, м/с	1	3	4	1	3	4	1	3	4
Время суток	9.00	18.0	21.0	9.00	18.0	21.0	9.00	18.0	21.0
Температура воздуха, °С	20	–20	0	20	–20	20	0	–20	20
Облачность, балл	2	3	5	2	3	5	2	3	5

2. Условия выброса АХОВ аналогичны условиям задачи 1. Время поражающего действия АХОВ в очаге химического поражения определяется временем испарения АХОВ с поверхности разлива. Время испарения жидкости находится формулой (1.8.2). Для хлора можно воспользоваться табл. 1.8.9, где дано время испарения (в часах) сжиженного хлора в зависимости от скорости ветра для свободного разлива и разлива в поддон.

Продолжительность существования облака хлора принимается равной продолжительности испарения сжиженного хлора (в часах) с площади разлива при температуре выше –33 °С. Она зависит от скорости ветра и определяется по табл. 1.8.9.

Таблица 1.8.9

Скорость ветра по прогнозу, м/с	Характер разлива	
	свободный разлив, $h = 0,05$ м	разлив в поддон (обваловку), $h = 0,6$ м
1	1,5	18,0
2	1,13	13,5
3	0,9	10,8
4	0,75	9,0
5	0,65	7,7
8	0,45	5,4
10	0,375	4,5
12	0,33	4,0
15	0,27	3,25

3. Определить глубину зоны загрязнения АХОВ в случае аварии на ХОО в ночное время. На объекте находится в емкости под давлением 2000 м³ аммиака. Температура воздуха 20 °С. Облачность на начало аварии – 3 балла. Скорость ветра на момент аварии 2 м/с.

4. В результате аварии на объекте, расположенном на расстоянии 3 км от населенного пункта, произошло разрушение емкости с хлором. Метеоусловия: изотермия, скорость ветра 4 м/с. Определить время подхода загрязненного АХОВ воздуха к границе населенного пункта.

5. В результате аварии произошло разрушение обвалованной емкости с хлором. Требуется определить время поражающего действия АХОВ в пункте аварии. Метеоусловия на момент аварии: скорость ветра 4 м/с, температура воздуха 0 °С, конвекция. Высота обваловки емкости – 1 м.

6. Высота дымовой трубы промышленной котельной, расположенной на окраине г. Москвы, составляет 35 м. Диаметр устья трубы 1,4 м. Скорость выхода газозвоздушной смеси из устья трубы равна 7 м/с. Температура газозвоздушной смеси равна 125 °С. Выброс диоксида серы составляет 12 г/с. Температура окружающей среды в среднем 12 °С. Оценить максимальную концентрацию диоксида серы на уровне дыхания человека от земли и расстояние, на котором будет наблюдаться эта концентрация. Полученное значение максимальной концентрации сравнить с предельно допустимой концентрацией (табл. 1.8.10).

Таблица 1.8.10

Вещество	ПДК _{мр} , мг/м ³	ПДК _{сс} , мг/м ³	Класс опасности
Диоксид азота NO ₂	0,085	0,04	2
Оксид азота NO	0,6	0,06	3
Диоксид серы SO ₂	0,5	0,05	3
Пентаксид ванадия V ₂ O ₅	–	0,002	1
Сажа	0,15	0,05	3
Оксид углерода CO	5	3	4
Аммиак NH ₃	0,2	0,04	4
Сероводород H ₂ S	0,008	0,008	2

Примечание.

1. Максимально-разовая ПДК_{мр} – концентрация вещества, определяемая в пробах в течение 20 мин.

2. Среднесуточная ПДК_{сс} – средневзвешенная за 24 ч концентрация вещества, определяемая на уровне дыхания человека.

7. Высота дымовой трубы промышленной котельной, расположенной в Московской области, составляет 35 м. Диаметр устья трубы 1,4 м. Скорость выхода газозвушной смеси из устья трубы равна 10 м/с. Температура газозвушной смеси равна 125 °С. Выброс диоксида азота составляет 0,2 г/с. Температура окружающей среды в среднем 12 °С. Оценить максимальную концентрацию диоксида азота и расстояние, на котором будет наблюдаться эта концентрация. Полученное значение максимальной концентрации сравнить с предельно допустимой концентрацией.

8. На газодиффузионном заводе из-за халатности произошла утечка UF₆ из вентилей нагреваемого контейнера. При попадании фтористого урана во влажную среду произошла реакция окисления с образованием UO₂F₂. В атмосферу цеха из-за аварии поступило 50 мг UF₆. Оценить время пребывания персонала в помещении без системы вентиляции. Объем помещения 100 м³.

9. В грунтовых водах обнаружили вещество UO₂(NO₃)₂ в концентрации 30 мг/л. Дать заключение о возможности использовать эту воду как питьевую. Человек в среднем потребляет три литра питьевой воды в сутки. Допустимое годовое поступление урана в организм человека 500 мг.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

РАБОТА 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ВЕЛИЧИН, НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ РАСЧЕТА ЗАЩИТЫ ОТ ФОТОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Цель: освоение экспериментальных методов определения основных параметров, необходимых при расчете защиты от фотонного излучения и простейших методик таких расчетов.

ВВЕДЕНИЕ

Назначение защиты – ослабление излучения до приемлемых с точки зрения биологической, радиационной и тепловой защиты уровней. Ее расчет часто требует трудоемких вычислений и знания большого числа величин, многие из которых можно определить только экспериментально. В этой работе ознакомимся с некоторыми экспериментальными методами определения основных параметров для расчета защиты от фотонного излучения и простейшими методами такого расчета.

ЗАКОН ОСЛАБЛЕНИЯ ФОТОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ГЕОМЕТРИИ УЗКОГО ПУЧКА

Геометрией «узкого пучка» называются такие условия, при которых детектором регистрируются только фотоны, прошедшие через исследуемый материал без взаимодействия. В такой геометрии реализуется экспоненциальный закон ослабления:

$$\varphi(d) = \varphi_0 e^{-\mu d}, \quad (2.1.1)$$

где $\varphi(d)$, φ_0 – плотности потока фотонов до и после поглотителя; μ – линейный коэффициент ослабления.

Для реализации такой геометрии необходимо не допустить попадания рассеянных фотонов в детектор. Схема экспериментальной установки, обеспечивающая такие условия приведена на рис. 2.1.1.

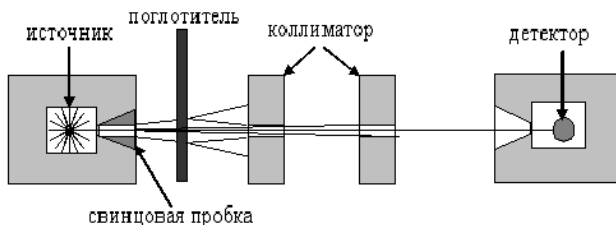


Рис. 2.1.1. Измерения в геометрии узкого пучка

Наличие свинцовых коллиматоров не позволяет рассеянными в поглотителе фотонам достичь детектора, т.е. они не регистрируются. Такая геометрия предназначена для измерения μ .

ЗАКОН ОСЛАБЛЕНИЯ ФОТОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ГЕОМЕТРИИ ШИРОКОГО ПУЧКА

В реальных условиях обычно имеют дело с геометрией «широкого пучка», в которой детектор регистрирует как рассеянные, так и нерассеянные фотоны.

Для учета рассеянного излучения вводят понятие фактора накопления B .

Пусть G_0 и G_p – функции, описывающие некоторые характеристики поля излучения (например, плотность потока, интенсивность, мощность дозы и т.п.) за слоем вещества, создаваемого нерассеянными и рассеянными фотонами. *Фактором накопления* называют величину

$$B_G^k = \frac{G_0 + G_p}{G_0} = 1 + \frac{G_p}{G_0} \geq 1.$$

Таким образом, фактор накопления показывает, во сколько раз данная характеристика поля для рассеянного и нерассеянного излучения больше, чем только для нерассеянного.

В зависимости от измеряемой характеристики поля излучения различают числовой, энергетический, дозовый и другие факторы

накопления соответственно ($k = \text{ч, э, д}$). Фактор накопления зависит от всех параметров и условий задачи: характеристик источника (геометрии, углового распределения и энергетического состава), характеристик защиты (геометрии и толщины защиты, атомного номера материала среды и др.), взаимного расположения источника, защиты и детектора и т.д.

Геометрия защиты подразделяется на бесконечную (рис. 2.1.2, а), полубесконечную (рис. 2.1.2, б, в), барьерную (рис. 2.1.2, г) и ограниченную (рис. 2.1.2, д).

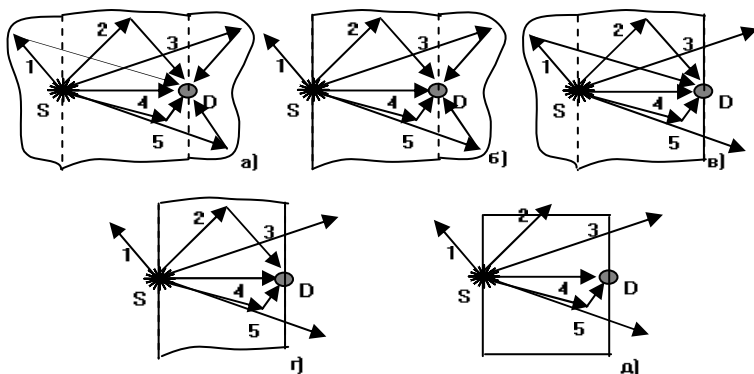


Рис. 2.1.2. Геометрия защиты и типичные траектории нерассеянных и рассеянных частиц

На практике бесконечной считается такая ограниченная среда, внутри которой находятся источник и детектор, добавление к которой любого количества вещества в любом месте не изменяет показания детектора.

Под ограниченной понимается среда, у которой хотя бы один из поперечных размеров (размер в плоскости перпендикулярной оси источник-детектор) не может быть принят бесконечным.

Изменения в геометрии защиты при фиксированных других параметрах влияют лишь на рассеянное излучение, так как вклад в показания детектора нерассеянных частиц зависит только от количества вещества на прямой источник-детектор. Наибольшее значение регистрируемой величины G , обусловленной рассеянными час-

тицами, будет иметь место в бесконечной геометрии, а наименьшее – в ограниченной, поэтому

$$B_G^\infty > B_G^{1/2\infty} > B_G^{\text{бар}} > B_G^{\text{огр}}.$$

Вклад рассеянных фотонов в характеристики поля излучения учитывают введением фактора накопления в закон ослабления в геометрии узкого пучка в качестве дополнительного множителя

$$\varphi(d) = \varphi_0 e^{-\mu d} B_q(d), \quad (2.1.2)$$

где φ_0 – плотность потока без защиты; B_q – числовой фактор накопления.

Чтобы рассчитать толщину защиты, определяют *кратность ослабления* k , т.е. величину, показывающую во сколько раз необходимо уменьшить значение мощности дозы (интенсивности, плотности потока и т.п.). Так, для плотности потока из формулы (2.1.2) получим

$$k = \varphi_0 / \varphi = e^{\mu d} / B(\mu d). \quad (2.1.3)$$

Однако найти отсюда искомую толщину защиты непросто, так как уравнение (2.1.3) – трансцендентное и не может быть решено в аналитическом виде. Поэтому чаще используют универсальные таблицы или номограммы. Входными параметрами этих таблиц являются энергия фотонов источника, заданная кратность ослабления и материал защиты. Величина k выбирается исходя из необходимости уменьшения значения дозы до допустимого уровня.

Оценить толщину защиты можно, если известен слой половинного ослабления для широкого пучка $\Delta_{1/2}$. Связь между кратностью ослабления и числом слоев половинного ослабления можно представить в виде

$$k(d) = 2^n = 2^{d/\Delta_{1/2}},$$

где $n = d/\Delta_{1/2}$ – число слоев половинного ослабления, обеспечивающее кратность ослабления k .

Тогда толщина защиты

$$d = n\Delta_{1/2}.$$

Полученное таким образом значение d является приближенным, так как величина слоя $\Delta_{1/2}$ в геометрии широкого пучка изменяется с толщиной защиты.

Для реализации условий, при которых детектор может регистрировать как рассеянное, так и нерассеянное излучение, используется та же установка, но с некоторыми переделками, которые отражены на рис. 2.1.3.

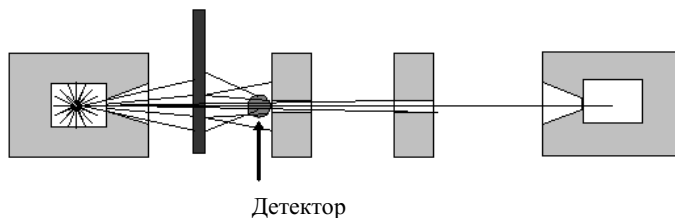


Рис. 2.1.3. Измерения в геометрии широкого пучка

Отличие от рис. 2.1.1 в том, что детектор размещается непосредственно за защитой, и удалена пробка-коллиматор контейнера источника. В этих условиях фотоны падают на значительно большую поверхность поглотителя, а детектор регистрирует как рассеянное, так и нерассеянное излучение.

РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Для узкого пучка фотонов необходимо выполнить ряд действий.

1. Записать тип источника и энергию фотонов, которые он испускает (^{60}Co , $E_\gamma = 1,25$ МэВ или ^{137}Cs , $E_\gamma = 0,662$ МэВ), а также вид исследуемого материала: железо или алюминий.

2. Провести измерение числа импульсов N_γ за 100 с в геометрии узкого пучка в отсутствии поглотителя ($d = 0$).

3. Поместить между источником и детектором поглотительную пластину из железа ($d = 0,6$ см) или две пластины из алюминия ($d = 2 \cdot 0,8 = 1,6$ см) и измерить число импульсов N_γ за 100 с (табл. 2.1.1). Добавляя по одной железной или по две алюминиевых пластины, продолжить измерения до тех пор, пока не будут использованы все пластины. Результаты измерений и последующих расчетов занести в табл. 2.1.2.

Для широкого пучка фотонов необходимо выполнить ряд действий.

1. Переместить счетчик из защитного кожуха на кронштейны перед первым коллиматором.
2. Извлечь свинцовую пробку-коллиматор из контейнера с источником.
3. Провести измерения аналогично п. 2 для узкого пучка.
4. Вернуть на место детектор и свинцовую пробку.

Таблица 2.1.1

Элемент	Атомный номер Z	Атомная масса A	Плотность ρ , г/см ³
Алюминий	13	27	2,7
Железо	26	56	7,86
Свинец	82	207	11,34

Таблица 2.1.2

d , см	Узкий пучок, $R_1 = 133$ см				Широкий пучок, $R_2 = 51$ см			
	N_y	k	$\ln(k)$	$N_{y2} = N_d(R_1/R_2)^2$	$N_{ш}$	k	$\ln(k)$	$B_y = N_{ш}/N_{y2}$
0								

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. По результатам измерений построить график зависимости кратности ослабления плотности потока энергии фотонов k от толщины поглотителя d в логарифмическом масштабе для узкого и широкого пучков.
2. По графику определить линейный коэффициент ослабления μ .
3. Рассчитать массовый коэффициент ослабления μ_m .
4. По графику определить слои половинного ослабления в геометриях узкого и широкого пучков.

5. Построить график зависимости фактора накопления от толщины защиты. За величину фактора накопления взять отношение скоростей счета в широком и узком пучках при одинаковой толщине поглотителя. Поскольку измерения ослабления в геометриях узкого и широкого пучков проводились на разном расстоянии от источника (R_1 и R_2 соответственно), необходимо пересчитать плотность потока частиц в геометрии узкого пучка для расстояния R_2 . Интенсивность обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника, поэтому скорость счета в узком пучке надо умножить на отношение квадратов расстояний между источником и детектором в узком и широком пучках (см. табл. 2.1.1).

6. Определить толщину защиты, ослабляющую плотность потока γ -квантов в k раз. Значение k указывает преподаватель.

7. Составить отчет, включив в него схему экспериментальной установки узкого и широкого пучков фотонов, блок-схему установки, результаты расчетов, графики и выводы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назвать и описать основные процессы взаимодействия фотонов с веществом в энергетическом диапазоне 0,03 – 10 МэВ.

2. Какая величина определяет вероятность того или иного вида взаимодействия?

3. Что такое линейный и массовый коэффициенты ослабления?

4. Раскрыть смысл понятий «узкий пучок» и «широкий пучок».

5. Что такое фактор накопления, какие разновидности его применяются на практике?

6. От каких параметров зависит фактор накопления?

7. Чем объяснить то, что числовой фактор накопления больше энергетического?

8. В какой из геометрий защиты фактор накопления имеет наибольшую величину и почему?

9. Как рассчитать толщину защиты из данного материала, если известен слой половинного ослабления?

10. Как определить толщину защиты при заданной кратности ослабления k ?

РАБОТА 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ АКТИВНОСТИ ИСТОЧНИКА ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Цель: определение активности источника β -излучения абсолютным методом, приобретение опыта работы с радиометрической аппаратурой.

ВВЕДЕНИЕ

Активностью источника (образца) называется число самопроизвольных ядерных превращений за единицу времени

$$A = -\frac{dN}{dt}. \quad (2.2.1)$$

Единица измерения активности – беккерель (Бк). 1 Бк – активность такого источника, в котором происходит одно ядерное превращение за секунду. Внесистемная единица активности Кюри (Ки), 1 Ки = $3,700 \cdot 10^{10}$ Бк.

Активность источника, как и число радиоактивных ядер, изменяется по закону радиоактивного распада

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\frac{0,693}{T_{1/2}} t}, \quad (2.2.2)$$

где A_0 – начальная активность источника.

Наиболее часто встречающиеся виды радиоактивных превращений ядер – α -, β -распад и деление ядра. В данной работе измеряется активность источника, в котором происходит β -распад.

Определение активности радионуклидных источников основано на регистрации испускаемых ими ионизирующих частиц с помощью различных детекторов (газоразрядных, сцинтилляционных, полупроводниковых и др.). Измерение осуществляется абсолютным методом. При таком методе измерения непосредственно определяют число самопроизвольных ядерных превращений в исследуемом источнике по числу испускаемых им β -частиц. В последнем случае необходимо знать схему распада радионуклида, т.е. вид и число частиц, приходящихся на одно ядерное превращение. Источник может содержать несколько радионуклидов, каждый из которых в результате ядерного распада испускает β -частицы разных

энергий, т.е. обладает собственным набором парциальных спектров. Подсчитав все частицы, испускаемые источником за секунду, можно определить и его активность.

Схема экспериментальной установки для измерения активности показана на рис. 2.2.1.

Однако на практике установить взаимно-однозначного соответствие между числом зарегистрированных частиц и активностью источника в силу ряда причин, рассматриваемых ниже, бывает не просто. Так, β -частицы испускаются источником изотропно и только часть из них вылетает в направлении счетчика. При этом на пути к счетчику некоторые из них могут рассеяться (изменить направление движения) или вовсе поглотиться в самом источнике, в фольге, закрывающей источник, в воздушном промежутке между источником и счетчиком и, наконец, в окне самого счетчика. Но и из достигших рабочей области счетчика частиц не все будут зарегистрированы. Дело в том, что после регистрации частицы в течение некоторого времени, называемым «мертвым» временем счетчика τ_m , он не в состоянии регистрировать другие частицы. «Мертвым» временем обладает также и счетная установка, но, как правило, значительно меньшим и им можно пренебречь. В то же время некоторые частицы, первоначально вылетевшие в сторону от счетчика, в результате отражения или рассеяния могут все же попасть в него. Определенное количество импульсов, не связанных с активностью источника, создают фоновое излучение и самопроизвольные разряды в счетчике.

Таким образом, чтобы определить активность источника по числу зарегистрированных импульсов, необходимо знать, какая доля испускаемых им частиц регистрируется установкой и какая доля зарегистрированных импульсов является ложной. Для этого необходимо учитывать следующие факторы:

- 1) «мертвое» время счетчика и счетной установки;
- 2) фон счетчика, включая самопроизвольные (ложные) импульсы;
- 3) эффективность счетчика;
- 4) воспроизводимость показаний;
- 5) значение телесного угла, под которым счетчик виден из препарата;

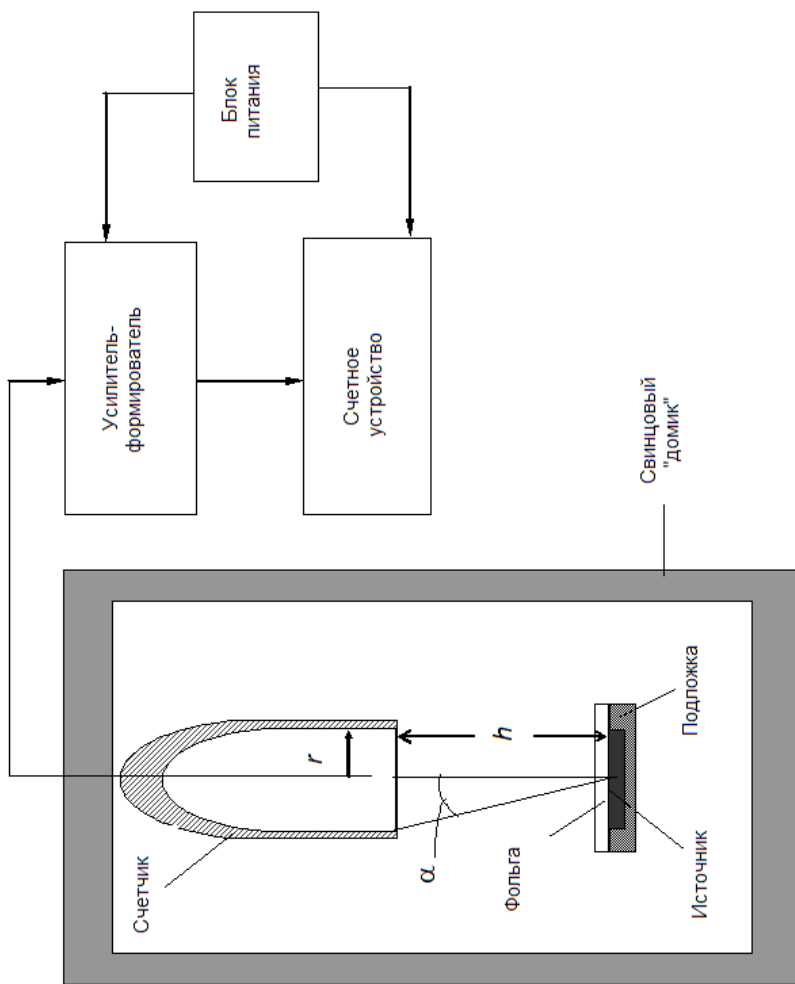


Рис. 2.2.1. Схема установки для измерения активности препарата

6) поглощение и рассеяние β -излучения по пути в чувствительный объем счетчика;

7) обратное рассеяние β -излучения от подложки препарата;

8) самопоглощение и саморассеяние β -излучения в препарате;

9) схему распада изотопа;

10) статистические и другие ошибки измерений.

С учетом этих факторов формулу для расчета активности можно записать в следующем виде:

$$A = \frac{np - n_{\phi} p_{\phi}}{K}, \quad (2.2.3)$$

где A – активность препарата Бк; n – скорость счета импульсов в присутствии препарата, с^{-1} ; n_{ϕ} – скорость счета импульсов, обусловленная фоном, с^{-1} ; p, p_{ϕ} – поправки на разрешающее время измерительной установки при измерении n и n_{ϕ} соответственно; K – полная эффективность измерительной установки, имп./расп. Эффективность установки зависит от геометрии измерений и параметров источника

$$K = \sum_i \sum_j (\omega a_i n f q s \varepsilon)_{ij} = \omega \sum_{i=1}^l a_i \sum_{j=1}^{m_i} (n f q s \varepsilon), \quad (2.2.4)$$

где l – число радионуклидов в источнике; m_i – число парциальных β -спектров у i -го нуклида, включая электроны конверсии, если они имеются; ω – поправка на телесный угол (геометрию измерений); a_i – относительная активность i -го нуклида в источнике; n_{ij} – поправка на схему распада, β -част./расп.; s_{ij} – поправка на самопоглощение и саморассеяние β -частиц в веществе источника; q_{ij} – поправка на обратное рассеяние β -частиц от подложки источника; f_{ij} – поправка на поглощение β -частиц на пути от источника до рабочего объема счетчика; ε_{ij} – поправка на эффективность регистрации β -частиц счетчиком, имп./ β -част.

Рассмотрим поправки, указанные выше, более подробно.

Поправка на разрешающее время измерительной установки p . В первом приближении поправку на разрешающее время измерительной установки можно найти из следующих соображений. Пусть n_0 – число частиц, попадающих в счетчик за единицу време-

ни, n из которых будут зарегистрированы. Общая длительность «мертвого» времени от зарегистрированных частиц равна $n\tau_m$. В течение этого времени в счетчик в среднем попадает $n_0n\tau_m$ частиц, которые не будут зарегистрированы. Сумма зарегистрированных и незарегистрированных за единицу времени частиц равна числу частиц, попадающих в счетчик за то же время, т.е. $n_0 = n + n_0n\tau_m$; отсюда поправка на разрешающее время

$$p = \frac{n_0}{n} = \frac{1}{1 - n\tau_m}. \quad (2.2.5)$$

Полная эффективность счета измерительной установки К включает в себя следующие поправки.

Поправка на геометрию измерения ω . Препарат испускает частицы во всех направлениях (в телесный угол 4π), но попасть в счетчик могут только вылетевшие в пределах телесного угла $\Delta\omega$, зависящего от геометрии измерений. Доля таких частиц

$$\omega = \frac{\Delta\omega}{4\pi}. \quad (2.2.6)$$

Для точечного препарата, расположенного на продолжении оси счетчика, поправка на телесный угол

$$\omega = 0,5(1 - \cos \alpha) = 0,5 \left(1 - \frac{h}{\sqrt{h^2 + r^2}} \right), \quad (2.2.7)$$

где h – расстояние от препарата до счетчика; r – радиус входного окна счетчика.

Если источник имеет форму диска, то поправки на геометрию ω при измерениях β -активности на торцовых счетчиках можно взять из табл. 2.2.1. Здесь h – расстояние от центра окна счетчика до центра мишени; r – радиус входного окна счетчика; R – радиус круглого препарата (мишени).

Таблица 2.2.1

h/r	R/r									
	0,0	0,25	0,50	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2	5
0,0	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,320	0,227	0,173	0,125	0,0200
0,1	0,450	0,449	0,445	0,428	0,419	0,286	0,213	0,161	0,118	0,0196
0,2	0,402	0,400	0,392	0,364	0,345	0,253	0,187	0,143	0,111	0,0192
0,4	0,314	0,312	0,300	0,264	0,240	0,197	0,159	0,127	0,0980	0,0184
0,5	0,276	0,273	0,262	0,230	0,206	0,175	0,145	0,117	0,0932	0,0180
0,6	0,246	0,242	0,229	0,190	0,181	0,158	0,133	0,109	0,0852	0,0186
0,8	0,188	0,185	0,176	0,155	0,143	0,127	0,112	0,0940	0,0751	0,0168
1,0	0,146	0,145	0,138	0,122	0,115	0,102	0,0870	0,0760	0,0661	0,0160
1,25	0,144	0,143	0,0985	0,0960	0,0874	0,0800	0,0635	0,0718	0,0511	0,0151
1,5	0,0810	0,0809	0,0778	0,0750	0,0700	0,0647	0,0584	0,0512	0,0434	0,0142
1,75	0,0645	0,0644	0,0627	0,0610	0,0568	0,0536	0,0492	0,0440	0,0375	0,0134
2,0	0,0527	0,0525	0,0511	0,0501	0,0466	0,0448	0,0424	0,0387	0,0330	0,0125
2,5	0,0354	0,0353	0,0348	0,0332	0,0326	0,0320	0,0302	0,0279	0,0256	0,0108
3,0	0,0256	0,0255	0,0250	0,0242	0,0240	0,0238	0,0230	0,0219	0,0200	0,0096
3,5	0,0197	0,0196	0,0190	0,0188	0,0186	0,0180	0,0174	0,0167	0,0160	0,0084
4,0	0,0150	0,0149	0,0146	0,0145	0,0143	0,0142	0,0140	0,0135	0,0128	0,0074
4,5	0,0120	0,0110	0,0118	0,0117	0,0115	0,0114	0,0112	0,0109	0,0106	0,0066
5,0	0,0097	0,0097	0,0097	0,0095	0,0095	0,0094	0,0092	0,0090	0,0087	0,0058
10	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0023	0,0023	0,0022	0,0022	0,0020

Поправка на поглощение β -частиц f . Чтобы достигнуть рабочего объема счетчика β -частицы должны пройти сквозь фольгу, закры-

вающую источник, слой воздуха между источником и счетчиком и слюдяную фольгу окна счетчика, в которых часть из них поглощается. Поправка на поглощение f и учитывает этот факт. Она может быть определена либо расчетом, либо, как в данной работе, экспериментально. Для этого между счетчиком и препаратом помещают поглотитель все большей и большей толщины, фиксируя изменение скорости счета n . Затем строят график зависимости логарифма скорости счета за вычетом фона от толщины поглотителя x , выраженной в миллиграммах на квадратный сантиметр (рис. 2.2.2). Далее влево от начала координат откладывают суммарную толщину слюдяного окна, слоя воздуха и фольги, закрывающей препарат, также выраженные в миллиграммах на квадратный сантиметр. Продолжив график до пересечения с новой осью ординат находят $\ln n_0$. Используя величины скорости счета без поглотителя N_0 и с поглотителем N , находим

$$f = \frac{n}{n_0}. \quad (2.2.8)$$

Данная методика нахождения поправки f предполагает, что ее значение для разных спектров (^{90}Sr , ^{90}Y) примерно одинаковые.

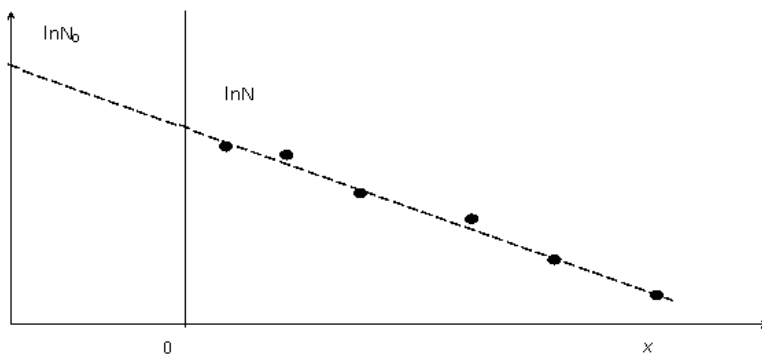


Рис. 2.2.2. Определение поправки f

Поправка на самопоглощение и саморассеяние s . Часть β -частиц, испускаемых источником, поглощается или рассеивается в самом препарате (рис. 2.2.3). При этом за счет поглощения скорость счета при измерении активности падает, а за счет рассеяния растет, так как в счетчик попадают β -частицы, первоначально двигавшиеся в

сторону от счетчика. Поправка на самопоглощение и саморассеяние зависит от толщины препарата и телесного угла, в котором регистрируются β -частицы. Для препаратов, толщина которых не больше $\Delta_{1/2}/80$, для легких веществ и $\Delta_{1/2}/200$ для тяжелых, эта поправка может быть принята за единицу.

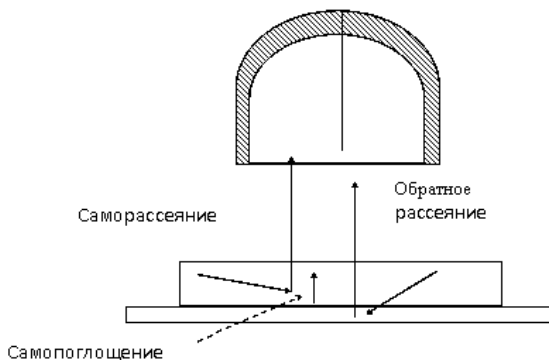


Рис. 2.2.3. Влияние саморассеяния, самопоглощения и обратного рассеяния на скорость счета

Поправка на обратное рассеяние q . Радиоактивное вещество при измерении его активности наносят на подложку. Часть β -частиц, вылетающих из препарата по направлению к подложке, рассеивается ею в обратном направлении и попадает в счетчик (рис. 2.2.3). Это увеличивает скорость счета. Поправка на обратное рассеяние зависит от энергии β -частиц, материала и толщины подложки, на которой расположен препарат. Для используемого в работе препарата значение q можно найти из табл. 2.2.2.

Таблица 2.2.2

E_β , МэВ	0,6	0,7	0,8	1,0	1,02	1,4	1,8	2,5
q	1,18	1,20	1,21	1,23	1,25	1,27	1,28	1,3

Поправка на схему распада n . Поправка n определяется как число частиц, принадлежащих j -му парциальному спектру, который испускается при распаде i -го нуклида (β -част./расп.). Для простого β -распада (рис. 2.2.4, а, б) $n = 1$. Для сложного β -спектра (рис. 2.2.4, в) n отличается от единицы. Так, для радионуклида ^{137}Cs

поправки на распад будут $n_1 = 0,92$ и $n_2 = 0,08$ (парциальные спектры с максимальными энергиями $E_1 = 0,51$ МэВ и $E_2 = 1,17$ МэВ).

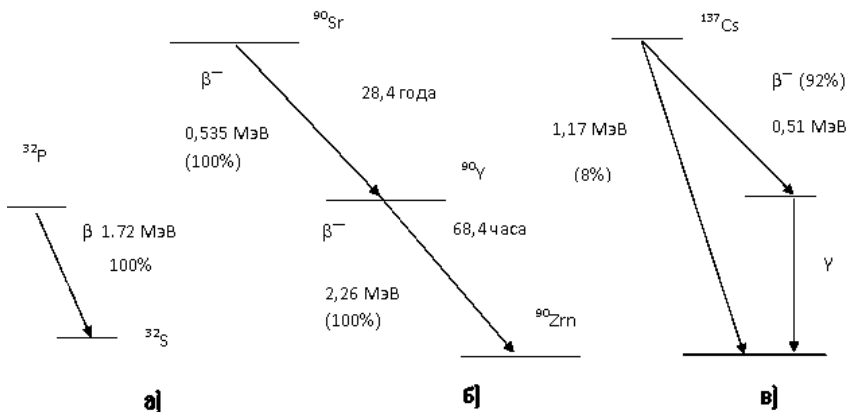


Рис. 2.2.4. Схемы радиоактивного распада:
а – простая; б, в – сложные

При учете поправки на схему распада надо иметь в виду конверсионные электроны, возникающие при переходе возбужденного ядра в нормальное состояние (вырывание электронов из оболочек атома). Если число конверсионных электронов велико, то они внесут искажения в результаты измерений. Поэтому их необходимо учитывать. Данные, необходимые для определения поправки n (ветви β -распада, а также конверсионные линии, если они имеются), используют из схем распада исследуемых радионуклидов.

Воспроизводство показаний счетчика. При большом числе измерений, т.е. длительной работе, показания счетчика в разное время отличаются друг от друга из-за изменения эффективности, вызванного сдвигом плато счетчика, изменения напряжения питания счетчика или положения и величины чувствительного объема, что может сказаться на точности измерений. Чтобы этого не случилось, необходимо проверить воспроизводимость показаний счетчика. Такую проверку лучше всего сделать с помощью образцового очень медленно распадающегося источника. Соотношение между скоростью счета и числом вылетающих β -частиц должно быть постоянным в пределах заданной точности измерения активности. В

данной работе поправка на воспроизводимость показаний счетчика не учитывается.

Статистические ошибки измерения. Счетчик за одинаковые промежутки времени сосчитывает различное количество β -частиц, так как из препарата они вылетают неравномерно (флуктуации распада, углового распределения и другие случайные процессы). Если число зарегистрированных счетчиком β -частиц за какой-то промежуток времени равно N , то $\sqrt{N}$ дает квадратичную ошибку измерения. Относительная квадратичная ошибка

$$\Delta = 100 \frac{\sqrt{N}}{N} = \frac{100}{\sqrt{N}} [\%]. \quad (2.2.9)$$

Из формулы видно, что чем больше число импульсов, тем меньше относительная флуктуация в счете.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИБОРЫ И МАТЕРИАЛЫ

Лабораторная установка, на которой выполняется работа, соответствует схеме рис. 2.2.1; в ней используются следующие устройства и материалы.

1. Источник β -частиц представляет собой стронций-иттриевый препарат ($^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$), нанесенный в виде активного пятна диаметром 11,3 мм (площадь 1 см^2) и толщиной $4 \cdot 10^{-2} \text{ мг/см}^2$ на алюминиевую подложку толщиной 1 мм. Сверху препарат закрыт алюминиевой фольгой толщиной 30 мг/см^2 . Периоды полураспада: ^{90}Sr – 28,4 года; ^{90}Y – 64,8 ч. Граничные энергии β -спектров ^{90}Sr – 0,535 МэВ; ^{90}Y – 2,26 МэВ.

2. Свинцовый «домик», служащий для снижения фона.

3. Торцовый газоразрядный счетчик СБТ-7. Диаметр входного окна равен 16 мм, толщина слюдяной мембраны в нем – 3 мг/см^2 , $\tau_m = 100 \text{ мкс}$.

4. Набор алюминиевых пластин толщиной 0,2 мм для экспериментального определения поправки f .

РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

К практическому выполнению работы можно приступить после изучения вышеизложенного материала и собеседования по нему с руководителем работ.

1. Не помещая источник в «домик», закрыть его и измерить скорость счета фоновых импульсов; произвести три измерения продолжительностью счета по 100 с.

2. Поместить источник в «домик» на расстоянии h , указанном руководителем, провести трехкратное измерение скорости счета при длительности измерения 100 с. Данные свести в табл. 2.2.3.

Таблица 2.2.3

№ измерения	N_{ϕ} (фон)	N (β -частиц)
	$t = 100$ с	$t = 100$ с
1		
2		
3		
Среднее значение	$\overline{N}_{\phi} =$	$\overline{N} =$

3. Провести измерения зависимости скорости счета от толщины алюминиевой фольги на пути потока β -частиц. Увеличивая количество алюминиевых пластин, каждый раз измерять количество отсчетов за 100с.

Эксперимент вести до суммарной толщины пластин 2,4 мм.

Данные эксперимента свести в табл. 2.2.4.

Таблица 2.2.4

Толщина поглотителя, мм	0,2	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0	2,4
N (за 100 с)							
$n, \text{с}^{-1}$							

ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

1. По данным табл. 2.2.4 определить поправочный коэффициент f .

2. По формуле (2.2.7) рассчитать поправочный коэффициент ω . Определить поправку ω с помощью табл. 2.2.1. Сравнить полученные значения. Для расчетов использовать табличное значение ω .

3. Определить остальные поправочные коэффициенты для β -частиц стронция и иттрия, исходя из приведенной выше схемы распада (поправка $a_1 = a_2 = 0,5$).

4. По формуле (2.2.4) рассчитать эффективность счета установки K .

5. По формуле (2.2.5) с учетом данных табл. 2.2.4 рассчитать поправку p .

6. По формуле (2.2.3) рассчитать активность источника β -частиц.

7. Рассчитать плотность потока β -частиц от препарата на R по формуле:

$$\Phi = \frac{0,5 A}{4 \pi R^2} e^{-\mu_{sr} R} + \frac{0,5 A}{4 \pi R^2} e^{-\mu_y R} \quad [\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}], \quad (2.2.10)$$

где $\mu_{sr} = 6,5 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$, $\mu_y = 5,3 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ – линейные коэффициенты ослабления потока β -частиц в воздухе (справочные данные). Расстояние R выбрать, учитывая особенности действия β -частиц при внешнем облучении.

8. Рассчитать эквивалентную дозу H , создаваемую источником за годовой период рабочего времени на расстоянии R согласно формуле

$$H = 0,5 \Phi (\overline{P_{sr}} + \overline{P_y}) \cdot 1,6 \cdot 10^{-13} t \cdot 3600 \cdot K \cdot 1000 \quad [\text{мЗв}]. \quad (2.2.11)$$

Здесь $\overline{P_{sr}} = 3,7 \cdot 10^3 \text{ МэВ} \times \text{см}^2 / \text{кг}$, $\overline{P_y} = 2,3 \cdot 10^3 \text{ МэВ} \times \text{см}^2 / \text{кг}$ – усредненные по спектру β -частиц потери энергии в биологической ткани; $t = 1700 \text{ ч}$ – годовой фонд рабочего времени; $K = 1$ – коэффициент качества β -излучения; $1,6 \cdot 10^{-13}$ – переводной коэффициент ($1 \text{ МэВ} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$); 3600 – количество секунд в одном часе; 1000 – это $1 \text{ Зв} = 1000 \text{ мЗв}$.

9. Сравнить полученное значение H с предельно допустимой дозой.

10. Составить отчет по работе. В отчете привести:
схему измерительной установки;
исходные данные, необходимые для учета в процессе работы;
данные измерений (табл. 2.2.3 и 2.2.4);
вычислительные и графические процедуры обработки данных;
результаты и выводы по работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое активность радионуклидного источника ионизирующих излучений и в каких единицах она выражается?

2. В чем состоит абсолютный метод измерения активности источника?

3. Дать логическое объяснение формуле (2.2.3), по которой рассчитывается активность согласно абсолютному методу ее измерения.

4. Пояснить смысл поправочных коэффициентов, входящих в формулу (2.2.4).

5. Пояснить формулы (2.2.5) и (2.2.6).

6. Что такое эквивалентная доза ионизирующего излучения?

РАБОТА 3. ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ ДОЗЫ ФОТОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И МОЩНОСТИ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ДОЗЫ СМЕШАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

***Цель:** ознакомление с устройством ионизационной камеры и с методами градуировки, измерение мощности экспозиционной и эквивалентной дозы фотонного и нейтронного излучений.*

ВВЕДЕНИЕ

Контроль радиационной обстановки на предприятиях и в учреждениях, где ведутся работы с источниками ионизирующих излучений, проводится с помощью комплекса радиометрической и до-

симметрической аппаратуры. Для квалифицированной оценки получаемых результатов измерения необходимо знать основы устройства приборов, принцип их работы, методы градуировки, погрешности измерения и др.

Наиболее часто радиационная опасность при внешнем облучении определяется фотонным и нейтронным излучениями. При измерении фотонного излучения в настоящей работе используется внесистемная единица экспозиционной дозы – рентген (Р). Хотя данная единица устарела, однако она часто используется для характеристики радиационной обстановки. Кроме того, многие приборы, выпущенные ранее и до сих пор эксплуатируемые, градуированы по мощности экспозиционной дозы в рентгенах. Для перевода экспозиционной дозы в рентгенах в эквивалентную дозу в бэрах необходимо полученное значение экспозиционной дозы умножить на коэффициент 0,96: т. е. с погрешностью 5 % экспозиционная доза в рентгенах соответствует дозе в бэрах. Для перехода к системе СИ, т.е. к Зиверту (Зв), необходимо значение дозы в бэрах разделить на 100.

Работа делится на две части.

ПЕРВАЯ ЧАСТЬ

РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

1. Отградуировать ионизационную камеру (рентгенметр «Кактус»).
2. Определить погрешность измерения мощности эквивалентной дозы дозиметра ДКС-96 с датчиком БДКС-96.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с прибором «Кактус». Прибор «Кактус» представляет собой цилиндрическую ионизационную камеру объемом 5 л с алюминиевыми стенками толщиной 2 мм. Камера подсоединена к блоку измерителя ионизационного тока. На анод камеры подано высокое напряжение. Под воздействием фотонов высокой энергии (60 кэВ – 3 МэВ) в камере происходит ионизация воздуха вторичными электронами, возникает электрический ток, величина

которого пропорциональна мощности дозы в точке расположения камеры. Ток усиливается и измеряется с помощью стрелочного прибора.

Порядок включения:

1) установить тумблер «Сигнал» в положение «Выкл», переключатель «Поддиапазоны» – в положение «Установка нуля»;

2) включить тумблер «Сеть», должна загореться белая индикаторная лампа;

3) оставить прибор на прогрев в течение 5 мин;

4) после прогрева перевести переключатель «Поддиапазон» в положение « $\times 1$ », тумблер «Установка нуля – работа» перевести в положение «Работа»;

5) установить нуль прибора на этом диапазоне при помощи регулятора «Установка нуля» (следует убедиться, что в измерительном контейнере нет источника);

6) при наличии гамма-излучения стрелка прибора через 10-15 с займет фиксированное положение.

Примечание. При работе на поддиапазонах «1» и «10» допускается флуктуация стрелки прибора $\pm(1 \div 3)$ деления.

2. Произвести градуировку рентгенметра «Кактус». Источник γ -излучения устанавливается последовательно на нескольких расстояниях R от детектора γ -излучения. По известным параметрам источника: активности A [мКи], гамма-постоянной источника K_γ [Р·см²/мКи·ч] и расстоянии R [см], проводится расчет мощности дозы P по формуле

$$P = \frac{A \cdot K_\gamma \cdot 10^6}{R^2} \text{ [мкР/ч]}. \quad (2.3.1)$$

В работе используется источник со следующими характеристиками:

1) изотоп ^{60}Co ; период полураспада $T_{1/2} = 5,25$ года;

2) $A = 0,72$ мКи на 27.09.06;

3) гамма-постоянная $K_\gamma = 12,85 \frac{\text{Р} \cdot \text{см}^2}{\text{ч} \cdot \text{мКи}}$.

Полученные значения мощности дозы принимаются эталонными, а измеренные отклонения стрелки на шкале рентгенметра на этих же расстояниях R дают показание прибора (число делений). Расчетные значения P и показания N заносятся в табл. 2.3.1 для различных расстояний R . Далее получают цену деления шкалы стрелочного прибора рентгенметра, как P/N . В идеальном случае P/N должно быть постоянным, но всегда есть отклонения от средней величины P/N .

Таблица 2.3.1

Расстояние от источника до детектора R_i , см							
Показание прибора N_i (число делений)							
Расчетное значение мощности дозы P_i , мкР/ч							
Цена деления P_i/N_i , (мкР/ч)/дел.							
Средняя цена деления, (мкР/ч)/дел.							

Измерения провести в шести точках шкалы измерительного прибора, разместив эти точки равномерно по шкале. Шкала – «1». Для этого коллиматор, в котором помещен источник γ -излучения, вручную перемещается относительно детектора рентгенметра. Детектор находится в конце градуировочного стола в нулевой точке шкалы расстояний. По мере приближения γ -источника к детектору показания измерительного прибора увеличиваются. Рекомендуется провести измерения на максимальном удалении от детектора ($R = 195$ см), затем на минимальном ($R = 50$ см). Определить диапа-

зон отклонения стрелки прибора, а, затем провести измерения в оставшихся четырех точках, равномерно расположив их в этом диапазоне. Занести показания прибора в таблицу на каждой точке измерения и расстояние между источником и детектором по линейке на градуировочном столе (не рекомендуется приближать источник к детектору на расстояние менее 50 см.).

3. Ознакомиться с дозиметром ДКС-96 и подготовить его к работе. Дозиметр ДКС-96 представляет собой микропроцессорный прибор, позволяющий проводить широкий класс радиометрических и дозиметрических измерений с использованием сменных датчиков. Для измерения эквивалентной дозы и мощности эквивалентной дозы используется сцинтилляционный датчик БДКС-96.

Для включения дозиметра необходимо выполнить ряд действий.

1. Переключатель на боковой поверхности пульта поставить в положение, отмеченное красной точкой. После внутреннего тестирования прибор высветит на экране надпись о готовности измерения фонового тока (буква F в правом верхнем углу экрана). Данное измерение необходимо для компенсации темнового тока ФЭУ, используемого в датчике.

2. Повернуть диафрагму на датчике так, что бы надпись «КОМП» оказалась напротив красной точки. Нажать кнопку «Пуск» на боковой поверхности пульта: начнется режим компенсации, о чем свидетельствует работающий таймер в нижней части экрана. После окончания режима компенсации раздается звуковой сигнал и высвечивается значение «фоновой» мощности дозы.

3. Для перехода в режим измерения на чувствительном диапазоне (до 10000 мкЗв/ч) необходимо: повернуть диафрагму на датчике так, чтобы надпись μSV совпала с красной точкой, нажать кнопку «Режим» на передней поверхности, а затем кнопку «Пуск». Дозиметр начнет измерения. Информация о времени измерения, значении мощности эквивалентной дозы и ее погрешности выводятся на экран. Показания следует снимать во время подачи звукового сигнала об окончании измерения. Текущее измерение можно прервать, нажав кнопку «Пуск».

4. Определение погрешности измерения прибора ДКС-96. Разместить прибор ДКС-96 на измерительной скамье так, чтобы поток гамма-квантов был направлен в торец сцинтилляционного датчика прибора, зафиксировав при этом расстояние R_k (рекомендуемое

значение 100 см), на котором находится сцинтиллятор (эффективный центр детектора расположен на оси датчика на расстоянии 2 см от торца). Перемещая контейнер с источником на рекомендуемые расстояния (табл. 2.3.2), зафиксировать значения мощности эквивалентной дозы для этих расстояний (по три значения для каждого расстояния). Данные эксперимента и расчетов занести в табл. 2.3.2.

Таблица 2.3.2

$R_{ист, I} = R_{изм, I} - R_K$, см	95	80	60	40	30
Показания прибора ($H_{изм, i}$), мкЗв/ч					
$\bar{H}_{изм, i}$, мкЗв/ч					
$P_{рас, i}$, мкР/ч					
$H_{рас, i} = 9,6 \cdot 10^{-3} P_{рас, i}$ мкЗв/ч					
Ошибка измерений δ_i , %					
Средняя величина $\bar{\delta}$, %					

$$\delta = \left| \frac{H_{рас, i} - H_{изм, i}}{H_{рас, i}} \right| \cdot 100 \text{ [100 \%]}.$$

ВТОРАЯ ЧАСТЬ

РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

1. Измерить мощность эквивалентной дозы Pu - α - Be источника нейтронов.
2. По результатам измерений определить дозовый состав данного источника по мощности эквивалентной дозы.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Подготовка приборов и проведение измерений. Для выполнения работы используется тот же дозиметр – ДКС-96: для измерения мощности эквивалентной дозы фотонов с датчиком – БДКС-96, а для нейтронов – БДМН-96 с замедлителем.

В работе используется Pu - α - Be источник нейтронов. Нейтроны образуются при взаимодействии альфа-частиц, испускаемых при распаде ядра Pu , с ядрами Be . В реакции образуется ядро углерода, нейтрон. Нейтроны, образующиеся в реакции, в основном быстрые (энергия $0,1 \div 10$ МэВ). В реакции также образуются гамма-кванты с энергией около 4,5 МэВ. Так как источник при измерениях располагается в защитном парафиновом контейнере, то в нейтронном спектре появляются нейтроны меньших энергий вплоть до тепловых (0,025 эВ).

1. После размещения нейтронного источника в измерительном контейнере расположить датчик прибора на расстоянии 15 см от среза контейнера (отсчет вести от эффективного центра детектора).

2. Измерить значение мощности эквивалентной дозы трижды. Результаты занести в табл. 2.3.3.

3. Выключить пульт ДКС-96. Аккуратно отсоединить датчик БДКС-96 и подсоединить датчик БДМН-96 с замедлителем. Включить дозиметр. Через 5 мин прибор готов к работе.

4. Расположить датчик перед источником таким образом, чтобы расстояние от среза контейнера до центра сферы замедлителя равнялось 15 см.

5. Измерить мощность эквивалентной дозы нейтронного излучения. Измерения провести трижды: показания снимать, когда ре-

зультат погрешности, индуцируемый на экране, будет равен 6 %. Провести три измерения. Результаты занести в табл. 2.3.3.

6. Для оценки мощности эквивалентной дозы тепловых нейтронов поместить между срезом контейнера и датчиком кадмиевый экран* и повторить измерения согласно п. 5.

Таблица 2.3.3

$N_{\text{изм}}$	H_{γ} , мкЗв/ч	$H_{\text{н}}$, мкЗв/ч	$H_{\text{н, Cd}}$, мкЗв/ч
1			
2			
3			
$\bar{H}_i$			

2. Обработка результатов. Провести расчет мощности эквивалентной дозы по формуле:

$$H_{\Sigma} = \bar{H}_{\gamma} + \bar{H}_{\text{н}}.$$

Оценить мощность дозы тепловых нейтронов:

$$H_{\text{т.н}} = \bar{H}_{\text{н}} - \bar{H}_{\text{н, Cd}}.$$

Рассчитать вклад в суммарную мощность дозы каждой компоненты излучения (быстрых, тепловых нейтронов и фотонов):

$$\delta_i = (H_i / H_{\Sigma}) \cdot 100 \text{ [\%]}.$$

Провести анализ полученных результатов, сделать выводы и составить отчет.

* Кадмий имеет большое ($2,3 \cdot 10^3$ б) сечение захвата тепловых нейтронов, поэтому при толщине фильтра 1 мм кратность ослабления достигает 10^4 раз, т.е. за фильтром тепловых нейтронов практически нет.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дать определение понятию «эквивалентная доза».
2. Каково соотношение между единицей эквивалентной дозы (Зв) и единицей экспозиционной дозы (Р)? Для какого вида излучения его можно использовать?
3. Зачем нужно знать дозовый состав излучения по эквивалентной дозе?
4. Какие защитные материалы применяются для уменьшения мощности дозы нейтронов и гамма-излучения?

РАБОТА 4. ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ДОЗИМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

***Цель:** ознакомление с приборами и методами индивидуального дозиметрического контроля (ИДК), с методами градуировки индивидуальных дозиметров, определение дозы фотонного излучения по измеренной плотности почернения фотопленок.*

ВВЕДЕНИЕ

Мерой воздействия ионизирующего излучения на человека является эффективная эквивалентная доза, а при равномерном облучении – эквивалентная доза.

Единица эквивалентной дозы в СИ – *зиверт* (Зв). Зиверт равен эквивалентной дозе, при которой произведение поглощенной дозы в биологической ткани стандартного состава на взвешивающий коэффициент равно 1 Дж/кг.

Внесистемная единица измерения эквивалентной дозы – *бэр* (*биологический эквивалент рада*). Бэр равен эквивалентной дозе, при которой произведение поглощенной дозы в биологической ткани стандартного состава на взвешивающий коэффициент равно 100 эрг/г ($1 \text{ бэр} = 0,01 \text{ Зв}$).

До введения в практику понятия эквивалентной дозы для оценки степени воздействия гамма-излучения на человека использовали экспозиционную дозу.

Единица экспозиционной дозы в СИ – кулон на килограмм (Кл/кг). Кулон на килограмм равен экспозиционной дозе, при которой все электроны и позитроны, освобожденные фотонами в объеме воздуха массой 1 кг, производят ионы, несущие электрический заряд 1 Кл каждого знака.

Внесистемная единица экспозиционной дозы – *рентген* (Р). Рентген – единица экспозиционной дозы фотонного излучения, при прохождении которого через 0,001293 г (1 см³) воздуха в результате завершения всех ионизационных процессов в воздухе создаются ионы, несущие одну электростатическую единицу количества электричества каждого знака.

Использование экспозиционной дозы после 1 января 1990 г. не рекомендуется, тем не менее до сих пор, особенно в средствах массовой информации, часто приводится именно эта величина и ее же необходимо будет измерять и рассчитывать в этой работе.

Индивидуальный дозиметрический контроль необходим в тех случаях, когда невозможно или затруднительно определить индивидуальную дозу облучения с помощью стационарных или переносных приборов контроля за радиационной обстановкой, при аварийном облучении и для контроля соблюдения работающими с источником излучений правил и норм, регламентируемых нормативными документами («Основные санитарные правила», «Нормы радиационной безопасности»). Для этого применяют различные приборы, включенные в арсенал средств индивидуальной дозиметрии, работа которых основана на ионизационном, фотографическом, термолюминесцентном методах дозиметрии: КИД-2, ДК-02, ДЭС-04, ФРАМКАРД, ИФКУ-1, индикатор ионизирующих излучений ДРС-01 и др. Они различаются устройством, принципом работы, диапазонами измеряемых доз.

В первой части лабораторной работы предлагается определить значение дозы от источника известной активности с помощью индивидуальных дозиметров, расположенных на различном расстоянии от источника, и рассчитать цену деления шкалы на пульте дозиметра. Значения дозы рассчитываются по формуле:

$$X = \frac{A \cdot K_{\gamma} \cdot t}{R^2} [P], \quad (2.4.1)$$

где A – активность источника ^{60}Co , 5,0 мКи на 30.09.06; K_γ – гамма-постоянная радионуклида, $12,85 \frac{\text{Р} \times \text{см}^2}{\text{ч} \times \text{мКи}}$; R – расстояние от источника до дозиметра, см; t – время облучения, ч.

При расчете учесть распад источника за время от аттестации до настоящего момента. Период полураспада $T_{1/2} = 5,25$ года.

Во второй части работы необходимо измерить значения дозы по плотности почернения фотоплёнок.

РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

1. Ознакомиться с методикой измерения доз методом ИДК.
2. Ознакомиться с дозиметром КИД-2 и провести его поверку (соответствие показаний и расчетного значения дозы).
3. Ознакомиться с дозиметром ДК-0.2 и измерить дозу гамма-излучения. Определить ошибку измерения.
4. Ознакомиться с методикой измерения доз методом ИФК с применением прибора ИФКУ-1. Подготовить прибор к работе, произвести калибровку прибора, определить дозу, полученную рабочим дозиметром.

ПЕРВАЯ ЧАСТЬ. МЕТОД ИДК

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с конструкцией дозиметров КИД-2 и ДК-0,2 (см. приложение к работе).
2. Подготовить прибор КИД-2 (зарядно-измерительное устройство – ЗИУ) к работе:
 - а) поставить тумблер включения сетевого питания в положения «Сеть/Питание», при этом загорится индикаторная лампа, стрелка гальванометра отклонится в правую сторону и остановится на крайнем делении шкалы;
 - б) прогреть прибор в течение 5 мин;

в) снять заглушку с гнезда «Заряд» и навинтить ее на специальную колодку (развинчивая индивидуальный дозиметр, разделить его на две части; цилиндр с серой окраской (дозиметр, рассчитанный на измерение доз от 0,005 до 0,05 Р) вставить в гнездо «Заряд» и нажав на него до упора, но без чрезмерных усилий, удерживать в таком положении несколько секунд, в результате дозиметр получит заряд, на шкале прибора это никак не отображается);

г) поставить дозиметр в гнездо «Измерения» и держать его в таком положении (стрелка прибора должна установиться на нулевой отметке шкалы в пределах черного поля; если это условие не выполняется, вращая ручкой «Уст. шкалы», поставить стрелку на черное поле; в процессе измерения дозиметр разряжается и потому необходимо вновь произвести его зарядку; дозиметр готов к облучению; зарядить остальные дозиметры; поставить их на градуировочную панель).

3. Рассчитать по формуле (2.4.1) время облучения t дозиметров на градуировочной панели, исходя из условия, что дозиметр, расположенный ближе всего к источнику γ -излучения (на расстояние $R = 10$ см), должен получить наибольшую дозу, равную 0,05 Р (верхний предел измерения).

4. Взяв дозиметр ДК-02, посмотрите в него с торца со стороны держателя, направив дозиметр на источник света. Увидите шкалу в границах 0÷200 мР и нить на шкале. Запишите положение нити в единицах дозы. Если доза, полученная дозиметром в предыдущих сеансах облучения, превосходит 150 мР, то его необходимо зарядить на специальном пульте. Поставьте дозиметр на градуировочную панель на расстоянии $R = 11$ см.

5. Поместите градуировочную панель в сейф, держась за плексигласовую ручку на панели. Обратитесь к преподавателю с просьбой поставить источник γ -излучения для облучения дозиметров. Зафиксируйте время начало облучения. Перед окончанием облучения снова пригласите преподавателя для удаления источника на место его хранения.

6. Градуировочную панель перенести на стол. Вставляя поочередно дозиметры в гнездо «Измерение», определяйте отклонение стрелки по нижней шкале (0 – 0,05 Р), записывая расстояние, на которых находились дозиметры при облучении.

Будьте внимательны!

Не отпускайте дозиметр, пока не считаете показание!

Повторное измерение того же дозиметра невозможно!

7. Рассчитать дозу $X_{\text{расч}}$ для каждого расстояния по формуле (2.4.1).

8. Проверить соответствие показаний $X_{\text{изм}}$ дозиметров расчетным значениям. Определить ошибку измерений δ и ее среднее значение $\bar{\delta}$.

9. Дозу, полученную дозиметром ДК-02, находите, как разность между показаниями после и до облучения по шкале дозиметра. Рассчитайте дозу для ДК-02. Сравните ее с измеренной дозой и определите ошибку измерения дозы дозиметром ДК-02 (табл. 2.4.1).

10. Данные расчетов и измерений занести в табл. 2.4.1.

Таблица 2.4.1

КИД-2							ДК-02			
R , см	10	12	14	16	18	20	$X_{\text{изм}} = X_{\text{кон}} - X_{\text{нач}}$			
$X_{\text{изм}}$, Р							$X_{\text{расч}} (R = 11 \text{ см})$			
$X_{\text{расч}}$, Р							Ошибка, δ			
δ										
$\overline{\delta}$										

В таблице: $\delta = |X_{\text{изм}} - X_{\text{расч}}| / X_{\text{расч}}$.

ВТОРАЯ ЧАСТЬ. МЕТОД ИФКУ

1. Ознакомьтесь с прибором ИФКУ и подготовьте его к работе. Включить тумблер «Вкл.», должна загореться сигнальная лампа. Прогреть прибор в течение 5 мин.

2. Произвести калибровку прибора:

а) вынуть из кассеты № 15 пленку, облученную γ -квантами, получившую дозу 0,1 Р, и ввести ее в щель гнезда на пульте прибора до упора; переключатель диапазонов должен быть в положении «х1»;

б) вращая ручку «0,1», установить стрелку прибора на делении 0,1;

в) вынуть пленку кассеты № 15 и поместить в щель пленку № 6, получившую дозу 1 Р; вращая ручкой «1», установить стрелку на деление 1;

г) повторить действие а) и б) три раза, регулируя ручки «0,1» и «1» так, чтобы добиться четкого фиксирования границ 0,1 и 1.

3. Определить дозу, полученную пленкой рабочего дозиметра:

а) вынуть из кассеты № 14 пленку и вставить ее в щель;

б) записать показания стрелки прибора;

в) сравнить экспериментальную дозу с расчетной, получив ее по формуле (2.4.1). Здесь $A = 664 \text{ мКи}$, $K_\gamma = 3,24 \text{ Р} \cdot \text{см}^2 / (\text{ч} \cdot \text{мКи})$, $t = 1 \text{ ч}$, $R = 75 \text{ см}$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дать определение понятию «эквивалентная доза».

2. Каково соотношение между единицей эквивалентной дозы зиверт (Зв) и единицей экспозиционной дозы рентген (Р)? Для какого вида излучения его можно использовать?

3. Для чего нужен индивидуальный дозиметрический контроль?

4. Какие типы индивидуальных дозиметров по принципу работы знаете?

ДОЗИМЕТР КИД-2 **(краткое описание)**

Прибор КИД-2 предназначен для определения экспозиционной дозы γ -излучения в диапазоне от 0,005 до 1 Р с помощью индивидуальных дозиметров. Энергия γ -квантов должна быть от 150 кэВ до 2 МэВ. Индивидуальный дозиметр состоит из двух конденсаторных ионизационных камер, соединенных в общую конструкцию цилиндрической формы. Одна (большая) камера измеряет дозу от 0,005 до 0,05 Р. Другая (малая) – измеряет дозу от 0,01 до 1 Р. Принцип действия такого дозиметра основан на измерении остаточного заряда на ионизационной камере. Первоначальная камера заряжается до определенного значения на зарядно-измерительном устройстве (ЗИУ). При облучении γ -излучением из стенок камеры выбиваются электроны, которые, ионизируя воздух внутри камеры, уменьшают заряд на камере. Величина остаточного заряда, обратно пропорциональная полученной дозе, измеряется ЗИУ.

ДОЗИМЕТР ДК-02 **(краткое описание)**

Дозиметр ДК-02 предназначен для индивидуального контроля лиц, работающих с γ -излучением с энергией γ -квантов от 100 кэВ до 2 МэВ. Дозиметр состоит из ионизационной камеры, электрометра, связанного с камерой, и микроскопа, собранных в конструкцию цилиндрической формы. Принцип работы такой же, как в дозиметре КИД-2. Величина остаточного заряда измеряется по отклонению нити электрометра, фиксируемому по шкале, выраженной в единицах дозы, с использованием микроскопа (рис. П.2.4). Диапазон измерения от 10 до 200 мР. Зарядка ДК-02 проводится на зарядном блоке ЗД-3.

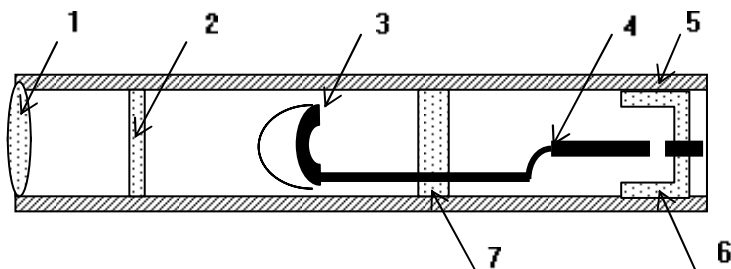


Рис. П.2.4. Устройство показывающего дозиметра:
 1 – оптическая система; 2 – шкала; 3 – электрометр; 4 – внутренний электрод;
 5 – внешний электрод; 6 – мембрана для зарядки; 7 – изолятор

ДОЗИМЕТР ИФКУ-1 (краткое описание)

ИФКУ-1 предназначен для измерения экспозиционных доз от γ -излучения и позволяет проводить индивидуальный дозиметрический контроль облучения людей, работающих с источниками γ -излучения. Диапазон регистрируемых доз от 0,05 до 2 Р разбит на две части: от 0,05 до 1 Р и от 0,1 до 2 Р при энергии γ -квантов от 0,1 до 2 МэВ. Фотографический метод дозиметрии основан на свойстве ионизирующих излучений воздействовать на фотопленку, аналогично видимому свету. В ИФКУ применяется специальная рентгеновская пленка. Методика ИФК основана на сравнении оптической плотности почернения облученных и обработанных (рабочих) пленок с образцовыми фотопленками, которые облучены известной дозой γ -излучения.

На измерительном пульте ИФКУ по оптической плотности фотопленки определяется величина экспозиционной дозы γ -излучения, полученная пленкой и, следовательно, человеком, носившим кассету с этой пленкой. Степень почернения облученной пленки после проявления пропорциональна полученной дозе. Фото пленки помещают в светонепроницаемые кассеты и раздают работающим с γ -излучением. Через некоторое время, определяемое службой радиационной безопасности, кассеты собираются, фотопленки обрабатываются. Работа измерительного пульта сводится к измерению тока, возникающего в фотоэлементе под воздействием света, проходящего через пленку определенной степени почернения.

РАБОТА 5. ИЗМЕРЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ РАДОНА РАДИОАКТИВНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ В ВОЗДУХЕ

Цель: освоение методики измерения концентрации радиоактивных веществ, содержащихся в воздухе, и приобретение навыков в работе с радиометрической аппаратурой.

ВВЕДЕНИЕ

Для достижения поставленной цели в работе предусматривается измерение концентрации естественных радиоактивных веществ в нормальном атмосферном воздухе.

Присутствие радиоактивных веществ в приземном атмосферном воздухе обусловлено, в основном, выделением из почвы горных пород и природных вод emanации радона (главным образом, ^{222}Rn и ^{220}Rn). Эти радионуклиды представляют собой инертный газ и, поступив в атмосферный воздух, остаются в свободном состоянии. Они являются началом цепочек радиоактивного распада, изображенных на рис. 2.5.1. Дочерние продукты распада радона обладают способностью присоединяться к аэрозолям, находящимся в атмосферном воздухе во взвешенном состоянии. Таким образом, естественные радиоактивные продукты присутствуют в воздухе в газообразном состоянии и в виде аэрозолей.

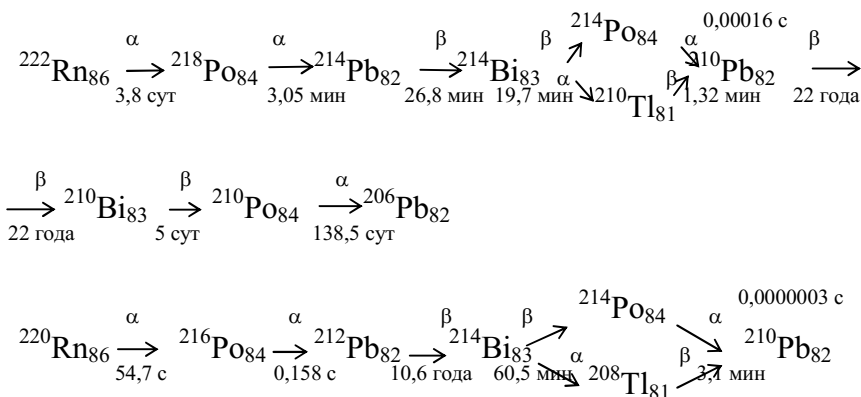


Рис. 2.5.1. Цепочки радиоактивного распада emanаций радона,
периоды полураспада радионуклидов

Концентрация материнских инертных радиоактивных газов в приземном воздухе зависит от состава подстилающих пород Земли, от состояния погоды и других факторов и в большинстве случаев колеблется в пределах от 2 до 20 Бк/м³ – для ²²²Rn и от 0,04 до 0,1 Бк/м³ – для ²²⁰Rn

Прямое измерение концентрации радиоактивных продуктов в воздухе проблематично, поскольку речь идет о регистрации редких актов испускания α - или β -частиц в процессе распада ядер, т.е. о регистрации нескольких таких событий в секунду в кубометре воздуха.

В данной работе используются оба способа измерений.

1. Измерение концентрации ²²²Rn прямым методом с помощью установки АЛЬФАРАД. В этой установке используется электростатический способ осаждения ионов продуктов распада ²²²Rn на поверхность полупроводникового детектора, работающего в спектрометрическом режиме. Прибор полностью автоматизирован и рассчитан на работу персонала невысокой квалификации.

2. Измерение концентрации радиоактивных аэрозолей путем предварительного концентрирования радиоактивных аэрозолей из большого объема воздуха на фильтре. Измерив активность A собранных на фильтре радиоактивных аэрозолей и зная объем воздуха V , из которого они собраны, объемную концентрацию (объемную активность – A_V) их в воздухе определяют по формуле:

$$A_V = \frac{A}{V \cdot \eta}, \quad (2.5.1)$$

где η – эффективность фильтра, т.е. доля аэрозолей, осаждаемых на фильтре при прохождении через него воздуха ($\eta = 0,9$).

Измерение активности собранных на фильтре аэрозолей осуществляется относительным методом. Суть его в следующем. Используется радиометрическая установка, детектор которой способен регистрировать α -частицы. С ее помощью регистрируется число импульсов N_0 в течение некоторого временного интервала τ от образцового радионуклидного препарата A_0 . Эффективность счета K установки рассчитывается по формуле:

$$K = \frac{N_0 - N_{\phi}}{A_0 \tau}, \quad (2.5.2)$$

где N_{ϕ} – фоновый счет установки за тот же временной интервал; A_0 – активность образцового источника.

Тогда активность A на фильтре рассчитывается по формуле:

$$A = \frac{N_a - N_{\phi}}{K\tau}, \quad (2.5.3)$$

где N_a – число импульсов от фильтра, зарегистрированных детектором за интервал τ . Эффективность фильтрации η , входящая в формулу (2.5.1), является заданной величиной, зависящей от материала фильтра.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ

Установка АЛЬФАРАД после включения и самотестирования готова к работе.

Для измерения концентрации радона в помещении нажать клавишу «Пуск»: включается помпа на 2 мин, а затем начнется измерение концентрации радона в течение 20 мин. По окончании измерения на жидкокристаллическом табло появится информация о концентрации ^{222}Rn . Обычно ее значение меньше 20 Бк/м^3 – нижнего предела измерений.

Подсоединить емкость, наполненную гранитной крошкой, с помощью гибких шлангов к входному и выходному патрубкам установки. Повторить измерение.

Результаты первого и второго измерения занести в рабочий журнал.

Для выполнения второй части работы используется оборудование, указанное на рис. 2.5.2.

Для приготовления аэрозольной пробы специальный фильтр зажимается в воздухоприемнике, и включается насос на определенное время θ , в работе рекомендуется 10 мин. Зная производительность насоса ($\dot{V}_0 = 1,5 \text{ л/с}$), легко определить объем воздуха ($V = \dot{V}_0 \theta$), прокачанного через фильтр. Так как радионуклиды, собранные в фильтре, являются сравнительно короткоживущими, то все последующие измерения с пробой должны быть строго регламентированы во времени, а результаты измерений – корректно обработаны. Затем фильтр помещается в детектор.

Принцип его работы сводится к следующему: в светонепроницаемом корпусе размещен детектор α -частиц – сцинтиллятор. Совместно с фотоэлектронным умножителем (ФЭУ) он регистрирует α -частицы, попадающие в него. Откликом на α -частицу является электрический импульс на выходе ФЭУ. Этот импульс подается на усилитель-формирователь который преобразует каждый импульс к стандартной форме, необходимой для регистрации счетчикам. Прибор счета импульсов имеет клавиши установки времени счета, в работе рекомендуется это время задавать равным 100 с.

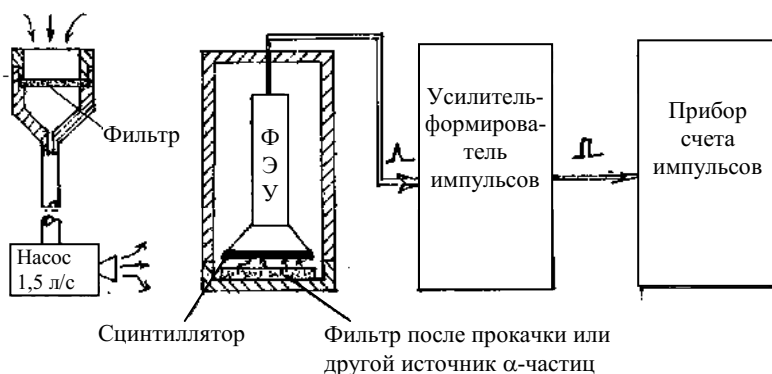


Рис. 2.5.2. Оборудование, используемое во второй части работы

Результаты измерительных операций целесообразно оформить в виде табл. 2.5.1, данные рекомендуется привести в системе СИ.

Для измерения фона необходимо, включив и настроив приборы установки, произвести трехкратную регистрацию скорости счета фоновых импульсов. Естественно, камера детектора в актах измерениях должна быть пустой.

Для измерения эффективности регистрации (счета) необходимо поместить в камеру детектора образцовый источник и повторить три раза измерение скорости счета.

Результаты измерения эффективности счета следует признать корректными, если они имеют разброс в пределах $\pm 10\%$ от

среднего значения, в противном случае эти измерения следует повторить.

Таблица 2.5.1

Продолжительность счета $\tau = 100$ с								
Измерение фона N_{Φ}	Измерение счета N_0		Измерение счета от аэрозольной пробы N_A при времени начала измерения после завершения прокачки t , мин					
			5	10	15	20	25	30
$N_{\Phi 1} = \dots$ $N_{\Phi 2} = \dots$ $N_{\Phi 3} = \dots$	$N_{01} = \dots$ $N_{02} = \dots$ $N_{03} = \dots$	Продолжительность прокачки воздуха $\theta = \dots$						
$\bar{N}_{\Phi} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 N_{\Phi i}$	$\bar{N}_0 = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 N_{0i}$	$V = \dot{V}_0 \theta$						

Для приготовления аэрозольной пробы необходимо получить у руководителя фильтр, поместить и закрепить его в воздухоприемнике. Для измерения временных интервалов следует использовать часы с секундным индикатором времени.

Включить насос и по истечении времени $\theta = 600$ с (10 мин) выключить его. Перенести фильтр в приемник детектора, не переворачивая фильтр и не касаясь его рабочей поверхности и, спустя время $t_1 = 5$ мин после момента окончания прокачки, провести первое измерение активности (период измерения должен быть от t_1 до $t_1 + \tau$, где $\tau = 100$ с). Затем повторить измерения активности в моменты $t_2, t_3 \dots$

Заполнить табл. 2.5.1, признаком корректности измерений может быть условие: $N_{a1} > N_{a2} > N_{a3}$.

Предъявить результаты измерений руководителю занятия.

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Если бы отбор аэрозолей из всего заданного объема V воздуха и измерения активности, полученной при этой пробе, можно было бы произвести одновременно и настолько быстро, что распадом

радионуклидов в аэрозольной пробе можно пренебречь, то вычисление активности пробы было бы тривиальным – по формуле (2.5.3), а искомая концентрация радиоактивных продуктов – по формуле (2.5.1). Однако в связи с сопоставимостью измерительных временных интервалов и периодов полураспада радиоактивных продуктов методика обработки становится существенно сложнее. Поясним ее суть.

Пусть объемная активность аэрозолей воздуха составляет A_V , а усредненная по составу радионуклидов постоянная распада равна $\lambda_{\text{ср}}$ (такое усреднение возможно, если постоянные распада нуклидов, входящих в состав смеси, близки по значению).

В период прокачки воздуха через фильтр активность аэрозольной пробы будет изменяться согласно выражению:

$$dA = A_V \eta \dot{V} dt - \lambda_{\text{ср}} A dt. \quad (2.5.4)$$

Что соответствует условию: элементарное увеличение активности dA за элементарный промежуток времени dt равно приросту активности за счет удержанных на фильтре аэрозолей за время dt ($A_V \eta \dot{V} dt$) за вычитанием убыли активности A уже накопившихся аэрозолей за счет их распада ($\lambda_{\text{ср}} A dt$).

Решением уравнения (2.5.4) с учетом начального условия $A(t=0) = 0$ является выражение:

$$A(t) = \frac{\eta \dot{V} A_V}{\lambda_{\text{ср}}} (1 - e^{-\lambda_{\text{ср}} t}); \quad (2.5.5)$$

таким образом, к концу прокачки $t = \theta$ воздуха через фильтр на нем будет накоплены радионуклиды общей активностью:

$$A(\theta) = \frac{\eta \dot{V} A_V}{\lambda_{\text{ср}}} (1 - e^{-\lambda_{\text{ср}} \theta}). \quad (2.5.6)$$

Начиная с этого момента, активность будет убывать во времени по закону радиоактивного распада:

$$A(\theta + t) = \frac{\eta \dot{V} A_V}{\lambda_{\text{ср}}} (1 - e^{-\lambda_{\text{ср}} \theta}) e^{-\lambda_{\text{ср}} t}. \quad (2.5.7)$$

Здесь t отсчитывается от момента завершения прокачки.

Число распавшихся ядер в пробе в промежутке времени от t_i до $t_i + \tau$ равно:

$$N_{\text{я}i} = \int_{t_i}^{t_i + \tau} \frac{\eta \dot{V} A_V}{\lambda_{\text{ср}}} (1 - e^{-\lambda_{\text{ср}} \theta}) e^{-\lambda_{\text{ср}} t} dt$$

или

$$N_{\text{я}i} = \eta \dot{V} A_V (1 - e^{-\lambda_{\text{ср}} \theta}) e^{-\lambda_{\text{ср}} t_i} (1 - e^{-\lambda_{\text{ср}} \tau}) \cdot \frac{1}{\lambda_{\text{ср}}^2}. \quad (2.5.8)$$

Фактически число зарегистрированных импульсов с учетом эффективности счета K составит:

$$N_{\text{а}i} = \eta \dot{V} A_V K (1 - e^{-\lambda_{\text{ср}} \theta}) e^{-\lambda_{\text{ср}} t_i} (1 - e^{-\lambda_{\text{ср}} \tau}) \cdot \frac{1}{\lambda_{\text{ср}}^2}. \quad (2.5.9)$$

Таким образом, последнее выражение позволяет вычислить объемную концентрацию (активность) радионуклидных аэрозолей в воздухе A_V по результатам i -го измерения:

$$A_V = \frac{\lambda_{\text{ср}}^2 N_{\text{а}i} e^{\lambda_{\text{ср}} t_i}}{\eta \dot{V} K (1 - e^{-\lambda_{\text{ср}} \theta}) (1 - e^{-\lambda_{\text{ср}} \tau})}. \quad (2.5.10)$$

В формуле (2.5.10) единственный неизвестный параметр $\lambda_{\text{ср}}$. Для расчета $\lambda_{\text{ср}}$ используются данные таблицы (зависимость числа отсчетов N_a от времени t) и метод наименьших квадратов (МНК). В качестве аппроксимирующей зависимости используется функция:

$$N_a(t) = N_{a0} e^{-\lambda_{\text{ср}} t}. \quad (2.5.11)$$

Сравнить полученное значение A_V с допустимым значением концентрации (объемной активности) дочерних продуктов эманации радона в воздухе для персонала категории А и категории Б.

В отчете по работе привести:

- 1) схему лабораторной установки, отразив на ней процедуру и этапы выполнения эксперимента;
- 2) результаты измерений;
- 3) методику обработки результатов – расчетные соотношения и комментарии к ним;
- 4) результаты обработки экспериментальных данных;
- 5) выводы по работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назвать и пояснить единицы концентрации радиоактивных продуктов (объемной активности).
2. Оценить усредненную атомную концентрацию радиоактивных продуктов в воздухе по результатам измерений.
3. Пояснить смысл всех сомножителей, входящих в формулу (2.5.9).
5. Дать определения периода полураспада и постоянной распада.

РАБОТА 6. ИЗМЕРЕНИЕ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ ПОВЕРХНОСТИ РАДИОАКТИВНЫМИ ВЕЩЕСТВАМИ

***Цель:** измерение и определение уровня радиоактивной загрязненности поверхностей, знакомство с приборами, приобретение навыков работы с ними.*

ВВЕДЕНИЕ

На предприятиях, где ведется работа с открытыми радиоактивными веществами, возможно загрязнение ими различных поверхностей (пола, стен, рабочих помещений, оборудования, мебели, а также одежды, обуви, рук и других открытых участков тела). Радиоактивные вещества могут оказаться и в воздухе, оседая из него на поверхности различных предметов и загрязняя их.

Загрязненные таким образом поверхности могут быть источниками внешнего и внутреннего облучения человека. При внешнем облучении радиоактивное излучение от загрязненных поверхностей воздействует на человека подобно действию радиоактивного излучения от закрытых источников. Внутреннее – обусловлено радиоактивными веществами, попавшими с загрязненных поверхностей через нос, рот, поры тела внутрь организма. Таким образом, загрязненность различных поверхностей радиоактивными веществами представляет опасность для здоровья человека при превышении уровней загрязненности поверхностей сверхдопустимого уровня. Поэтому необходимо контролировать уровень загрязненности различных поверхностей, на которые возможно осаждение

радиоактивных веществ. Наибольшую опасность от загрязненных поверхностей представляет внутреннее облучение, с учетом которого установлены допустимые уровни радиоактивной загрязненности поверхностей. При этом основную опасность представляют α - и β -излучатели. Для определения загрязненности γ -излучающими нуклидами используется значение мощности эквивалентной дозы на исследуемой поверхности.

Альфа-частицы – ядра гелия. Для наиболее распространенных нуклидов энергия испускаемых частиц лежит в диапазоне 3 – 7 МэВ. Пробег таких частиц в воздухе не превышает 6 см, а в твердом теле – 70 мкм.

Бета-частицы – электроны (позитроны), возникающие при превращении нейтрона в протон (β^- -распад) или протона в нейтрон (β^+ -распад). Так как при распаде из ядра вылетает еще одна частица – нейтрино, то энергия перераспределяется между ними, поэтому энергия вылетающих электронов лежит в интервале от нуля до энергии, равной разности энергетических уровней дочернего и материнского ядер. Для наиболее распространенных нуклидов максимальная энергия испускаемых частиц лежит в диапазоне от десятков килоэлектрон-вольт до 3 МэВ. Пробег таких частиц в воздухе достигает 10 м, а в твердом теле – 1 см.

Гамма-кванты – кванты электромагнитного излучения с энергиями больше 30 кэВ – характеризуются большой проникающей способностью. В связи с этим практически невозможно определить, где расположен загрязнитель: на поверхности или внутри исследуемого объекта. Кроме того, практически любой изотопный источник гамма-квантов является источником бета-частиц и, обычно, если загрязненность по бета-частицам находится в пределах допустимой, то и по гамма-квантам она также укладывается в норму.

В приложении приведены допустимые уровни загрязнения различных поверхностей.

При проведении радиационного контроля рассматривается два вида загрязненности поверхностей: снимаемое, при котором часть радиоактивного вещества может перейти на другую поверхность, и неснимаемое, которое при контакте не переходит с одной поверхности на другую. Снимаемая загрязненность является источником загрязнения воздуха, рук, одежды. Измерение радиоактивной за-

грязненности проводится с помощью приборов, которые относятся к классу радиометров.

Обычно радиометр выполняется в виде двух блоков: выносного, в котором находится детектор, чувствительный к α - или β -частицам, и основного, в котором размещены электронные узлы для усиления, формирования и регистрации импульсов, поступающих с выносного блока, а также различные органы управления работой радиометра (рис. 2.6.1).



Рис. 2.6.1. Блок-схема радиометра

В радиометре используются газоразрядные или сцинтилляционные детекторы, обладающие высоким уровнем чувствительности, достаточным для регистрации малых потоков α - и β -частиц, которые надо измерять в диапазоне ниже 0,1 допустимого уровня загрязненности. Кроме того, детекторы должны обладать свойством избирательности: детектор α -частиц не должен регистрировать β -частицы и, соответственно, детектор β -частиц не должен регистрировать α -частицы.

В настоящей работе используется сцинтилляционный детектор α -частиц с тонким (около 100 мкм) сцинтиллятором ZnS. При попадании в такой детектор α -частицы возникает световая вспышка, амплитуда которой пропорциональна поглощенной энергии, далее энергия вспышки преобразуется с помощью ФЭУ в электрический импульс и регистрируется пересчетным прибором. Такой сцинтиллятор практически не регистрирует β -частицы.

Для регистрации β -частиц используется газоразрядный счетчик, толщина стенки которого около 200 мкм. Через такую стенку α -частицы пройти не могут, т. е. детектор их не регистрирует.

Для измерения мощности эквивалентной дозы гамма-излучения используется дозиметр-радиометр ДРБП-03 с набором газоразрядных детекторов. Детектор гамма-излучения не регистрирует альфа- и бета-частицы.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ

Величина загрязненности поверхности радиоактивными веществами A_S определяется по формуле:

$$A_S = \frac{n_{\Sigma} - n_{\Phi}}{K \cdot S} \text{ [част./см}^2\text{·с]}, \quad (2.6.1)$$

где K – эффективность регистрации ядерных частиц, определяемая при градуировке прибора; n_{Σ} – суммарная скорость счета импульсов от загрязненной поверхности и фона, имп./с; n_{Φ} – скорость счета импульсов от фона, имп./с; S – площадь загрязненной поверхности. Если площадь загрязненной поверхности больше площади окна детектора, то она принимается равной площади окна детектора, при условии, что детектор расположен непосредственно на измеряемой поверхности. Градуировка радиометра проводится с помощью набора радиоактивных источников с известным выходом ядерных частиц – так называемых образцовых источников, излучающих α - или β -частицы. При градуировке детектора эффективность регистрации находится по формуле:

$$K = \frac{n_{\Sigma}^0 - n_{\Phi}}{A_0}; \quad (2.6.2)$$

где A_0 – выход α - или β -частиц контрольного источника в угол 2π , част./с; n_{Σ}^0 – суммарная скорость счета импульсов от контрольного источника и фона, имп./с.

Такой способ определения эффективности регистрации называется относительным. Основное его достоинство – простота: достаточно иметь один контрольный источник, чтобы проводить измерения. К недостаткам следует отнести требования близости (в идеале идентичности) характеристик контрольного источника и исследуемого образца (площадь поверхности, распределение активности по толщине слоя, нуклидный состав и т.д.).

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

1. Блок детектирования П-349-2 (для регистрации α -частиц).
2. Блок детектирования БДБ2-01 (для регистрации β -частиц).

3. Двухканальный измеритель скорости счета (ИСС) УИМ2-2Д.
4. Образцовые источники α -излучения ^{239}Pu и β -излучения $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$.
5. Дозиметр-радиометр ДРБП-03

РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

1. Ознакомиться с методикой измерения радиоактивной загрязненности поверхностей.
2. Определить эффективность регистрации α -частиц блоком детектирования П-349-2 и провести измерение загрязненности пластины радионуклидом ^{239}Pu .
3. Определить эффективность регистрации β -частиц блоком детектирования БДБД-01 и провести измерение радиоактивной загрязненности алюминиевой пластины $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$.
4. Определить мощность дозы гамма-излучения на исследуемой поверхности с помощью прибора ДРБП-03.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Подготовить приборы для выполнения рабочего задания. Для этого нужно выполнить ряд действий.

1.1. На приборе БЛБНВЗ-05, подающим высокое напряжение на блок детектирования П-349-2, перевести тумблер «Сеть» в верхнее положение.

ЗАПРЕЩАЕТСЯ вращать ручки регулировок напряжений во избежание выхода из строя детекторов!

1.2. Включить прибор УИМ2-2Д. ИСС начинает автоматически измерять скорость счета по двум каналам: канал А – α -излучение; канал В – β -излучение.

2. Измерить скорость счета фона по каждому из каналов. Для этого нажать кнопку «Пуск». Прибор начнет измерения: информация о скорости счета и ее погрешности по каналам отображается на мониторе. Чем больше время измерения, тем меньше погрешность. Когда значение погрешности по каналу «В» уменьшится до 20 % зафиксировать значение скоростей счета по обоим каналам и занести их в табл. 2.6.1 и 2.6.2.

3. Измерить скорость счета от контрольных источников и образцов.

3.1. Разместить источник α -излучения в блоке детектирования П-349-2: для этого следует нижнюю часть стойки выдвинуть на себя. При этом открывается углубление в форме диска, на который располагается образцовый источник вверх плоскостью с нанесенным слоем радиоактивного вещества. Нижняя часть стойки возвращается в прежнее положение, при котором источник находится перед входным окном детектора α -излучения.

3.2. Разместить источник β -излучения на блоке детектирования БДБ2-01 в пределах окружности нанесенной на поверхности блока радиоактивным слоем вниз. Необходимость размещения источника в пределах окружности объясняется неравномерностью чувствительности детектора по поверхности, что может привести к дополнительной погрешности.

Нажать кнопку «Пуск». Зафиксировать значения скоростей счета и погрешности по каналам, когда значение погрешности по каждому из них уменьшится до 5 %. Провести измерения со всеми предложенными образцами*. Результаты занести в табл. 2.6.1 и 2.6.2.

4. Провести пять измерений фоновой мощности эквивалентной дозы H_{ϕ} прибором ДРБП-03, а затем пять измерений мощности эквивалентной дозы на исследуемой поверхности H_{Σ} .

Таблица 2.6.1

n_{ϕ} , имп./с					
№ источника	1130	1131	1132	1133	Образец
$A, \frac{\alpha\text{-част.}}{с} \text{ (в } 2\pi)$	95	266	670	1817	
n_{Σ} , имп./с					
$n_{\Sigma} - n_{\phi}$, имп./с					
Эффективность счета K					
Средняя величина K					

* При измерении контрольных источников желательно сгруппировать их парами: 1 и 1130; 2 и 1131; 3 и 1132; 5 и 1133, что приведет к меньшим временным затратам.

Таблица 2.6.2

n_{ϕ} , имп./с					
№ источника	1	2	3	5	Образец 4
$A, \frac{\beta\text{-част.}}{с} \text{ (в } 2\pi \text{)}$	26,7	91	350	500	
n_{Σ} , имп./с					
$n_{\Sigma} - n_{\phi}$, имп./с					
Эффективность счета K					
Средняя величина K					

По окончании измерений показать результаты преподавателю.

Рассчитать эффективность регистрации α - и β -частиц от всех образцовых источников по формуле (2.6.2) и найти среднюю величину эффективности. Определить уровень загрязненности поверхности част./($\text{см}^2 \cdot \text{мин}$). При расчетах принять площадь поверхности загрязненных пластин равной 10 см^2 .

Рассчитать мощность эквивалентной дозы гамма-излучения на поверхности H_n по разности средних значений H_{Σ} и H_{ϕ} .

Сравнить полученные значения уровней загрязненности с предельно допустимыми, приведенными в приложении.

Приложение

В табл. П.2.6.1 приведены допустимые уровни радиоактивного загрязнения рабочих поверхностей, кожи, спецодежды и средств индивидуальной защиты в част./($\text{см}^2 \times \text{мин}$).

Таблица П.2.6.1

Объект загрязнения	Альфа-активные нуклиды*		Бета-активные нуклиды
	отдельные**	прочие	
Неповрежденная кожа, специальное белье, полотенца, внутренняя поверхность лицевых частей средств индивидуальной защиты	2	2	200***
Основная специальная одежда, внутренняя поверхность дополнительных средств индивидуальной защиты, наружная поверхность специальной обуви	5	20	2000
Поверхности помещений постоянного пребывания персонала и находящегося в них оборудования	5	20	2000
Поверхности помещений периодического пребывания персонала и находящегося в них оборудования	50	200	10000
Наружная поверхность дополнительных средств индивидуальной защиты, снимаемой в саншлюзах	50	200	10000

* Для поверхности рабочих помещений и оборудования, загрязненных альфа-активными радионуклидами, нормируется снимаемое (нефиксированное) загрязнение; для остальных поверхностей – суммарное (снимаемое и неснимаемое) загрязнение.

** К отдельным относятся альфа-активные нуклиды, среднегодовая допустимая объемная активность которых в воздухе рабочих помещений ДОО $< 0,3 \text{ Бк/м}^3$.

*** Установлены следующие значения допустимых уровней загрязнения кожи, специального белья и внутренней поверхности лицевых частей средств индивидуальной защиты для отдельных радионуклидов, например, для $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ – 40 част./($\text{см}^2 \times \text{мин}$).

Допустимые уровни радиоактивного загрязнения поверхности транспортных средств в част./($\text{см}^2 \times \text{мин}$) даны в табл. П.2.6.2.

Таблица П.2.6.2

Объект загрязнения	Вид загрязнения			
	Снимаемое (нефиксированное)		Неснимаемое (фиксированное)	
	альфа- активные радионук- лиды	бета- активные радионук- лиды	альфа- активные радионук- лиды	бета- активные радионук- лиды
Наружная поверхность охранной тары контейне- ра	Не допус- кается	Не допус- кается	Не регла- ментирует- ся	200
Наружная поверхность вагона-контейнера	Не допус- кается	Не допус- кается	Не регла- ментирует- ся	200
Внутренняя поверхность охранной тары контейне- ра	1,0	100	Не регла- ментирует- ся	2000
Наружная поверхность транспортного контейнера	1,0	100	Не регла- ментирует- ся	2000

РАБОТА 7. СПОСОБЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ

Цель: 1) оценивание опасности поражения человека электрическим током в аварийной ситуации – замыкании фазного провода на корпус 2-й установки, при отсутствии и наличии защитного заземления, а также в зависимости от сопротивления заземляющего устройства (R_{3M2}) и от сопротивления изоляции проводов относительно земли (R_E); 2) исследование функционирования защитного зануления без повторного заземления РЕ-проводника и с повторным заземлением.

ВВЕДЕНИЕ

В производственных и бытовых ситуациях опасность поражения человека электричеством возникает в результате прохождения через его тело электрического тока. Основным критерием степени этой опасности является величина тока I_n , которая, в свою очередь, зависит от электрического напряжения $U_{пр}$, приложенного к телу человека, называемого напряжением прикосновения, от электрического сопротивления R_q тела человека, имеющего преимущественно активный характер, и от ряда других второстепенных факторов.

Опасность поражения током возникает в аварийных ситуациях, в случаях несоблюдения правил эксплуатации электроустановок. Существенное значение при этом имеет схема электросети и схема подключения к ней электроустановок. Наибольшее распространение получили сети переменного (с частотой 50 Гц) тока:

двухпроводные (однофазные) изолированные от земли (рис. 2.7.1, а);

двухпроводные (однофазные) с заземленным проводом (рис. 2.7.1, б);

трехфазные трехпроводные с изолированной нейтралью (рис. 2.7.1, в);

трехфазные четырехпроводные с заземленной нейтралью (рис. 2.7.1, г).

Возможны различные ситуации непредвиденного включения тела человека в электрическую цепь. Чаще всего это случается в результате аварийного замыкания одного из проводов на корпус

электроустановки (рис. 2.7.1, б). Тогда между корпусом электроустановки и землей создается разность потенциалов (напряжение прикосновения), под которое может попасть человек.

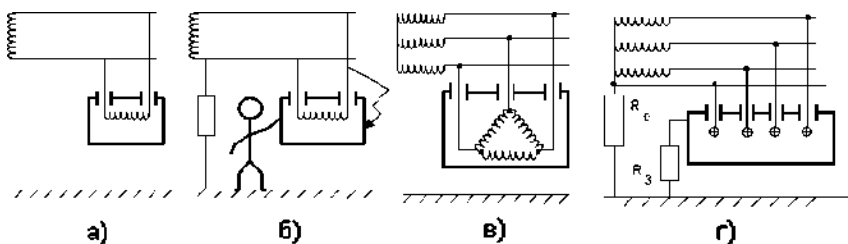


Рис. 2.7.1. Основные схемы электросети и подключения электроустановок

Наиболее распространенными способами обеспечения электробезопасности являются защитное заземление и защитное зануление.

Защитное заземление состоит в преднамеренном соединении с землей металлических нетоковедущих частей электроустановок, которые вследствие аварий или других причин могут оказаться в контакте с токоведущими частями электроустановок или с токоведущими проводами сети. Защитный эффект защитного заземления достигается снижением до безопасных значений напряжения вокруг заземлителя. Пример заземленной электроустановки приведен на рис. 2.7.1, г; R_3 – сопротивление заземлителя.

Защитное зануление состоит в преднамеренном соединении металлических нетоковедущих деталей электроустановок (в частности, металлических корпусов) с глухозаземленным проводом электрической сети.

Для иллюстрации вышесказанного рассмотрим рис. 2.7.2.

Вначале представим, что трехфазная электрическая сеть является трехпроводной (включатели « S_N » и « S'_N » разомкнуты), не нагружена (включатель « S » разомкнут), идеально изолирована от земли (включатели « S_E » и « S_0 » разомкнуты). Тогда имеем следующее.

1. По проводам сети ток не течет.
2. Напряжение между любой парой проводов сети, например U_{AB} , определяется так:

$$\begin{aligned} U_{AB} &= U_A - U_B = U_m \sin \omega t - U_m \sin (\omega t - 2\pi/3) = \\ &= \sqrt{3} U_m \cos (\omega t - \pi/3). \end{aligned} \quad (2.7.1)$$

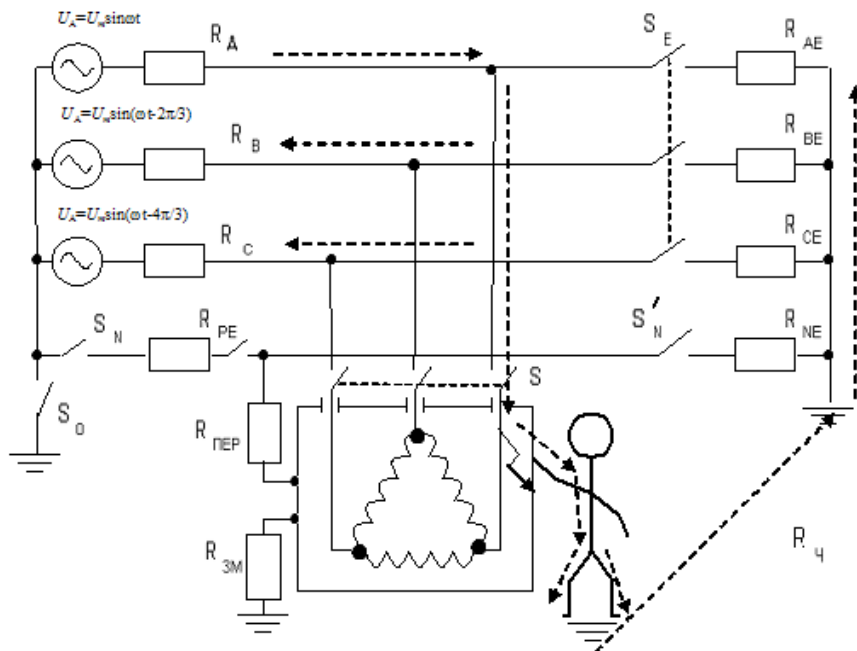


Рис. 2.7.2. Принципиальная электрическая схема электросети и электроустановки позволяющая понять принцип обеспечения безопасности человека, коснувшегося корпуса аварийной электроустановки

Аналогично:

$$U_{AC} = \sqrt{3} U_m \cos(\omega t - 2\pi/3).$$

Если изоляция проводов относительно земли неидеальна (сопротивления R_E не равны ∞ – выключатель « S_E » замкнут), то по проводам сети с отключенным потребителем потечет ток. Например, для провода А при равенстве фазных сопротивлений $R_A = R_B = R_C = R$ и сопротивлений утечки $R_{AE} = R_{BE} = R_{CE} = R_E$ он может быть определен так:

$$I_A = \frac{\sqrt{3}U_m}{2(R + R_E)} [\cos(\omega t - \pi/3) + \cos(\omega t - 2\pi/3)] =$$

$$= \frac{\sqrt{3}U_m}{R + R_E} \cos(\omega t - \pi / 2) \cos(\pi / 6) = \frac{\sqrt{3}U_m}{2(R + R_A)} \sin \omega t . \quad (2.7.2)$$

Аналогично можно найти:

$$I_B = \frac{3U_m}{2(R + R_E)} \sin(\omega t - 2\pi / 3) ;$$

$$I_C = \frac{3U_m}{2(R + R_E)} \sin(\omega t - 4\pi / 3) . \quad (2.7.2')$$

Обратим внимание на то, что токи I_A , I_B и I_C отличаются только сдвигом фаз. Эти токи приводят к потере энергии за счет сопротивлений утечки – R_{AE} , R_{BE} , R_{CE} .

Теперь предположим, что в сеть включена электроустановка (выключатель «S» замкнут) и она находится в аварийном состоянии – фаза «А» замкнута на корпус. Тогда при отсутствии защитного заземления (отсутствует цепь с сопротивлением $R_{ЗМ}$) и защитного зануления (отсутствует цепь с сопротивлением $R_{ПЕР}$) напряжение фазного провода «А» будет подано на корпус. Через тело человека потечет ток

$$I_q = I = \frac{U_{AB} + U_{AC}}{2R + R_E + R_q} .$$

Используя соотношения (2.7.1) и (2.7.2), нетрудно получить:

$$I_q = \frac{3U_m}{2R + R_E + R_q} \sin \omega t . \quad (2.7.3)$$

Степень опасности поражения человека в такой ситуации в основном определяется значением сопротивления R_E , так как обычно оно больше R_q и тем более R .

Переходя к действующим значениям тока и напряжения, из выражение (2.7.3) получим:

$$I_A^{(Д)} = I^{(Д)} = \frac{3U^{(Д)}}{2R + R_E + R_q} \approx \frac{3U^{(Д)}}{R_E} . \quad (2.7.4)$$

При наличии защитного заземления ситуация существенно изменится. Тело человека оказывается зашунтированным сопротивлением $R_{ЗМ}$. Соответственно, выражение (2.7.4) должно быть изменено:

$$I_A = \frac{3U^{(Д)}}{2R + R_E + \frac{R_{\text{ч}} R_{3М}}{R_{\text{ч}} + R_{3М}}}.$$

Пренебрегая сопротивлением R , получим:

$$I_A^{(Д)} = \frac{3U^{(Д)}(R_{\text{ч}} + R_{3М})}{R_E R_{\text{ч}} + R_E R_{3М} + R_{\text{ч}} R_{3М}}. \quad (2.7.5)$$

Очевидно, что в данной ситуации:

$$I_{\text{ч}}^{(Д)} = I_A^{(Д)} \frac{R_{3М}}{R_{\text{ч}} + R_{3М}}.$$

Подставив $I_A^{(Д)}$ из (2.7.5), а также, приняв во внимание (2.7.4), получим:

$$I_{\text{ч}}^{(Д)} = \frac{3U^{(Д)}}{R_E + R_{\text{ч}} + \frac{R_E R_{\text{ч}}}{R_{3М}}}. \quad (2.7.6)$$

Из выражения (2.7.6) следует, что опасность поражения человека в аварийной ситуации возрастает с увеличением фазного напряжения $U^{(Д)}$, с уменьшением сопротивлений изоляции сети R_E и тела человека $R_{\text{ч}}$, а также (и это главное в этой лабораторной работе) с ростом сопротивления заземлителя $R_{3М}$.

Аналогично можно проанализировать последствия аварийной ситуации для случая 4-проводной изолированной от земли сети (переключатели «S_N», «S_{ОБР}» и «S'_N» замкнуты). В таком случае за счет создания дополнительной цепи протекания тока через сопротивление R_{NE} (оно параллельно другим сопротивлениям утечки!) ток через тело человека примерно в два раза больше, чем в предыдущей ситуации.

Теперь проанализируем аварийную ситуацию для случая применения защитного зануления в сети с глухозаземленной нейтралью («S₀» замкнут, $R_{NE} \rightarrow 0$). Тогда главное значение станет играть контур цепи: источник напряжения фазы «А» – R_A – корпус электроустановки – $R_{ПЕР}$ – R_{PE} – источник напряжения фазы «А». В результате на корпус установки будет подана только часть фазного напряжения, а именно:

$$U_A^{(Д)} \frac{R_{ПЕР}}{R_F + R_{ПЕР}}.$$

Это – первый, но не главный факт, которым обеспечивается защита человека. Вторым является то, что через названную цепь потечет большой ток, а именно:

$$I^{(Д)} = \frac{U_A^{(Д)}}{R_A + R_{\text{ПЕР}}},$$

т.е. за счет зануления искусственно создается короткое замыкание фазы «А» и за счет большого тока вызывается срабатывание автоматического выключателя «S». Электроустановка обесточивается.

Наличие защитного заземления вместе с защитным занулением повышает электробезопасность: сопротивление $R_{\text{ЗМ}}$ параллельно сопротивлению $R_{\text{ПЕР}}$, чем усиливается эффект зануления.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

Исследование эффективности способов обеспечения электробезопасности проводится на лабораторном стенде «Защитное заземление и защитное зануление». Стенд представляет собой настольную конструкцию, на лицевой панели которого мнемосхема системы «электрическая сеть – потребители». Стенд позволяет моделировать трехфазную питающую сеть, изолированную от земли (переключатель «S_N» в нижнем положении) или с глухозаземленной нейтралью (переключатель «S_N» в верхнем положении).

При исследовании защитного заземления моделируется включение только двух (из трех изображенных на мнемосхеме) электроустановок – потребителей энергии в корпусах 1 и 2; их включение в сеть питания осуществляется с помощью выключателей «S₁» и «S₂» соответственно. Аварийное состояние электроустановок имитируется замыканием одного из фазных проводов на корпус электроустановки, соответственно, кнопками «S_{КЗ1}» и «S_{КЗ2}».

Вторая электроустановка по логике выполнения лабораторной работы должна быть включенной на любом этапе ее проведения; только при этом условии возможно включение в сеть других электроустановок. Заземление корпусов электроустановок 1 и 2 достигается замыканием контактов X_1 с $X_{\text{ЗМ1}}$ и, соответственно, X_2 с $X_{\text{ЗМ2}}$.

Подача напряжения в сеть производится выключателем «Вкл-Выкл». Регулятором «U_ф» изменяется фазное напряжение в питающей сети; оно задается руководителем работы. Провод «N»

мнемосхемы соответствует нулевому проводу сети, а провод «РЕ» – повторному заземлителю (местному контуру заземления).

Стенд позволяет имитировать изменение сопротивления изоляции проводов сети относительно земли (сопротивление утечки) переключателем « S_{RE} », сопротивления контура повторного заземления – переключателем « S_{RPE} », сопротивления самого повторного заземлителя – переключателем « $R_{пов}$ », а также сопротивления заземлителя второй электроустановки – переключателем « S_{R3M2} ». Численные значения всех названных сопротивлений указываются на шкалах соответствующих переключателей.

В нижней части стенда располагаются табло трех цифровых измерительных приборов: вольтметра, амперметра и секундомера.

Положениям переключателя вольтметра соответствуют измеряемые напряжения: фазное на выходных клеммах генератора (U_{Φ}); напряжение относительно земли нейтральной точки источника тока (U_0); корпусов электроустановок (U_1, U_2, U_3) и фазных проводов (U_A, U_B, U_C).

Переключателем « A_1-A_2 » моделируется включение амперметра в соответствующие обозначенные места мнемосхемы – позиции « A_1 » и « A_2 » соответственно.

Секундомером измеряется время срабатывания автоматического защитного выключателя второй электроустановки, которое происходит при токе свыше 200 А.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Для проведения измерений необходимо выполнить ряд действий.

1. Нажатием кнопки «Сброс» стереть предыдущие показания измерительных приборов.

2. Установить переключатели стенда в соответствии с очередным заданием.

3. Нажать кнопку «Измерение».

4. На табло приборов прочитать значения измеряемых параметров, при необходимости выполнив необходимые переключения.

1. Исследование эффективности защитного заземления электроустановок напряжением до 1 кВ (случай трехфазной трехпроводной сети с изолированной нейтралью).

1.1. Получить от руководителя работ значения U_{Φ} и R_E , при которых следует провести измерения; для записей результатов приготовить табл. 2.7.1.

Таблица 2.7.1

U_{Φ}	...							
$R_E, \text{кОм}$								
$R_{3M2}, \text{Ом}$	∞	4	10	100	∞	4	10	100
$U_2, \text{В}$								
$U_A, \text{В}$								
$U_B, \text{В}$								
$U_C, \text{В}$								
$U_0, \text{В}$								
$I, \text{А}$								

1.2. Тумблером «Вкл-Выкл» включить стенд, при этом должны загореться индикаторы наличия фазных напряжений на мнемосхеме передней панели.

1.3. Привести стенд в исходное состояние, нажав кнопку «Сброс». Регулятором напряжения сети « U_{Φ} » установить заданное руководителем фазное напряжение сети, измеряя его вольтметром в положении переключателя « U_{Φ} ». В дальнейшем регулятор не трогать во избежание изменения значения U_{Φ} .

1.4. Моделировать включение электроустановки 2 в трехфазную трехпроводную сеть с изолированной нейтралью без заземления ($R_{3M2} = \infty$). Для этого установить переключатели « S_N » в нижнее положение, а « S_{RE} » – соответствующему одному из заданных значений сопротивления изоляции проводов относительно земли и нажать кнопку « $S2$ ».

1.5. Нажатием кнопки « S_{K32} » замкнуть фазный провод В на корпус – имитировать аварию.

1.6. Нажать кнопку «Измерение». Значения измеряемых напряжений считать на табло и занести в таблицу.

1.7. Нажать кнопку «Сброс».

1.8. Заземлить корпус 2-й электроустановки, замкнув с помощью штекера клеммы « $X2$ » и « X_{3M2} » между собой.

1.9. Последовательно изменяя значение R_{3M2} с помощью переключателя « S_{3M2} » повторить операции по пп. 1.4 – 1.7 при каждом значении сопротивления R_{3M2} .

1.10. Изменить сопротивление изоляции проводов от земли, повторить операции (пп. 1.4 – 1.9).

1.11. При одном значении сопротивления изоляции проводов (R_E), заданном руководителем, исследовать эффективность автономного заземления двух электроустановок при замыкании на их корпуса разных фазных проводов сети. Для этого заземлить корпуса установок 1 и 2, замкнув штекерами клеммы X_1 с X_{3M1} и X_2 с X_{3M2} . Нажатием кнопок « S_1 » и « S_2 » имитировать замыкание корпусов установок на разные фазные провода сети. Далее произвести измерения по табл. 2.7.2.

Таблица 2.7.2

R_E	...		
R_{3M} , Ом	4	10	100
U_1 , В			
U_2 , В			
U_A , В			
U_B , В			
U_C , В			
U_0 , В			
I_1 , А			

1.12. Моделировать включение электроустановки 2 в трехфазную четырехпроводную сеть с заземленной нейтралью и контуром повторного заземления. Для этого переключатель « S_N » установить в верхнее положение, а переключатель « $S_{RПОВ}$ » – в положение « ∞ ».

1.13. Моделируя аварийную ситуацию на установке 2, произвести измерения по табл. 2.7.2.

1.14. Выключить стенд тумблером «Вкл-Выкл».

1.15. Проанализировать зависимость опасности поражения человека электрическим током от сопротивления заземляющего устройства, в том числе и для случая $R_{3M2} = \infty$, т.е. отсутствия заземления, а также от качества изоляции проводов от земли, т.е. от сопротивления R_E . Выводы привести в отчете по работе. Принцип обеспечения электробезопасности за счет защитного заземления пояснить с помощью принципиальной схемы, приведенной в предварительных замечаниях описания данной работы.

1.16. Для двух заданных руководителем значений сопротивления R_E рассчитать величину тока, который может пройти через тело человека, коснувшегося корпуса незаземленной электроустановки в аварийном состоянии. Принять $R_q = 1000$ Ом. Воспользоваться законом Ома. Оценить последствия.

1.17. Оценить опасность поражения человека при прикосновении к корпусу аварийной электроустановки в случае двойной аварии. Сравнить ситуацию с выводами по п. 1.5.

1.18. Проанализировать эффективность применения защитного заземления в сетях с заземленной нейтралью по аналогии с п. 1.5. Сравнить выводы со случаем изолированной нейтралью.

1.19. По результатам измерений п. 1.16 сделать вывод об эффективности защитного зануления при использовании повторного заземления, но с оборванным его контуром.

1.20. Оформить отчет по работе.

Отчет по работе должен содержать: таблицы с результатами измерений, расчеты согласно заданию (о величине тока, протекающего через тело человека), принципиальную электрическую схему, поясняющую сущность защитного заземления и выполненных экспериментов, выводы по разделам задания, заключение об эффективности применения защитного заземления, о влиянии повторного заземления на эффективность защитного зануления в зависимости от его сопротивления $R_{пов}$.

2. Исследование эффективности защитного зануления.

2.1. Выполнить операции по пп. 1.2 и 1.3.

2.2. Моделировать трехфазную четырехпроводную сеть с заземленной нейтралью, установив переключатель « S_N » в верхнее положение.

2.3. Присоединить корпуса установок 1 и 2 к контуру повторного заземления, соединив штекерами клеммы « X_1 » с « X_{PE1} » и « X_2 » с « X_{PE2} ».

2.4. Имитировать исправное состояние контура повторного заземления – «РЕ», для чего переключатель « $S_{ОБР}$ » перевести в верхнее положение (обрыв контура отсутствует).

2.5. Установить значение сопротивления контура повторного заземления R_{PE} с помощью переключателя « S_{RPE} », например 0,1 Ом.

2.6. Переключателем « $S_{RПЕР}$ » установить сопротивление зануляющего проводника $R_{ЛЕР} = 0$ Ом.

2.7. Повторное заземление отключить, для чего переключателем « $S_{Rпов}$ » установить $R_{пов} = \infty$.

2.8. Подключить установки 1 и 2 к сети кнопчными выключателями «S₁» и «S₂».

2.9. Установить переключатель амперметра в положение «A1».

2.10. Нажатием кнопки «S_{к32}» имитировать замыкание фазного провода «В» на корпус 2-й установки.

2.11. Нажать кнопку «Измерение» и произвести замеры параметров, приведенных в табл. 2.7.3, при $R_{\text{ПЕР}} = 0 \text{ Ом}$.

Таблица 2.7.3

$R_{\text{РЕ}}, \text{Ом}$	0,1	0,2	0,5
$U_1, \text{В}$			
$U_2, \text{В}$			
$U_3, \text{В}$			
$U_0, \text{В}$			
$I_1, \text{А}$			
$t, \text{мс}$			

При срабатывании автоматических выключателей «S1» и «S2» соответствующие им индикаторы гаснут. Продолжающий гореть индикатор свидетельствует о недостаточности тока для срабатывания автомата. Время срабатывания автомата (один из факторов обеспечения безопасности!) отображается на табло секундомера.

2.12. Нажать кнопку «Сброс».

2.13. Устанавливая каждый раз переключателем «S_{РРЕ}» значения переходного сопротивления $R_{\text{ПЕР}} = 0,2$ и $0,5 \text{ Ом}$, измерять параметры, перечисленные в табл. 2.7.3.

2.14. При одном заданном руководителем значении сопротивления «R_{РЕ}» (его устанавливают переключателем «S_{РРЕ}»), изменяя сопротивление $R_{\text{ПЕР}} = 0; 0,2$ и $0,5 \text{ Ом}$, каждый раз производить измерения тех же параметров, что и в п. 2.11, занеся их значения табл. 2.7.4.

2.15. Исследовать влияние повторного заземления РЕ-проводника и его сопротивления, $R_{\text{ПОВ}} = 4; 10; 100 \text{ Ом}$, на обеспечение (время отключения аварийной установки), для чего произвести измерения по табл. 2.7.5 при $R_{\text{РЕ}} = 0,1 \text{ Ом}$; $R_{\text{ПЕР}} = 0 \text{ Ом}$. Положение других переключателей – прежнее.

2.16. Исследовать повторное заземление в условиях обрыва контура повторного заземления, переведя переключатель S_{ОБР} в разомкнутое состояние. Для этого повторить измерения п. 2.15, дополнив при этом соответствующую ему таблицу еще и случаем $R_{\text{ПОВ}} = \infty$, т.е. случаем отсутствия повторного заземления.

Таблица 2.7.4

$R_{PE}, \text{ Ом}$	...		
$R_{ПЕР}, \text{ Ом}$	0	0,2	0,5
$U_1, \text{ В}$			
$U_2, \text{ В}$			
$U_3, \text{ В}$			
$U_0, \text{ В}$			
$I_1, \text{ А}$			
$t, \text{ мс}$			

Таблица 2.7.5

$R_{ПОВ}, \text{ Ом}$	4	10	100
$U_1, \text{ В}$			
$U_2, \text{ В}$			
$U_3, \text{ В}$			
$U_0, \text{ В}$			
$I_1, \text{ А}$			
$I_2, \text{ А}$			
$t, \text{ мс}$			

2.17. Выключить стенд тумблером «Вкл-Выкл».

2.18. Проанализировать результаты измерений, выполненных согласно пп. 2.4 – 2.14, сделать вывод о влиянии сопротивлений R_{PE} и $R_{ПОВ}$ на эффективность защитного зануления в условиях отсутствия повторного заземления.

2.19. Проанализировать результаты измерений, выполненных согласно п. 2.15, сделать вывод о влиянии повторного заземления на эффективность защитного зануления в зависимости от его сопротивления $R_{ПОВ}$.

2.20. По результатам измерений п. 2.16 сделать вывод об эффективности защитного зануления при использовании повторного заземления, но с оторванным его контуром.

Отчет по работе должен содержать: таблицы с результатами измерений, принципиальную электрическую схему, поясняющую сущность выполненных экспериментов, выводы по разделам задания, заключение об эффективности применения защитного зануления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Безопасность жизнедеятельности, как область современных научных и практических знаний, являясь обязательной составляющей образовательных стандартов РФ, имеет целью приобретение студентами вузов важных для специалистов профессиональных компетенций. Данное учебное пособие дополняет имеющуюся учебную литературу, ранее изданную в НИЯУ МИФИ, в нем содержится материал, предназначенный для использования в процессе самостоятельной работы студентов и при проведении практических занятий по дисциплине БЖД.

В соответствие с направленностью образовательного процесса университета в пособии делается акцент на рассмотрении проблематики радиационной безопасности человека. При этом, однако, в нем предусмотрено изучение и других традиционных, значимых опасностей современной жизни и деятельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вентцель Е.С. Исследование операций. М.: Сов. радио, 1972.
2. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические модели в теории надежности. М.: Наука, 1965.
3. Крамер-Агеев А.Е., Костерев В.В., Леденев И.К. и др. Основы безопасности жизнедеятельности / Под ред. И.К. Леденева. М.: МИФИ, 2007.
4. Гусев Н.Г., Машкович В.П., Суворов А.П. Защита от ионизирующих излучений. М.: Атомиздат, 1980.
5. Машкович В.П., Панченко А.М. Основы радиационной безопасности. М.: Энергоиздат, 1990.
6. Леденев И.К. Начала теории случайных процессов. М.: МИФИ, 2005.
7. Нормы радиационной безопасности. (НРБ-2009). М.: Минздрав России, 2009.
8. Долин П.А. Основы техники безопасности в электроустановках. М.: Электроатомиздат, 1984.