

Министерство образования Республики Беларусь
Белорусский государственный университет
Научно-исследовательское учреждение «Институт ядерных проблем»
Белорусского государственного университета
(НИИ ЯП БГУ)

УДК 004.65:004.75:004.5:004.91
№ ГР 20140494
инв. № _____

УТВЕРЖДАЮ
Директор НИИ ЯП БГУ
доктор физ.-мат. наук
профессор

_____ С.А.Максименко

« ____ » _____ 20 __ г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

**Разработка концепции, методов и компьютерных технологий создания
электронного портала ядерных знаний
учреждений образования Республики Беларусь
с базой ядерных знаний и системой дистанционного обучения**

**«Разработка концепции портала ядерных знаний, разработка детальной
структуры иерархической структуры таксономии портала, анализ требований
и условий функционирования портала; разработка информационной модели и
архитектуры портала; разработка технической спецификации на портал;
разработка методов и собственных программных средств для программной
реализации портала»**

(заключительный)

ГПНИ «Информатика и космос, научное
обеспечение безопасности и защиты
от чрезвычайных ситуаций»
Подпрограмма «Информатика»
Задание 1.35

Заведующий лабораторией аналитических
исследований НИИ ЯП БГУ

_____ С.В.Черепица
(подпись, дата)

Научный руководитель задания
кандидат физико-математических наук

_____ С.В.Черепица
(подпись, дата)

Минск 2015

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель НИР
Зав. лаб. аналитических
исследований
канд. физ.-мат. наук

_____._____._____.
(подпись, дата)

С.В. Черепица
(разд. 1, разд. 2, разд. 3, разд. 4,
разд. 7).

Исполнители НИР:

Ученый секретарь НИИ ЯП
канд. физ.-мат. наук

_____._____._____.
(подпись, дата)

С.Н. Сытова
(реферат, введение, заключение,
разд. 1, разд. 2, разд. 3, разд. 4,
разд. 6, разд. 7)

Заместитель директора НИИ
ЯП по научной работе
доктор физ.-мат. наук

_____._____._____.
(подпись, дата)

А.С.Лобко
(разд. 1, разд. 2, разд. 3, разд. 7)

Старший научный
сотрудник

_____._____._____.
(подпись, дата)

А.Л. Мазаник
(разд. 1, разд. 3, разд. 4, разд. 5,
разд. 6)

Научный сотрудник

_____._____._____.
(подпись, дата)

А.Н.Коваленко
(разд. 1, разд. 3, разд. 4, разд. 5,
разд. 6)

Соисполнители:

Физический факультет БГУ
Кафедра ядерной физики,
доцент
канд. физ.-мат. наук

_____._____._____.
(подпись, дата)

И.Я.Дубовская
(разд. 2, разд. 3, разд. 7, разд. 9)

Зав. кафедрой ядерной
физики,
доцент

_____._____._____.
(подпись, дата)

А.И.Тимощенко
(разд. 2, разд. 3, разд. 7, разд. 9)

канд. физ.-мат. наук
Кафедра ядерной физики,
доцент
канд. физ.-мат. наук

_____._____._____.
(подпись, дата)

М.Д.Дежурко
(разд. 3, разд. 7, разд. 9)

Кафедра физики твердого
тела, доцент
канд. физ.-мат. наук

_____._____._____.
(подпись, дата)

Н.И.Поляк
(разд. 3, разд. 7, разд. 9)

Химический факультет БГУ
Зам. декана по научной
работе,
доцент
канд. хим. наук

_____._____._____.
(подпись, дата)

Т.А. Савицкая
(введение, разд. 2, разд. 3, разд.
7, разд. 8)

Кафедра радиационной
химии и химико-
фармацевтических
технологий,
доцент
канд. хим. наук
Инженер-программист

_____. _____. _____.
(подпись, дата)

И.М.Кимленко
(введение, разд. 2, разд. 3, разд.
7, разд. 8)

Н.А.Кумачев
(разд. 8)

Лаборант

_____. _____. _____.
(подпись, дата)

И.В.Резников
(разд. 8)

Нормоконтролер

_____. _____. _____.
(подпись, дата)

А.В. Шпаковская

_____. _____. _____.
(подпись, дата)

РЕФЕРАТ

Отчет 123 с., 79 рис., 3 табл., 55 источников, 11 приложений на 198 с.

Программное обеспечение, информационная система, база данных, электронный документооборот, интерфейс, ядерные знания, портал.

Объектом исследования являются ядерные знания; необходимые и достаточные условия функционирования специализированного портала ядерных знаний.

Цель работы – создание электронного портала ядерных знаний учреждений образования Республики Беларусь, в рамках которого должны быть доступны знания в области ядерных технологий, в том числе ядерной и реакторной физики, физики ионизирующих излучений, применения ядерно-физических методов в различных областях науки и техники, радиационной и радиохимии, ядерной медицины и т.п.

Метод или методология: проведение анализа и разработка методик, разработка алгоритмов, разработка программных средств на основе свободного программного обеспечения.

Результаты работы: Изучен опыт МАГАТЭ и ведущих университетов, готовящих специалистов для ядерной энергетики, по созданию порталов ядерных знаний. Проанализировано состояние проблемы по построению электронного информационного пространства в Республике Беларусь. Разработана концепция, структура и таксономия портала ядерных знаний; проведен анализ требований и условий функционирования портал. Разработаны информационная модели и архитектура портала; методы и собственные программные средства для реализации портала. На основе свободного программного обеспечения создан портал ядерных знаний BelNET, сформирована база знаний и система дистанционного обучения. Обеспечено начало наполнения портала знаниями, его апробация и функционирование. Контент в области ядерных знаний включает глоссарий, монографии, учебники, материалы международных конференций, аналитический обзор терминов по темам «Физика ионизирующего излучения» и «Дозиметрические единицы с учетом большого числа регламентирующих документов и стандартизирующих документов, цикл лабораторных работ по изучению прохождения ионизирующего излучения через вещество, которые можно выполнить, используя общедоступные интернет-ресурсы и которые могут быть выполнены школьниками, студентами младших курсов, а также любым интересующимся интернет-пользователем. Контент в области менеджмента ядерных знаний включает тезаурус, лекции на английском языке, учебные модули «Менеджмент ядерных знаний» и «Ядерная энергетика как фактор стабильного энергетического развития», созданные в технологии подкастинга и включающие лекции в виде аудио- и видеофайлов и тестовые задания к ним, лабораторные работы.

Область применения: образование, ядерная энергетика, информатика.

СОДЕРЖАНИЕ

Перечень условных обозначений	7
Введение.....	8
1. Фреймворк eLab на основе свободного программного обеспечения.....	10
1.1. Свойства фреймворка eLab.....	11
1.2. Недостатки фреймворка eLab.....	11
1.3. Система eLab-Atom.....	12
2. Обзор порталов ядерных знаний.....	16
2.1. Портал российской ассоциации ядерной науки и образования.....	17
2.2. Nuclear Security Science and Policy Institute.....	19
2.3. Портал Российского атомного сообщества.....	20
2.4. International Nuclear Security Education Network.....	22
2.5. Asian Network for Education in Nuclear Technology.....	24
2.6. European Nuclear Education Network.....	25
2.7. AFRA-Nework for Education of Nuclear Science and Technology.....	27
2.8. Международная ядерная информационная система INIS.....	28
2.9. Белорусские сайты.....	29
2.10. Web 2.0 для образования и обмена информацией.....	32
2.11. Технология подкастинга.....	34
3. Портал ядерных знаний BelNET.....	36
3.1. Концепция и информационная модель портала ядерных знаний BelNET.....	36
3.2. Таксономия портала BelNET.....	37
3.3. Общие линейные и функциональные связи между разделами портала.....	53
3.4. Функциональные связи в иерархической структуре основных разделов портала.....	55
4. Анализ требований и условий функционирования портала.....	56
4.1. Техническая спецификация на портал.....	58
4.2. Требования к безопасности портала.....	62
5. Архитектура портала.....	63
5.1. Архитектура портала.....	63
5.2. Составные части ПО.....	65
5.3. Ядро и модули Portal.....	65
5.4. Функционирование системы. Алгоритмы работы.....	67
5.5. Система классов Portal.....	69
5.6. Интерфейс пользователя.....	71
5.7. Подключение пользователей к базам данных.....	73
5.8. Сохранения текущих состояний пользовательского интерфейса.....	74
6. Программная реализация портала.....	75
7. Контент электронного портала ядерных знаний BelNET.....	100
8. Контент электронного портала ядерных знаний в предметных областях: радио- химия, водно-химические режимы и водоподготовка для АЭС, менеджмент ядерных знаний.....	106
8.1 Контент портала в области радиохимии.....	108

8.2 Контент портала в области водно-химических режимов и водоподготовки для АЭС	109
9. Контент электронного портала ядерных знаний в предметных областях: ядерная физика, менеджмент ядерных знаний.....	111
9.1. Разработка глоссария.....	111
9.2. Аналитический обзор терминов	115
9.3. Цикл лабораторных работ.....	116
Заключение.....	118
Список использованных источников.....	120
Приложение 1. Тезаурус.....	124
Приложение 2. Lecture “Nuclear Knowledge Management”.....	128
Приложение 3. Материалы по разделу «Радиохимия».....	137
Приложение 4. Лабораторные работы.....	154
Приложение 5. Lecture “Nuclear and radiochemistry”.....	168
Приложение 6. Материалы портала по разделу «Водно-химические режимы и водоподготовка для АЭС».....	187
Приложение 7. Глоссарий.....	206
Приложение 8. Ионизирующее излучение. Поле ионизирующего излучения и его характеристики.....	218
Приложение 9. Оценка нижнего порога энергии частиц ионизирующего излучения.....	273
Приложение 10. Дозиметрические величины.....	276
Приложение 11. Лабораторные работы дистанционного обучения.....	288

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЙ

Международное агентство по атомной энергии – МАГАТЭ
Программное обеспечение – ПО
Свободное программное обеспечение – СПО
Система электронного документооборота – СЭД
Лабораторная информационная система – ЛИС
Система дистанционного обучения – СДО
Автоматизированное рабочее место – АРМ
Информационная карта – ИК
Водно-химический режим – ВХР
Водо-водяной энергетический реактор – ВВЭР
Портал российской ассоциации ядерной науки и образования – РАЯНО
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» – НИЯУ МИФИ
Институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ – ИАТЭ НИЯУ МИФИ
Международная система ядерной информации – ИНИС
Международный проект МАГАТЭ по инновационным ядерным реакторам и топливным циклам – ИНПРО
Отработавшее ядерное топливо – ОЯТ
Радиоактивные отходы – РАО
Система управления содержимым (контентом) (англ. Content management system) – CMS
Ядерный топливный цикл – ЯТЦ
Nuclear Security Science and Policy Institute – NSSPI
International Nuclear Security Education Network – INSEN
Nuclear Safeguards Education Portal – NSEP
Asian Network for Education in Nuclear Technology – ANENT
European Nuclear Education Network – ENEN
International Nuclear Information System – INIS (ИНИС)
Sharable Content Object Reference Model – SCORM
Ядерный топливный цикл – ЯТЦ
Подкастинг – производное от слов “iPod”, популярного MP3-плеера производства компании Apple и “broadcasting” (от англ. «теле-, радиовещание»).

Подкасты – записи в формате MP3, размещенные в сети, с описанием, содержащим информацию о файлах (автор, размер, дата обновления и веб-ссылка на аудиозапись).

ВВЕДЕНИЕ

Современные экономисты и социологи по предложению Дэниела Белла [1] нынешнюю стадию развития человечества рассматривают как пост-индустриальное общество, или общество, в основе которого лежит экономика знаний [2]. В наш лексикон уже прочно вошли такие термины, как инновационный университет, с присущим ему треугольником знаний: образование, наука, инновации; и появились новые: трансфер знаний; управление знаниями и брокеринг знаний. В концепцию менеджмента знаний или управления знаниями входит положение о необходимости передачи и сохранения знаний [3]. Майкл Полани предложил удачную метафору: все знания – это айсберг, надводная часть которого – это явные знания, они в книгах, базах данных и т.п., а подводная часть – это неявные знания, т.е. те, которые имеются у специалиста с опытом и нигде не зафиксированы. Именно их нужно передавать и сохранять в первую очередь.

Среди областей знания, для которых сохранение неявных знаний в настоящее время является наиболее критичным, особое место занимают ядерные знания. Поскольку именно в ядерной отрасли во всем мире наметилась тревожная тенденция старения кадров при отсутствии притока молодых специалистов. Причем это касается не только представителей ядерных специальностей, но и профессоров, ответственных за подготовку кадров. Наша республика – новая ядерная страна. У нас еще нет проблемы старения кадров, поскольку как ядерная энергетика, так и система ядерного образования находятся в стадии развития. В таких условиях задачей номер один в республике является создание системы национального ядерного образования, а задачей номер два – привлечение лучших абитуриентов к получению образования в области ядерных наук и технологий. Это тем более важно, потому, что по данным, которые привела в своем отчете исследовательская компания Fast Future (Великобритания), в списке 20 самых востребованных профессий на период до 2030 года специалистов – ядерщиков нет [4]. В таких условиях необходима оптимизация учебного процесса и ориентация образования в целом на практическое обучение, на что конкретно указал Президент А. Лукашенко. Во внимание следует принимать также и тот факт, что нынешнее поколение молодых людей – это поколение Интернета. Большую часть сведений современный студент может и зачастую предпочитает получать из Интернета. Вместе с тем у современной молодежи отмечается нехватка культуры работы с информацией – необходимо повышать грамотность студентов, прививая им навыки обращения с информацией и умения каталогизировать. Создание информационного портала ядерных знаний актуально и с точки зрения предоставления доступа для студентов и преподавателей к информационным ресурсам МАГАТЭ.

Сегодня в Республике Беларусь отсутствуют собственные информационные системы ядерных знаний. В этих условиях представляется актуальным создание и функционирование портала ядерных знаний на базе учреждений образования, который впоследствии должен стать составной частью национального портала ядерных знаний и должен использоваться для повышения Интернет культуры молодежи.

Белорусский государственный университет является одним из основных исполнителей Государственной программы подготовки кадров для ядерной энергетики Республики Беларусь на 2008–2020 годы. Главной целью программы является организация системы комплексной подготовки кадров, обеспечивающей получение знаний и навыков, необходимых для строительства и безопасной эксплуатации атомной электростанции, обеспечения ядерной и радиационной безопасности, безопасности персонала АЭС, населения и окружающей среды. Осознавая высокую ответственность за обеспечение качественной подготовки специалистов для инфраструктуры будущей АЭС, БГУ на основе мирового опыта успешно разрабатывает новые инновационные образовательные технологии и продукты. Среди них – специальный портал ядерных знаний, где сосредоточена

систематизированная учебная информация, новости, статьи, публикации, отчеты, обзоры конференций, ссылки на информационные интернет-ресурсы и др.

Портал ядерных знаний будет способствовать эффективной реализации в масштабах БГУ, а, в перспективе и в масштабе республики, управления ядерными знаниями. Согласно глоссарию МАГАТЭ [5–7] он представляет собой интегрированный, системный подход к идентификации, поиску, преобразованию, сохранению, распространению и использованию знаний организации и её персонала для создания коллективного знания, направленного на достижение специфических целей организации. Портал ядерных знаний будет способствовать поиску необходимой информации и распространению ядерных знаний, особенно неявных, в среде специалистов не только системы высшего образования, но и всей ядерной отрасли Республики Беларусь.

Новизна работы заключается в разработке электронного портала ядерных знаний учреждений образования Республики Беларусь с учетом специфики и условий Республики Беларусь, формирования собственной базы ядерных знаний и системы дистанционного обучения на основе свободного программного обеспечения. Готового свободного ПО, реализующего заявленные в рамках данного проекта цели и задачи, в настоящее время нет.

1 ФРЕЙМВОРК eLab НА ОСНОВЕ СВОБОДНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

В связи с наметившейся мировой тенденцией перехода на свободное программное обеспечение (СПО) и ограничением на использование продуктов Microsoft и других международных компаний возникает необходимость разработки программных систем, работающих не только под управлением операционной системой Windows, но и, например, под различными версиями Linux. В 2010 г. было принято Распоряжение Правительства Российской Федерации №2299-р об утверждении плана перехода федеральных органов исполнительной власти и федеральных бюджетных учреждений на использование СПО. В 2014-2020 гг. запланирован перевод технологических сервисов российского электронного правительства, разработанных на лицензионном коммерческом ПО (Oracle, IBM и Microsoft) и использующих технологически не нейтральное аппаратное и системное обеспечение (ОС Solaris, ПО Oracle, VMware, Symantec и Microsoft, архитектура SPARC и др.), на свободное ПО и доверенное (лишенное незадекларированных возможностей) аппаратное и системное обеспечение. В связи с вхождением России, Беларуси, Казахстана, Армении и Кыргызстана в Таможенный Союз Евразийского экономического союза (ЕАЭС) и процессами унификации законодательства во всех областях жизнедеятельности переход на СПО становится актуальным для этих стран.

Свободное ПО – это широкий спектр ИТ-продуктов, защищённых свободными лицензиями, предусматривающих неограниченные установку, запуск, а также свободное использование, изучение, распространение и их изменение. Использование такого ПО облегчает процессы обеспечения и верификации безопасности разрабатываемых программных продуктов, позволяет проводить полноценные процедуры сертификации, поскольку исходные коды СПО, а также техническая документация, описывающая архитектуру продукта, протоколы и стандарты взаимодействия находятся в открытом доступе.

В современном мире электронный документооборот – это важный сервис по работе с документами, представленными в электронном виде, реализующий принципы «бесбумажного делопроизводства». В настоящее время в мире, в том числе в странах ЕАЭС, присутствует целый ряд готовых решений ЛИС (лабораторная информационная система или LIMS – сокр. от *Laboratory Information Management System*) и СЭД (системы электронного документооборота), которые могут быть настроены под цели и задачи заказчика. Рынок таких продуктов в последние годы является одним из самых динамично развивающихся сегментов ИТ-индустрии. Следует отметить, что программных продуктов, сочетающих свойства ЛИС и СЭД, разработанных на основе свободного ПО и доверенного системного обеспечения, практически нет. Фреймворк eLab, представляющий ЛИС с элементами СЭД, на основе СПО закрывает эту нишу.

В качестве примера крупной специализированной ЛИС можно привести программное обеспечение Информационной Системы Регулирующего Органа RAIS 3.3 Web (Regulatory Authority Information System), доступное для свободного скачивания и установки на сайте МАГАТЭ по адресу <http://www-ns.iaea.org/tech-areas/regulatory-infrastructure/rais.asp?s=3>. МАГАТЭ указывает, что данное ПО работает в более чем 70 странах мира. Несмотря на это, RAIS 3.3 не лишен существенных недостатков. Система развёртывается только на Windows с определёнными версиями SQL Server и IIS, .NET. Перевод пользовательского интерфейса не закончен. Справочники баз данных (БД), список видов деятельности существуют только на английском языке. Список производителей и список типов оборудования не включает производителей Таможенного Союза. Возможность расширения БД (добавление полей и запросов) требует от администратора системы экспертного знания MS SQL.

1.1 Свойства фреймворка eLab

Развитие компьютерных технологий, появление новых требований к объемам, сложности и скорости передачи информации, а также бурный рост мобильных приложений со специфическими требованиями на объем и форму представления информации постоянно формулируют запросы на новые грамотные эффективные алгоритмические, архитектурные и программные решения.

Фреймворк eLab представляет собой каркас программной системы, несущий в себе гнезда, в которых размещаются сменные модули и точки расширения. Это электронная система клиент-серверной архитектуры, разработанная на основе свободного ПО: Debian GNU/Linux, Web-server Apache, сервер баз данных Firebird с использованием сервера приложений PHP. Система работает под управлением операционных систем Windows и Linux через Web-интерфейс в многопользовательском режиме с разделением прав доступа посредством широко распространённых браузеров: Internet Explorer, Mozilla Firefox, Google Chrome, Opera и др. Система eLab вместе с базами данных фактически представляет собой ЛИС с элементами СЭД.

База фреймворка eLab была заложена разработкой системы электронного документооборота E-Lab в рамках Государственной программы научных исследований «Инфотех» (2006–2008). В 2008 г. на компьютерную программу «Система управления лабораторной информацией» получено свидетельство №051 Национального центра интеллектуальной собственности РБ. Система внедрена в учебный процесс ведущих вузов страны (БГУ, БГТУ, БНТУ), химико-токсикологической лаборатории Минского городского наркологического диспансера. В 2012 г. она поставлена на боевое дежурство в 202 Химмотологическом центре горячего для контроля качества и учета ГСМ Вооруженных Сил Республики Беларусь. В 2013 г. внедрена в белорусском отделении российской компании ГазПромНефть. Система работает надежно, в круглосуточном режиме без сбоев, полностью обеспечивает защиту от несанкционированного доступа и обладает высокой скоростью отклика на пользовательские запросы, обеспечивает наглядность и доступность информации, что существенно упрощает работу пользователей, не допуская их к информации, выходящей за пределы их прав доступа. Многолетняя эксплуатация eLab продемонстрировала высокий технический уровень разработки, обеспечивающей работу в соответствии с системой менеджмента качества предприятия международного стандарта ИСО/МЭК 17025-2007 «Общие требования к компетенции испытательных и калибровочных лабораторий».

1.2 Недостатки фреймворка eLab

Еще при разработке обоснования данной НИР было очевидно, что для реализации предлагаемого проекта система eLab должна быть кардинально доработана и модернизирована с целью обеспечения одновременной бесперебойной работы большого количества пользователей, а также предоставления возможностей дистанционного обучения.

В результате проведенного анализа были выявлены следующие недостатки существующей версии фреймворка eLab:

- не реализовано разграничение права доступа для пользователей системы;

- много информации хранится в куках, что ухудшает безопасность не только самой системы eLab, но и всего сервера в случае открытия доступа к системе через интернет;
- отсутствует механизм для обеспечения перехода на разные языки, т. е. существует только одна русскоязычная версия;
- DATABASE\$BUILDER – «построитель» баз данных не позволяет разрабатывать базы данных с отслеживанием версионности;
- возможности DATABASE\$BUILDER ограничены жестким сценарием создания (построения) баз данных.

Выводы:

Фреймворк eLab (версия 2012 г.) для обеспечения функциональности портала надо переделывать с ядра системы. Для упрощения и прозрачности работы по разработке баз данных надо переделывать «построитель»

1.3 Система eLab-Atom

Для выполнения данной НИР в 2014 году привлечены внебюджетные средства в объеме 13 305 долл. США (137,026 тыс. руб.), полученные по контракту №196847 «**Модернизация программного обеспечения Интегрированной информационной Системы Регулирования (РИИС) Госатомнадзора Республики Беларусь**», заключенному между НИИ ЯП и Тихоокеанской Северо-Западной национальной лабораторией (США).

Назначение и основные задачи ПО управления источниками ионизирующих излучений (ИИИ) в соответствии с действующим законодательством Республики Беларусь состоят в обеспечении и проведении регистрации радиоактивных источников, обеспечении учета и контроля состояния радиационной безопасности, отслеживании и предоставлении информации о состоянии радиоактивных источников, в том числе находящихся на хранении и захороненных, контроле обращения радиоактивных источников, обеспечении надзора за радиационной безопасностью источников ионизирующего излучения, содействии правоохранительным органам при расследовании случаев незаконного оборота радиоактивных источников и радиологических чрезвычайных ситуаций, анализе состояния безопасности при обращении с источниками ионизирующего излучения и обеспечении информированности соответствующих органов Республики Беларусь, а также уполномоченных международных организаций в соответствии с обязательствами Республики Беларусь.

На основе фреймворка eLab создано программное обеспечение Интегрированной Информационной Системы Регулирования Госатомнадзора Республики Беларусь eLab-Atom. На рисунке 1.1 приводятся экранные копии работы программы eLab-Atom.

В июне и июле 2014 г. получены свидетельства Национального центра интеллектуальной собственности РБ о регистрации компьютерной программы №677 «Система электронного документооборота испытательной лаборатории по контролю качества топлив для тепловых двигателей» и №683 «Компьютерная программа системы управления источниками ионизирующего излучения» (см. рисунок 1.2. и рисунок 1.3).

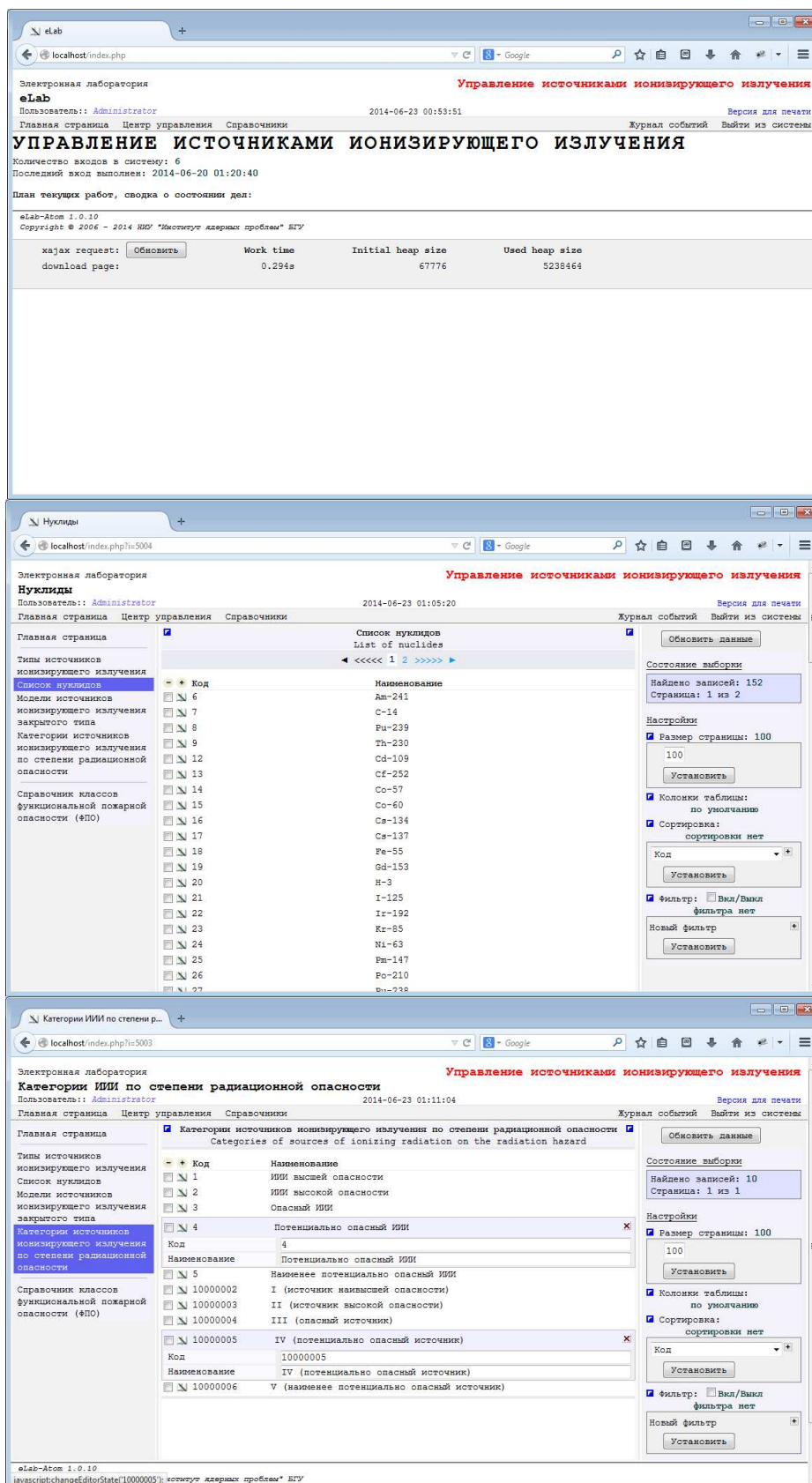


Рисунок 1.1 – Экранные копии программы eLab-Atom

РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

О РЕГИСТРАЦИИ КОМПЬЮТЕРНОЙ ПРОГРАММЫ

№ 677

Наименование компьютерной программы:
Система электронного документооборота испытательной лаборатории
по контролю качества топлив для тепловых двигателей

Правообладатель компьютерной программы:
Научно-исследовательское учреждение «Институт ядерных проблем»
Белорусского государственного университета

Год создания компьютерной программы:
2014

Автор (авторы) компьютерной программы:
Коваленко Антон Николаевич
Кулевич Никита Валерьевич
Мазаник Аркадий Леонидович
Сытова Светлана Николаевна
Черепица Сергей Вячеславович

Заявка № C20140049 Дата подачи: 10.06.2014

Дата внесения записи в
Реестр зарегистрированных
компьютерных программ: 27.06.2014

Генеральный директор
Национального центра
интеллектуальной собственности

 П.Н.Бровкин

Настоящее свидетельство выдано на основании сведений и материалов,
представленных в заявке на регистрацию компьютерной программы

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

Рисунок 1.2 – Свидетельство №677

РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

О РЕГИСТРАЦИИ КОМПЬЮТЕРНОЙ ПРОГРАММЫ

№ 683

Наименование компьютерной программы:
Компьютерная программа системы управления источниками
ионизирующего излучения

Правообладатель компьютерной программы:
Научно-исследовательское учреждение «Институт ядерных проблем»
Белорусского государственного университета

Год создания компьютерной программы:
2014

Автор (авторы) компьютерной программы:
Коваленко Антон Николаевич
Кулевич Никита Валерьевич
Мазаник Аркадий Леонидович
Черепица Сергей Вячеславович
Сытова Светлана Николаевна

Заявка № C20140056 Дата подачи: 27.06.2014

Дата внесения записи в
Реестр зарегистрированных
компьютерных программ: 08.07.2014

Генеральный директор
Национального центра
интеллектуальной собственности

 П.Н.Бровкин

Настоящее свидетельство выдано на основании сведений и материалов,
представленных в заявке на регистрацию компьютерной программы

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

Рисунок 1.3 – Свидетельство №683

2 ОБЗОР ПОРТАЛОВ ЯДЕРНЫХ ЗНАНИЙ

Источники электронной информации – это семантическая форма передачи информации, при которой информация записывается, обрабатывается и предъявляется посредством компьютерной техники.

Хак Еон Ким называет первыми электронными журналами: «Mental Workload» и «Computer Human Factors». «Mental Workload» появился в США в рамках экспериментального проекта 1970-х гг. «Электронная система информационного обмена» (Electronic Information Exchange System), «Computer Human Factors» – в Великобритании в рамках проекта «Развитие электронных сетей». До 1990-х гг. рост электронных публикаций был чрезвычайно медленным. В 1991 г. в «Указателе электронных журналов, бюллетеней и университетских электронных дискуссионных групп» (США) можно было найти лишь семь электронных научных журналов. Однако в 90-х гг. ситуация изменилась. К началу XXI века насчитывалось 3915 названий электронных журналов [8].

Первые электронные книги появились также в 1970-е гг., когда Майкл Харт с группой волонтеров начал оцифровку лучших произведений мировой литературы. Как и первые журналы, электронные тексты Харта и его группы относятся к числу «лабораторных проектов». В книжной торговле ЭИ появились лишь осенью 1998г., когда их стали издавать два коммерческих издательства: Peanut Press и Questia Media.

Рост и использование онлайн-ресурсов были вызваны изобретением Тима Б. Ли – World Wide Web (1991 г.) и появлением первого Netscape-браузера (1995 г.), заменивших прежние Gopher и Mosaic и позволивших индивидуальным пользователям свободно просматривать ресурсы Интернета [9].

По результатам исследования Research Support Libraries Group в Великобритании уже в 2001 г. 75 % исследователей в области точных и естественных наук отметили, что доступ к электронным журналам является для них абсолютно необходимым. В этот период увеличение объема комплектования ЭИ отмечается повсеместно, но лидерство принадлежит библиотекам Австралии [10]. На сентябрь 2006 г. обеспеченность образовательных учреждений Европы цифровым контентом достигла 80-96%. В настоящее время по данным ЮНЕСКО, соотношение аудиторных занятий и самостоятельной работы с интенсивным применением электронных образовательных ресурсов составляет порядка 20:80 [11].

Предложить точную и универсальную схему группировки источников электронной информации проблематично, поскольку существует огромное количество типологий, которые практически руководствуются традиционным принципом группирования информационных источников. Чаще всего электронные материалы делятся на физические и удаленные: в английском языке для них используются термины: tangible and non-tangible (в прямом переводе: осязаемые и неосязаемые). Физические ЭР представляют собой носители данных, отображенные на магнитной пленке, оптических дисках (CD, DVD). Интернет-ресурсы либо ресурсы определенной сети, доступные потребителю при прямом подключении называют неавтономными ресурсами. Имеются также смешанные либо гибридные ЭР, выпускаемые в форме физического носителя и имеющие ссылки либо на Интернет-источник, либо реализуемые в определенной сети.

Основными составляющими электронного образовательного ресурса являются:

1. Контент – это информационное наполнение электронного ресурса. Контент должен быть оптимизирован с учетом требований поисковых систем, а также отвечать целям и стратегии организации.

2. Дизайн – это цветовая гамма; шрифты; расположение ссылок, текстовых блоков и декоративных элементов; фирменные логотипы и т.д. Оформление электронного ресурса

играет большую роль. Самые известные электронные ресурсы часто узнаваемы по одному только дизайну.

3. Программное обеспечение. Большинство создаваемых сегодня электронных ресурсов – динамические. Это значит, что они интерактивны: на них присутствуют гостевые форумы, вопросы, поиск по каталогу, калькулятор для расчетов, формы обратной связи и многое другое. Чтобы все это работало, необходимо программирование, т.е. создание программ, отвечающих за работу ресурса.

Преимущества ЭР не вызывает сомнений: простота и многофункциональность поиска, максимально оперативное предоставление пользователю информации по определенной тематике, консолидация большого числа изданий в одном поисковом файле, видео- и аудиодополнения к тексту, возможности работы с электронным текстом (вырезки, копирование, перенос в собственные файлы), снижение опасности повреждения и исчезновения материалов из фондов, сокращение затрат на переплет, гиперссылки, доступ к фондам в режиме «24/7» (24 часа все 7 дней в неделю). Если говорить о вузе, то к перечню факторов следует добавить дистанционное обучение. Дистанционное обучение является формой получения знаний, при которой преподаватели и обучаемые могут находиться на значительном удалении друг от друга. Важнейшая особенность дистанционного обучения – наличие специализированной информационно-образовательной среды, обеспечивающей доставку обучаемым изучаемого материала, интерактивное взаимодействие обучаемых и преподавателей в процессе обучения, возможность самостоятельной работы по освоению учебного материала, а также механизм оценки знаний и навыков обучаемых в процессе обучения. Основу образовательного процесса при дистанционном обучении составляет целенаправленная и контролируемая самостоятельная работа обучаемого, который может учиться в удобном для себя месте, по индивидуальному расписанию, имея при себе комплект специальных средств обучения и согласованную возможность контакта с преподавателем.

Применительно к ядерной отрасли уже созданы и функционируют различные Интернет-ресурсы, в том числе информационного и образовательного характера.

2.1. Портал российской ассоциации ядерной науки и образования

Портал российской ассоциации ядерной науки и образования (РАЯНО) (<http://www.ranse.ru/>) позиционируется как инструмент для преодоления радиофобии населения, решения подготовки кадров. В тоже время, занимается накоплением, сохранением и передачей ядерных знаний.

Следует отметить, что данный портал представляет собой публичный портал для людей, интересующихся ядерной тематикой. Об этом свидетельствует содержимое панелей навигации на главной странице сайта, где представлены следующие наименования: новости, наука и образование, фотоархив, архив информационно-аналитической лаборатории, информация о РАЯНО. Основной контент представляет собой набор знаний в виде новостей, лекций, различных публикаций, фотоархивов. Особую ценность представляет набор полезных ссылок по тематике, так или иначе связанной с ядерной физикой и ядерной безопасностью.

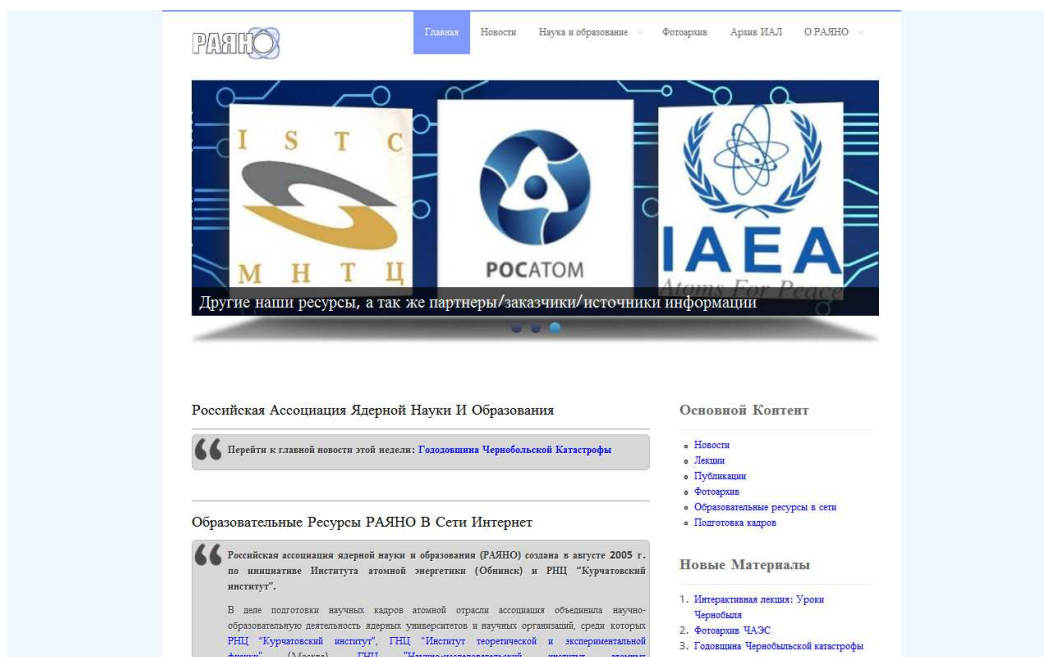


Рисунок 2.1 – Главная страница портала РАЯНО

Большое внимание уделено популяризации ресурса. Портал имеет группу «ВКонтакте» (http://vk.com/ranse_obninsk), собственный канал на видеохостинге YouTube (<http://www.youtube.com/user/RANSEvideo>).

При создании данного ресурса использовались такие средства веб-разработки как HTML5, JavaScript, jQuery, CSS3. Так же применялась система управления содержимым Drupal.

Состав и структура портала:

1. Научно-образовательный сайт Международного Центра Ядерного Образования Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (НИЯУ МИФИ) и сайт учрежденной НИЯУ МИФИ Российской Ассоциации Ядерной Науки и Образования (РАЯНО) – основа портала
2. Набор сайтов образовательной и учебно-исследовательской тематики, которые обеспечивают информационную поддержку и сопровождение процесса подготовки кадров в Институте атомной энергетики (ИАТЭ) НИЯУ МИФИ: <http://www.iate.obninsk.ru/>; <http://www.ranse.ru/ial/> – подсайт информационно-аналитической лаборатории (содержит архив информации по ядерной науке и технике, собираемый в рамках проекта РАЯНО "Незабудка"); <http://icne.iate.obninsk.ru/> – сайт Международного центра ядерного образования НИЯУ МИФИ.
3. Набор сайтов научно-исследовательской и проектной тематики, которые обеспечивают информационную поддержку и сопровождение научных исследований в ИАТЭ НИЯУ МИФИ.
4. Электронный образовательный журнал, обеспечивающий опубликование учебников, учебных и методических пособий по курсам, читаемым в ИАТЭ НИЯУ МИФИ и обеспечивающий студентов, аспирантов, иностранных учащихся современными учебными материалами. Ресурсами журнала являются оцифрованные учебные материалы, специально разработанные материалы, компьютерные программы и различные мультимедийные разработки для сопровождения очного и/или

дистанционного учебных процессов. Для данного ресурса система дистанционного обучения не реализована.

5. Новостные ресурсы, библиотечные ресурсы, интернет-видео, рубрики в профильных электронных газетах и журналах.

Структура сайта реализована следующим образом:

- На каждой странице Портала имеется переход в любой из основных разделов сайта. Переходы реализуются через меню сайта, которое выполнено в едином для всех страниц оформлении.
- Главная страница Портала разработана в едином с другими страницами стиле; содержит новостную информацию и блоки для представления наиболее интересной информации, содержащейся в разделах Портала.
- На каждой странице Портала в блоке описания присутствует стандартный набор ключевых слов для поисковых машин.

Дизайн портала:

- Портал выполнен в целостном дизайнерском оформлении. Общий стиль дизайна – минималистический, в корпоративных тонах.
- Дизайн Портала актуален по современным технологиям, удобен, не нагромождён, присутствуют высокотехнологичные интерактивные элементы (JavaScript + jQuery).
- На данный момент на сайте используется только русский язык.

Существенным недостатком является отсутствие поисковой системы (нет веб-навигации). Также отсутствует возможность регистрации на сайте. Отсюда следует: нет личного кабинета пользователя (созданного профиля пользователя), следовательно, нет возможности редактировать контент. Это может делать только администратор сайта.

2.2 Nuclear Security Science and Policy Institute

Nuclear Security Science and Policy Institute (NSSPI) представляет собой многопрофильную организацию в университете Texas A&M University. Деятельность данного института сосредоточена на организации последипломного образования, научных исследованиях и услуг, связанных с охраной ядерных материалов и сокращения ядерных угроз.

Одной из главных задач института является накопление знаний и навыков по сокращению ядерной угрозы. NSSPI имеет свой сайт, расположенный по адресу <http://nsspi.tamu.edu/>.

Указанный сайт включает в себя образовательный портал в области ядерной безопасности Nuclear Safeguards Education Portal (NSEP) – ряд образовательных ресурсов для студентов, интересующихся темой безопасности ядерных материалов. Материалы представлены в форме видеолекций. Также для пользователей ресурса доступны публикации по данной тематике.

Сайт также выполняет информационно-рекламную функцию. Здесь можно ознакомиться с последними новостями из мира ядерной безопасности, так и получить последнюю информацию о жизни института. Анализ содержимого сайта показал, что рекламная функция является преобладающей. Отсутствует регистрация. Нет никакой возможности формировать контент непосредственно пользователю. Плюсом является наличие поисковой системы по содержимому сайта.

При создании данного ресурса использовались такие средства веб-разработки как HTML5, JavaScript, jQuery, CSS3.

На каждой странице имеется переход в любой из основных разделов сайта. Переходы реализуются через меню сайтов, которое выполнено в едином для всех страниц оформлении. На каждой странице в блоке описания присутствует стандартный набор

ключевых слов для поисковых машин. Отсутствуют признаки применения какой-либо системы управления содержимым (контентом) (англ. – Content management system, CMS).



Рисунок 2.2 – Главная страница сайта NSSPI

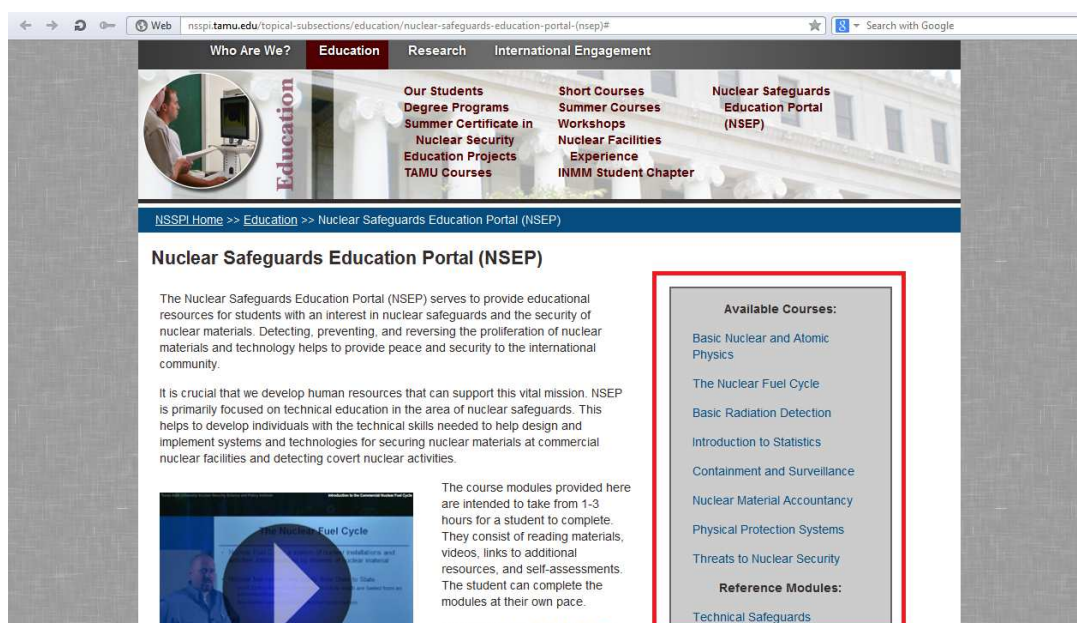


Рисунок 2.3 – Перечень курсов доступных на NSEP

2.3 Портал Российского атомного сообщества

Данный сервис представляет собой информационно-аналитический портал сообщества специалистов атомной индустрии. Тематика портала весьма широка – порядка

30-ти рубрик. Наибольшим образом освещены вопросы замыкания ядерного топливного цикла, инновационных и эволюционных АЭС, ядерной и радиационной безопасности, обращение с радиоактивными отходами и радиозащиты, отношения с общественностью и управления ядерными знаниями.

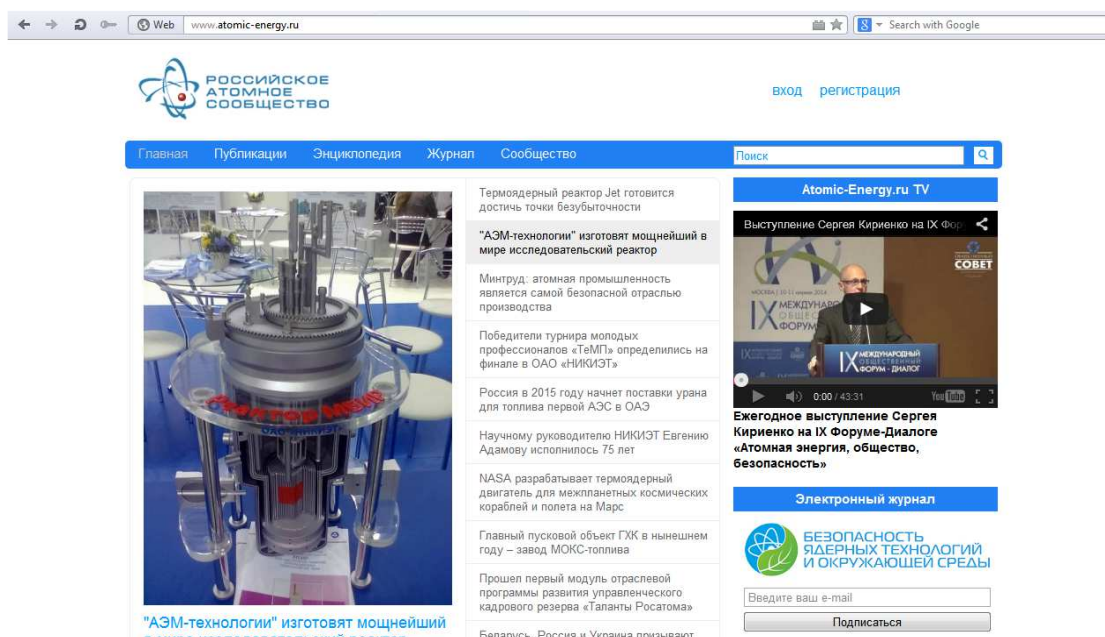


Рисунок 2.4 – Главная страница портала Российского атомного сообщества (<http://atomic-energy.ru>)

Рисунок 2.5 – Страница регистрации на портале Российского атомного сообщества

Главная страница содержит новости (разделены по категориям), обзоры печати (книги, газеты, журналы), список важных событий, главное меню (расположено традиционно «в шапке» страницы), элементы управления поискового сервиса. Имеются фоторепортажи и видеоролики.

Впечатляет список источников информации – это порядка двух сотен различных ресурсов. При этом можно точно определить, какая новость принадлежит какому новостному ресурсу.

Примечательным фактом является возможность регистрации на сайте.

Большой интерес представляет собой раздел Энциклопедия. Здесь поиск информации можно осуществлять по тематике, с помощью глоссария, по географической привязке, по дате проведения мероприятия, по персоналиям и организациям. Таким образом, можно сделать вывод о том, что в портале Российского атомного сообщества реализованы три способа доступа к хранящейся информации:

- по размещению (поиск осуществляется по иерархической структуре хранилища данных);
- по семантике (поиск осуществляется по тематическим категориям, к которым относится запрашиваемый документ (статья));
- по полнотекстовому поиску (реализуется автоматически с помощью поисковой службы по ключевым словам из базы данных).

Структура сайта реализована следующим образом:

- На каждой странице Портала имеется переход в любой из основных разделов сайта. Переходы реализуются через меню сайтов, которое выполнено в едином для всех страниц оформлении.
- Главная страница Портала разработана в едином с другими страницами стиле; содержит новостную информацию и блоки для представления наиболее интересной информации, содержащейся в разделах Портала.
- На каждой странице Портала в блоке описания присутствует стандартный набор ключевых слов для поисковых машин.

Дизайн портала:

- Общий стиль дизайна – минималистический, в корпоративных тонах.
- Дизайн Портала актуален современным технологиям, удобен, не нагромождён, присутствуют высокотехнологичные интерактивные элементы (JavaScript + jQuery, AJAX). При создании портала применялась CMS Drupal.
- На данный момент на сайте используется только русский язык.

Таким образом, данный портал представляет собой полноценную систему хранения и воспроизведения ядерных знаний, имеющий богатую базу данных. В тоже время, отсутствует возможность осуществления дистанционного обучения. По сути – это большая база знаний, которая динамически обновляется. Но обновление осуществляется администраторами ресурса, а не пользователями. Здесь не реализована система управления содержимым, т.е. пользователи не могут создавать собственные разделы портала, формировать структуру и наполнять необходимой информацией. Нет службы персонализации, которая бы обеспечивала защиту конфиденциальной информации за счет авторизации пользователей и разделения прав доступа, а также возможность пользователю настроить интерфейс под свои нужды. Отсутствует такая функция, как совместная работа. Пользователи портала не могут взаимодействовать между собой, совместно использовать информационные ресурсы портала и организовывать совместную работу над общими проектами. Минусом является отсутствие карты портала, которая могла бы демонстрировать пользователю полное дерево иерархии разделов портала и позволяла бы перемещаться по ним.

2.4 International Nuclear Security Education Network

Ресурс International Nuclear Security Education Network (INSEN) находится на этапе разработки. Он будет создаваться группой экспертов различных международных организаций, ассоциациями по управлению ядерными материалами, объединениями

различных научно-исследовательских институтов и при участии МАГАТЭ для обеспечения устойчивого создания знания по ядерной безопасности.

Миссией сети является повышение глобальной ядерной безопасности путем разработки, распространения и продвижения передового опыта в области образования по ядерной безопасности.



Рисунок 2.6 – Начальный этап создания INSEN

Основными задачами данной сети будет:

- ✓ Развитие учебных материалов, компьютерных средств на основе учебно-методических пособий, в том числе упражнений и материалов для проведения лабораторных работ.
- ✓ Повышение уровня образования в области ядерной безопасности путем обмена преподавателями; совместной разработкой и реализацией углубленных учебных программ по ядерной безопасности.
- ✓ Совместные исследования и разработки.

Роль создаваемого портала:

- коммуникационная платформа для обмена информацией и опытом для всех членов INSEN;
- опубликование информации о миссии, структуре, членах и деятельности INSEN;
- в качестве базы данных для хранения ядерных знаний;
- в качестве базы данных для институтов и членов/экспертов;
- для внесения поправок и комментариев в существующую документацию по тематике, касающейся данного портала;
- как календарь для различных научных мероприятий, встреч, семинаров и конференций;
- для различных объявлений (вакансии, стипендии, стажировки, новости).

В будущем планируется внедрить форумы, чаты, ленты новостей, опросы, интеграция с другими источниками данных МАГАТЭ.

При создании применялись такие средства, как ASP.NET, JavaScript, jQuery, HTML5, CSS3.

2.5 Asian Network for Education in Nuclear Technology

Asian Network for Education in Nuclear Technology (ANENT) представляет собой азиатскую образовательную сеть в области ядерных технологий. Является региональным объединением, широко которое широко сотрудничает с МАГАТЭ. Объединяет в себе компьютерные сети научно-исследовательских институтов и других образовательных учреждений азиатского региона. Данное региональное партнерство предназначено для распространения знаний и информации о ядерных технологиях для самой широкой аудитории.

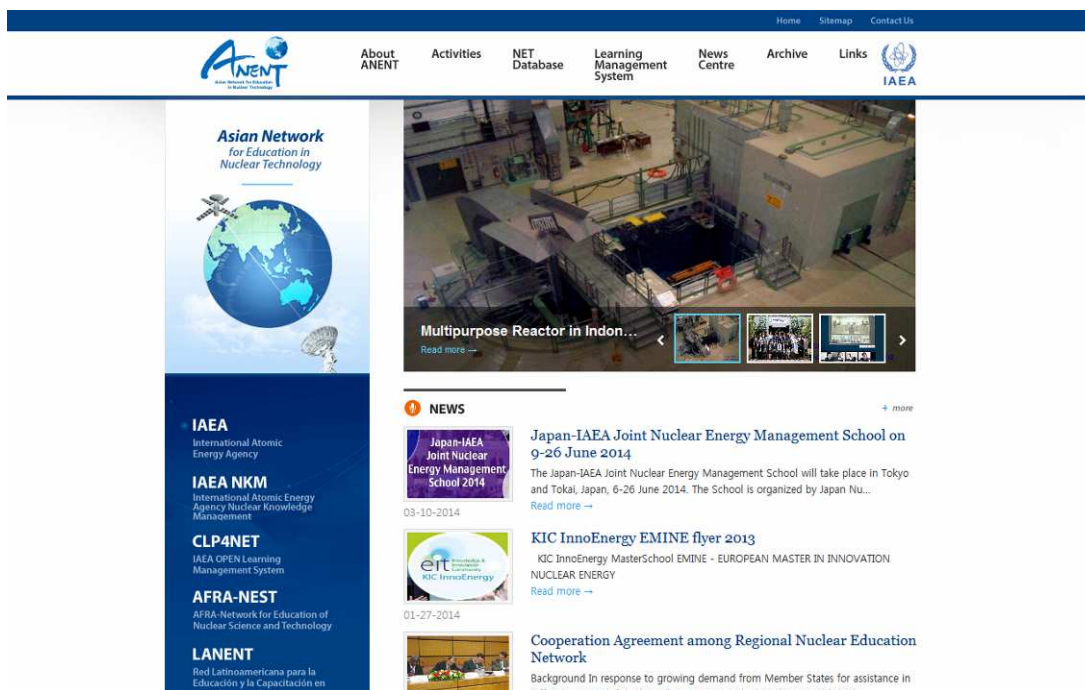


Рисунок 2.7 – Главная страница ANENT

Исходя из содержимого данного ресурса, можно сделать вывод, что ANENT предназначен для:

- обеспечения эффективного механизма по развитию людских ресурсов,
- укрепления научной инфраструктуры,
- развития сети учреждений в Азиатско-Тихоокеанском регионе,
- повышения уровня образования в области ядерных знаний, профессиональной подготовки, управления знаниями, и связанных с ними научно-исследовательских работ в данном регионе.

Особое внимание на себя обращает тот факт, что данный портал интегрирован с системой дистанционного обучения (СДО), разработанной МАГАТЭ.

При создании данного ресурса использовались такие средства веб-разработки как PHP, HTML5, JavaScript, jQuery, CSS3.

Состав портала:

- информационные блоки,
- база знаний (NET Database). Находится на стадии разработки. Будет включать в себя различные учебные курсы, ядерное образование, темы для диссертаций, всевозможные учебные материалы,

- архив,
- список полезных ссылок и контактов,
- СДО МАГАТЭ.

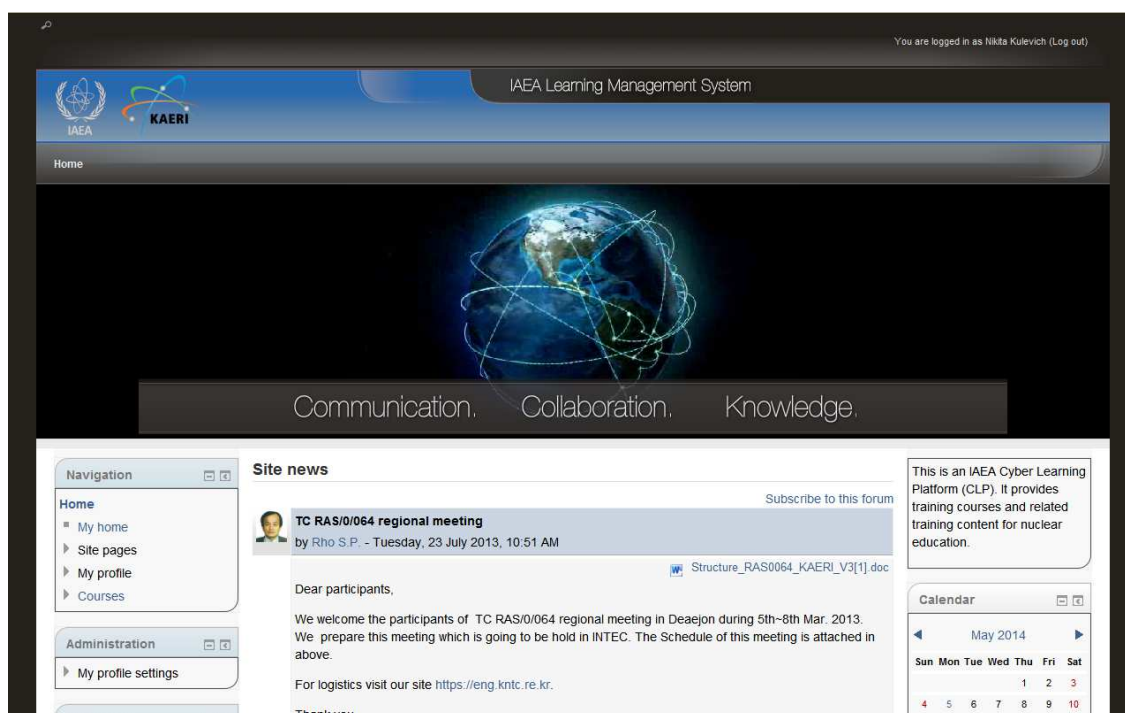


Рисунок 2.8 – Личный кабинет зарегистрированного пользователя в СДО МАГАТЭ (IAEA LMS)

Структура сайта реализована следующим образом:

- На каждой странице Портала имеется переход в любой из основных разделов сайта. Переходы реализуются через меню сайта, которое выполнено в едином для всех страниц оформлении.
- Главная страница Портала разработана в едином с другими страницами стиле; содержит новостную информацию и блоки для представления наиболее интересной информации, содержащейся в разделах Портала.
- На каждой странице Портала в блоке описания присутствует стандартный набор ключевых слов для поисковых машин.

Дизайн портала:

- Портал выполнен в целостном дизайнерском оформлении. Общий стиль дизайна – минималистический, в корпоративных тонах.
- Дизайн Портала актуален современным технологиям, удобен, не нагромождён, присутствуют высокотехнологичные интерактивные элементы (JavaScript + jQuery).
- На данный момент на сайте используется только английский язык.

Имеется карта сайта.

2.6 European Nuclear Education Network

Портал European Nuclear Education Network (ENEN) позиционирует себя как платформа для расширения сотрудничества в сфере ядерного образования и подготовки студентов, исследователей и специалистов в данной сфере в странах ЕС.

Целью является обеспечение высокого качества подготовки кадров в сфере ядерного образования. Стремится повысить заинтересованность у студентов, исследователей и специалистов в области ядерной физики.

Исходя из анализа содержимого портала, можно сделать вывод, что он является в первую очередь образовательным ресурсом. Очень много информации для студентов и преподавателей.

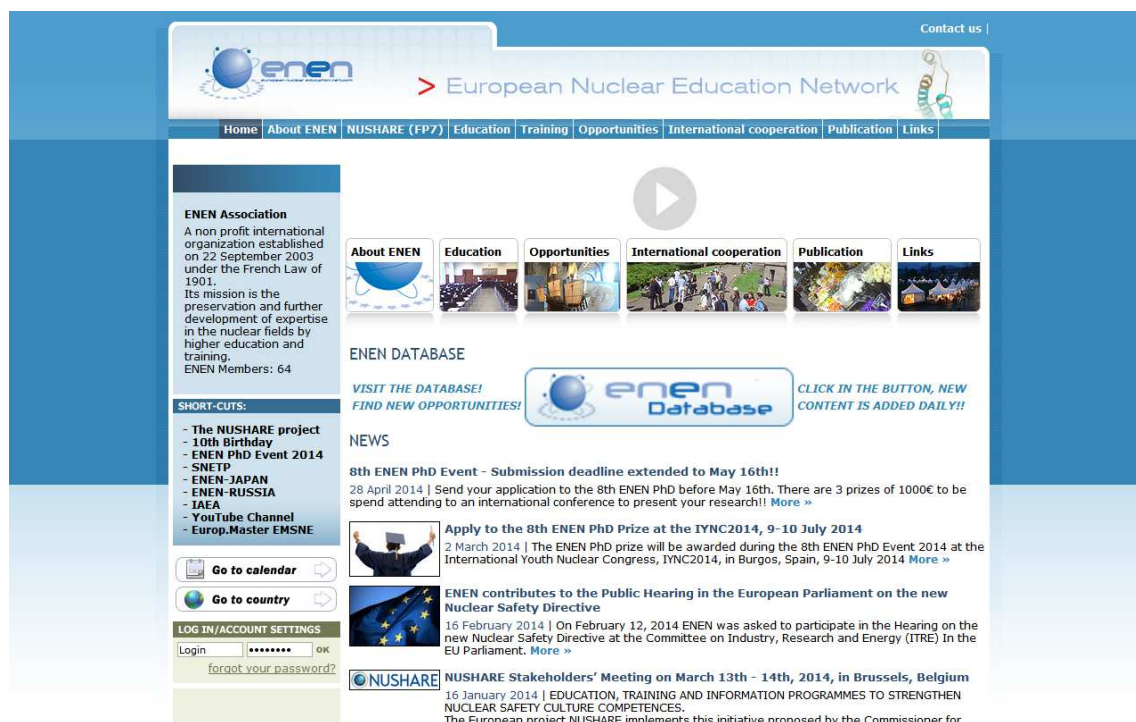


Рисунок 2. 9 – Главная страница портала ENEN

При создании данного ресурса использовались такие средства веб-разработки как PHP, HTML5, JavaScript, jQuery, CSS3.

Состав портала:

- информационные блоки,
- образовательные ресурсы, включающие в себя различные учебные курсы, ядерное образование, темы для диссертаций, всевозможные учебные материалы,
- архив,
- список полезных ссылок и контактов.

Структура сайта реализована следующим образом:

- На каждой странице Портала имеется переход в любой из основных разделов сайта. Переходы реализуются через меню сайта, которое выполнено в едином для всех страниц оформлении.
- Главная страница Портала разработана в едином с другими страницами стиле; содержит новостную информацию и блоки для представления наиболее интересной информации, содержащейся в разделах Портала.
- На каждой странице Портала в блоке описания присутствует стандартный набор ключевых слов для поисковых машин.

Дизайн портала:

- Портал выполнен в целостном дизайнерском оформлении. Общий стиль дизайна – минималистический, в корпоративных тонах.

- Дизайн Портала актуален современным технологиям, удобен, не нагромождён, присутствуют высокотехнологичные интерактивные элементы (JavaScript + jQuery).
 - На данный момент на сайте используется только английский язык.
- Имеется система регистрации пользователей. Реализована собственная СДО.

2.7 AFRA-Nework for Education of Nuclear Science and Technology

Цели и задачи портала AFRA-Nework for Education of Nuclear Science and Technology (AFRA–NEST) <http://afra-nest.gaecgh.org/index.PHP> во многом перекликаются с аналогичными сервисами в других частях света. Это неудивительно, так как все подобные ресурсы создаются при поддержке и активном участии МАГАТЭ.

Очевидно, что данный портал также находится на стадии разработки, так как, например, при выборе любого пункта меню Event, мы переходим на тестовые страницы. Реализуемая поисковая система также находится в нерабочем состоянии.

Структура сайта реализована стандартным образом:

- На каждой странице Портала имеется переход в любой из основных разделов сайта. Переходы реализуются через меню сайта, которое выполнено в едином для всех страниц оформлении.
- Главная страница Портала разработана в едином с другими страницами стиле; содержит новостную информацию и блоки для представления наиболее интересной информации, содержащейся в разделах Портала.
- На каждой странице Портала в блоке описания присутствует стандартный набор ключевых слов для поисковых машин.

Указанный ресурс находится на этапе создания. На данный момент наполнения знаниями практически нет никакого.



Рисунок 2.10 – Главная страница AFRA – NEST

2.8 Международная ядерная информационная система INIS (ИНИС)

Сегодня ведущей международной информационной системой в области мирного использования атомной энергии является ИНИС. Английская аббревиатура ИНИС означает International Nuclear Information System – Международная система ядерной информации. Система образована в 1970 году и поддерживается Международным агентством по атомной энергии МАГАТЭ при участии более чем 150 членов. На сегодня это 128 государств и 24 международные организации. Миссией ИНИС является сбор, обработка, сохранение и распространение библиографических сведений о публикуемой в мире литературе по мирному использованию ядерной энергии и технологий, а также полнотекстовых документов «серой», или неконвенциональной, литературы. Тематический охват ИНИС — это ядерная техника и технологии, ядерная безопасность и радиационная защита, применение ядерных и изотопных технологий; смежные науки, имеющие отношение к ядерным исследованиям, прикладные исследования (воздействие радиации и радиоизотопов в биологии, химии, науках о материалах и о Земле); физика (ядерная, элементарных частиц, атомная и молекулярная, плазмы, конденсированных сред (ядерные аспекты)), химия (радиационная, аналитическая, ядерная, радиохимия); правовые аспекты, безопасность и нераспространение; экологические и экономические аспекты ядерных и неядерных источников энергии. Коллекция ИНИС насчитывает сегодня более 3,5 млн библиографических записей и около 500 тыс. полнотекстовых документов. Все записи содержат ключевые слова (дескрипторы), а большинство — рефераты на английском языке. Тезаурус ИНИС, охватывающий более 30 тыс. терминов, — еще один важный информационный продукт, который создает ИНИС. Это основной инструмент, применяемый для описания ядерной информации и знаний в структурированном виде, а также для поиска информации. Многоязычный тезаурус публикуется на восьми языках на сайте ИНИС. Коллекция ИНИС, электронный библиографический каталог библиотеки МАГАТЭ и база данных по совещаниям МАГАТЭ в области ядерной энергетики (IAEAMoAEdatabase) доступны через поисковую систему INIS Collection Search (ICS), построенную на базе технологий Google Search Appliance. Это «простой» и «продвинутый» поиск с помощью мультязычного пользовательского интерфейса, поддерживающего поиск на восьми языках (английском, арабском, испанском, китайском, немецком, русском, французском, японском); поиск по полному тексту и метаданным; перевод записей с помощью переводчика Google; интеграция с многоязычным тезаурусом и справочными изданиями ИНИС; управление профилями пользователей и поисковыми запросами; скачивание ссылок на источники; экспорт результатов поиска в разных форматах и др. Удобна автоматическая фильтрация поисковых результатов по годам, по странам и организациям и по языку публикаций. Согласно статистике, ежемесячно к ICS происходит около 50 тыс. поисковых обращений. INIS Collection Search доступна на сайте ИНИС МАГАТЭ: <http://www.iaea.org/inis/>. Для быстрого доступа к ICS разработан специальный виджет [12].

Беларусь является одним из организаторов системы и самостоятельно представлена в ней с 1992 года. В Международном экологическом университете имени А.Д.Сахарова создан белорусский центр ИНИС. В национальном центре ИНИС любой специалист, аспирант или студент может получить доступ к базе данных ИНИС на компакт-дисках и сделать копию труднодоступной литературы. Вторая копия базы данных доступна в Институте радиологии (г. Гомель). Лицензию на бесплатный доступ к базе данных ИНИС в интернете имеет физический факультет Белорусского государственного университета.

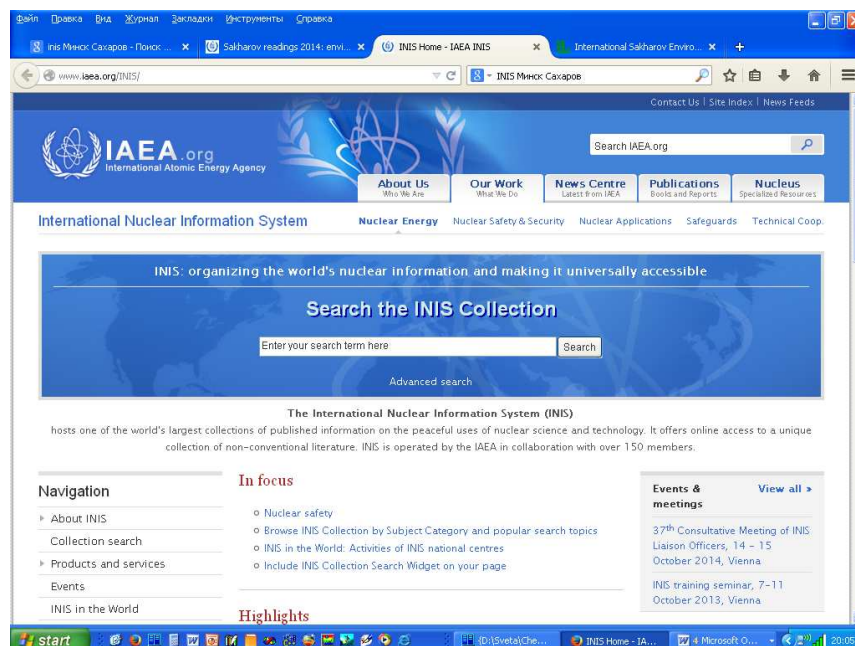


Рисунок 2.11 – Главная страница INIS

2.9 Белорусские сайты

В Беларуси в настоящее время существует несколько сайтов, предоставляющих фрагментарную информацию по ядерной тематике, далекую от полноты.

На рисунке 2.12 представлен сайт РУП «Белорусская атомная электростанция» по адресу <http://www.dsae.by/>.

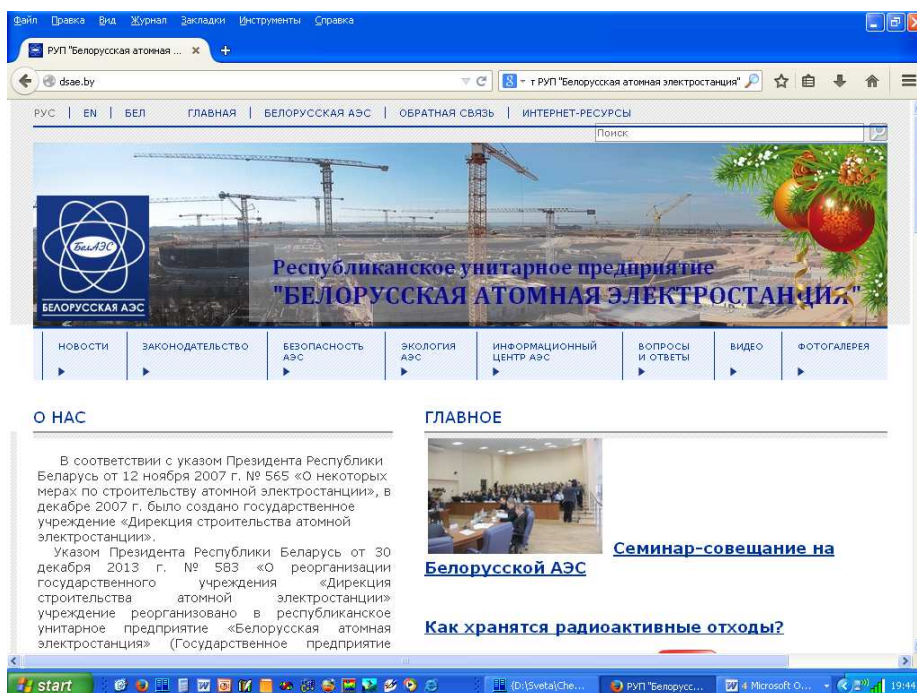


Рисунок 2.12 – Сайт Белорусской АЭС

Ее наполнение, однако, далеко от завершения, что неудивительно в связи с короткой историей этого сайта. Вот что высвечивается при попытке зайти в раздел Законодательство (ср. 2014 и 2015 год – на рисунке 2.12):

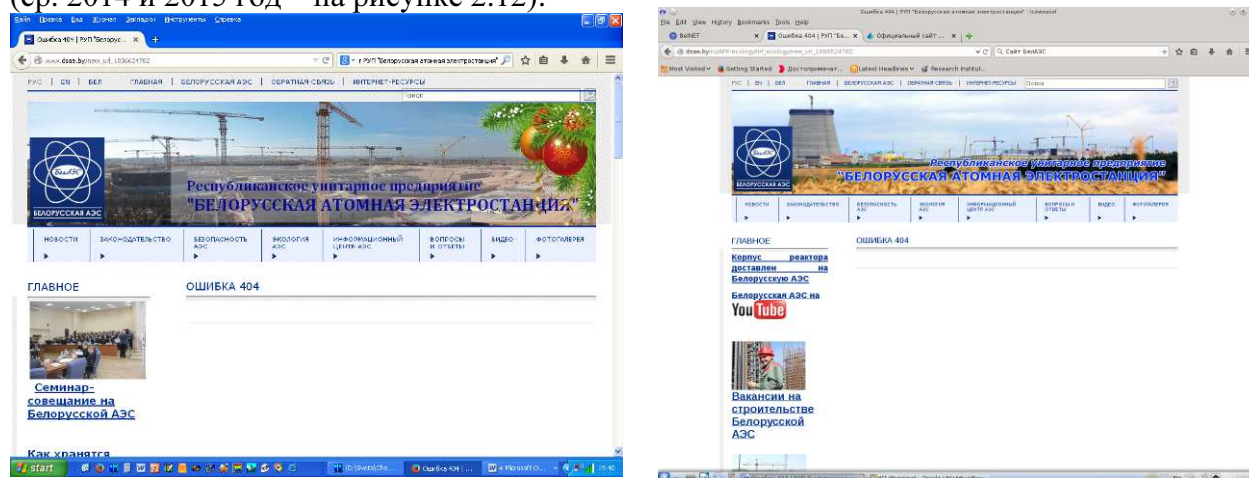


Рисунок 2.13 – Сайт Белорусской АЭС (28.12.2014 – слева) (28.12.2015 – справа)

Среди других сайтов по ядерной тематике назовем сайты Департамента по ядерной и радиационной безопасности Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь – Госатомнадзор по адресу: <http://www.gosatomnadzor.gov.by> и Министерства энергетики РБ www.minenergo.gov.by.

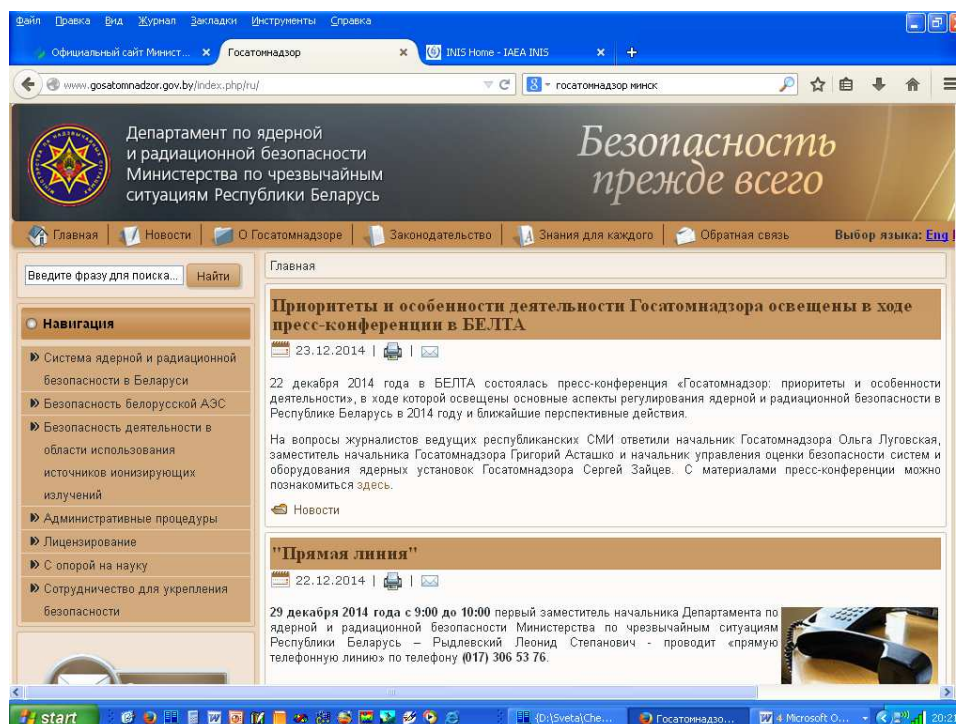


Рисунок 2.14 – Интернет-страница Госатомнадзора Республики Беларусь

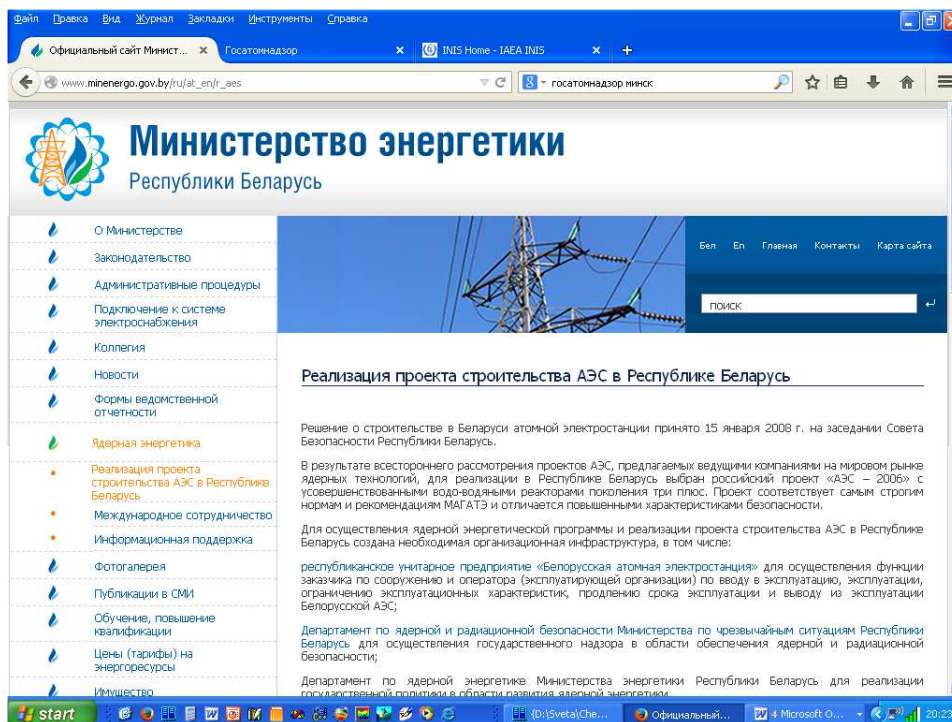


Рисунок 2.15 – Интернет-страница Министерства энергетики Республики Беларусь

Интересные новости и информацию предоставляет сайт БелТА: Белорусская АЭС – Атомная энергетика – Новости <http://atom.belta.by>.

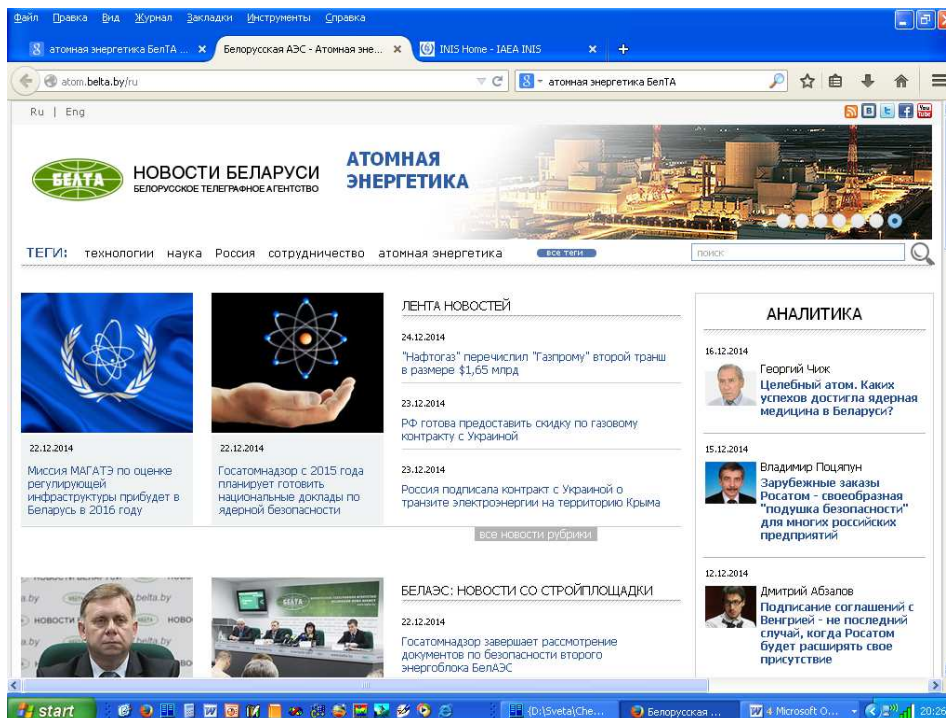


Рисунок 2.16 – Сайт БелТА: Белорусская АЭС – Атомная энергетика

2.10 Web 2.0 для образования и обмена информацией

Как известно, история современного Интернета началась в США в 60-х годах. Можно выделить 4 условных этапа технологического развития Интернета:

1. Возникновение **файловых архивов** – информационных источников (60 гг. XX века).

2. Формирование связанной **информационной паутины**, построенной на принципах гипертекста. Термин «гипертекст» был введен Тедом Нельсоном в 1965 году и предполагал возможность ветвления текста и связывания фрагментов в единое целое, благодаря системе ссылок. Средствами доступа к информации стали специальные программы – браузеры, обеспечивавшие доступ к большому количеству информации, контроль над которой оставался за владельцами серверов, формирующих гипертекстовую паутину (начало 90-х гг. XX века).

3. Появление **расширенных коммуникационных сервисов**, позволяющих осуществить как приватное межличностное взаимодействие (мессенджеры – клиенты сетей мгновенных сообщений (напр., ICQ), электронная почта), так и групповые формы взаимодействия (форумы, доски объявления, группы новостей). В случае группового взаимодействия появляются дополнительные коллективные эффекты, связанные с накоплением знаний, мнений и опыта, представленного в обсуждениях (конец 90-х гг. – начало XXI века).

4. Существенный сдвиг в развитии Интернета произошёл с появлением группы **сервисов, основанных на активном участии пользователей в формировании контента**. Основное внимание здесь уделяется организации взаимодействия между пользователями сервиса в виде публичного обмена информационными ресурсами (текстовыми сообщениями, фотографиями, видеофрагментами и др.), взаимного оценивания и маркировки содержания. Эти сервисы получили название «социальных сервисов» и составили основу современной концепции развития сети Интернет, которая получила название Web 2.0. Основным источником информации в Web 2.0 являются обычные пользователи, каждый из которых может принять участие в развитии сети [13–15].

Следует отметить, что все стадии развития Интернета проходили не последовательно, а по принципу взаимодополнения: файловые архивы, гипертекстовая природа Сети, коммуникационные сервисы и теперь Веб 2.0 существуют параллельно.

Второму вебу предшествовал первый, в котором контент создавался экспертным сообществом профессионалов. Это был статический интернет для читателей (например, tut.by). В образовательной сфере его можно было использовать только по схеме «преподаватель-студент». Второй веб позволяет создавать гибридный контент, сочетающий текстовый формат с графическим, цветовым, визуальным или звуковым. Пользователь имеет возможность проявить собственную активность: загрузить фотографии или видеоролики (Flickr и YouTube и др.), опубликовать свою статью (например, блоги и др.), разместить свои анкетные данные (ВКонтакте, Одноклассники.Ру и др.). То есть Веб 2.0-сайт, не являясь изначально коллекцией контента, постепенно – за счет высокой пользовательской активности – становится интересен и значим. В противоположность Веб 1.0, Веб 2.0-сайт может быть охарактеризован как площадка, инструмент, который пользователь может использовать для своих нужд. При этом при использовании Веб 2.0 в образовательной среде работают схемы «преподаватель-студент, студент-преподаватель, преподаватель-преподаватель и студент-студент».

Термин «Веб 2.0» появился в сентябре 2005 года, его автором принято считать Тима О'Рейли – руководителя издательской компании O'Reilly Media и сторонника движения за свободное программное обеспечение. В своей статье «What Is Web 2.0» под заголовком «Что такое Веб 2.0») Тим О'Рейли определил «Веб 2.0» как методику проектирования

систем, которые путем учета сетевых взаимодействий становятся тем лучше, чем больше людей ими пользуются.

Основными функциональными сервисами Веб 2.0 являются следующие сервисы:

1. **Совместный поиск информации** (<http://www.swicki.com> <http://www.rollyo.com>, <http://google.com>).

2. **Совместное хранение закладок.** Это продолжение и логическое развитие идеи закладок (ссылок на избранные сайты) в «Избранном» браузера. В отличие от таких закладок, социальные закладки хранятся не на компьютере пользователя, а на сервере в Интернете. Преимущества такого похода: доступ к своей коллекции «Избранного» с любого компьютера, подключенного к Интернету; возможность поделиться своими закладками с другими пользователями; закладки можно систематизировать с помощью категорий или меток (<http://del.icio.us>, <http://bobrdobr.ru>, <http://rumarkz.ru>, <http://memori.ru>)

3. **Совместное хранение медиафайлов.** *Фотохостинг.* Существуют сайты, позволяющие публиковать любые изображения (напр., цифровые фотографии) в Интернет. Фотохостинги служат для размещения, хранения и показа изображений другим пользователям Сети. Это удобное средство демонстрации фотографий. При размещении на фотохостинге каждому фото присваивается уникальный адрес. Автор снимка может легко поделиться гиперссылкой, ведущей на фотографию, с любым человеком, имеющим доступ в Интернет, а также разместить её на своем сайте. (<http://flickr.com>, <http://www.panoramio.com>, <http://flamber.ru>, <http://picasaweb.google.com>). *Видеохостинг.* Сайт, позволяющий загружать и просматривать видео в браузере через специальный Flash-плеер. (<http://youtube.com>, <http://www.teachertube.com>, <http://www.l-vision.ru>).

4. **Создание и редактирование документов.** Онлайн-офис может быть доступен с любого компьютера, у которого есть доступ в Интернет, независимо от того, какую операционную систему он использует. Это позволяет людям работать вместе по всему миру и в любое время, что ведет к созданию международных виртуальных команд для совместной работы над проектами. Можно совместно создавать или взаимно редактировать самые разные документы (см. список с адресами сервисов, предназначенных для совместного редактирования). *Презентации* (<http://scratch.mit.edu>, <http://slideshare.net>, <http://slideshare.net>, <http://www.alice.org>, <http://zoho.com>, <http://docs.google.com>) *Текстовые документы* (<http://www.scribd.com>, <http://docs.google.com>) *Блог* – сайт, основное содержимое которого — регулярно добавляемые авторские записи, изображения. Для блогов характерны недлинные записи временной значимости, отсортированные в обратном хронологическом порядке (последняя запись сверху). Отличия блога от традиционного дневника обуславливаются средой: блоги обычно публичны и предполагают сторонних читателей, которые могут вступить в публичную полемику с автором (в отзывах к блог-записи или своих блогах). (<http://www.livejournal.com>, <http://www.blogger.com>)

5. **ВикиВики** – сайт, структуру и содержимое которого пользователи могут сообща изменять с помощью инструментов, предоставляемых самим сайтом. Крупнейший и известнейший вики-сайт — Википедия. Вики характеризуется следующими признаками:

- возможность многократно править текст посредством самой вики-среды (сайта), без применения особых приспособлений на стороне редактора;
- особый язык разметки — так называемая **вики-разметка**, которая позволяет легко и быстро размечать в тексте структурные элементы и гиперссылки,
- форматировать и оформлять отдельные элементы;
- учёт изменений (версий) страниц: возможность сравнения редакций и восстановления ранних;
- проявление изменений сразу после их внесения;
- множество авторов: вики могут править все посетители сайта (<http://ru.wikipedia.org>, <http://www.mediawiki.org>, <http://www.dokuwiki.ru>).

6. **Диаграмма связей** (от англ. *mind maps* – интеллект-карта, карта памяти, карта ума). Это способ изображения процесса общего системного мышления с помощью схем. Может рассматриваться как удобная техника альтернативной записи. Диаграмма связей реализуется в виде древовидной схемы, на которой изображены слова, идеи, задачи или другие понятия, связанные ветвями, отходящими от центрального понятия или идеи. В основе этой техники лежит принцип «радиантного мышления», относящийся к ассоциативным мыслительным процессам, отправной точкой или точкой приложения которых является центральный объект. Диаграммы связей используются для создания, визуализации, структуризации и классификации идей, а также как средство для обучения, организации, решения задач, принятия решений, при написании статей. (<http://freemind.sourceforge.net>, <http://www.mindmeister.com>, <http://bubbl.us>, <http://www.mindomo.com>).

7. **Социальные сети** – сайты с возможностью указать какую-либо информацию о себе (дату рождения, школу, вуз, любимые занятия и другое), по которой страницу пользователя смогут найти другие участники сети. Одна из обычных черт социальных сетей — система «друзей» и «групп». Социальные сети предназначены для выстраивания онлайн-сообществ людей, объединенных какой-либо деятельностью (интересами) и заинтересованных в ее распространении. (<http://odnoklassniki.ru>, <http://vkontakte.ru>, <http://www.linkedin.com>, <http://www.facebook.com>, <http://www.privet.ru>).

8. **Мэшаны** – это веб-приложения, объединяющие данные из нескольких источников в один интегрированный инструмент: *географические* (<http://wikimapia.org>, <http://sketchup.google.com>, <http://www.unype.com>, <http://earthify.org>); *фотографические* (<http://www.locr.com>, <http://www.comeeko.com>, <http://www.netvides.com>).

9. **Общение в 3D** (трёхмерной реальности) (<http://secondlife.com>).

Опыт использования Веб 2.0-технологий в образовании в РФ и Беларуси пока незначителен. Первая конференция («Веб 2.0: Социальные сервисы для науки, образования, бизнеса и искусства», <http://www.web2conf.ru>), частично затрагивавшая эти вопросы с точки зрения образования, была проведена в апреле 2007 года в Москве, в марте 2008 года компанией Google была проведена конференция «Образование 2.0» (<http://www.googleconference.ru>). В Санкт-Петербурге в конце 2008 года в РЦОКОиИТ начато обучение по программе «Веб 2.0 – технологии педагогического взаимодействия» [13, 14].

2.11 Технология подкастинга

Инструментов у Web 2.0 достаточно много (Wikis, Blogs, Google Tools, Video Conferencing etc.), но наиболее интересными с точки зрения использования в образовательном пространстве с нашей точки зрения являются подкасты (Podcasts).

Концепцию подкастинга предложил бизнесмен и писатель интернет-страниц Тристан Луис в 2000 г. Слово “Podcast” было официально включено в Оксфордский словарь в 2004 г., а в декабре 2005 г. по данным BBC News было названо словом года. Оксфордский словарь дает следующее определение термину “подкастинг”: “Цифровая запись радиопередачи или другой подобной программы, доступная в Интернете для скачивания на персональный аудиоплеер” [13,14].

Подкастинг представляет собой технологию записи и трансляции аудио- и видеофайлов в Интернет. Создаваемые продукты в этой технологии называются подкастами и представляют собой записи в формате MP3, размещенные в сети, с описанием, содержащим информацию о файлах (автор, размер, дата обновления и веб-ссылка на аудиозапись). Существует несколько типов подкастов: аудиоподкасты, предполагающие только наличие звука; так называемые улучшенные подкасты (enhanced podcasts), в которых

к звуку добавлено изображение типа слайд-шоу; видеоподкасты, включающие аудио и видео; объединенные подкасты (combined podcasts) – медиа файлы – сочетание MP3 и MP4 файлов.

Следует отметить, что технология подкастинга рекомендована порталом EDUCAUSE как одна из наиболее перспективных технологий в процессе обучения. На Западе преподавателей обучают технике создания собственных подкастов и методике их применения в учебном процессе. В университетах оборудуются специальные аудитории для видеозаписи лекций. Появилось даже новое направление в педагогике «Podogogy» («подогогика») – педагогика подкастинга [15–17].

В целом в педагогике рассматриваются возможности подкастинга как средства:

- доставки учебных материалов учащимся;
- получения аутентичной информации студентами;
- распространения административно-организационной информации;
- повторения и закрепления пройденного материала;
- подготовки студентов к лекциям и семинарам (прекасты).

Главными свойствами подкастинга являются звуковая природа, мультимедийность, эффективная организация информационного пространства и времени, интерактивность, простота использования и доступность.

Прежде всего, следует отметить звуковую природу подкастов. Такие особенности устной речи, как интонация, тембр, скорость, громкость, способствуют лучшей коммуникации, воздействуют на эмоции, делают содержание сообщения более личностно значимым.

Мультимедийный характер подкастинга подтверждается существованием различных типов подкастов: аудиоподкастов, видеоподкастов (водкастов), расширенных подкастов (enhanced podcasts), сочетающих в себе аудио с другими формами представления информации, такими, как текст, изображение, видео, графика, анимация.

Следующее свойство подкастинга является одним из ключевых и значительно расширяет его образовательные возможности. В зарубежной литературе существует несколько вариантов его названия: мобильность, портативность, пространственная и временная гибкость, возможность временного и пространственного сдвига. Суть данного свойства состоит в том, что позволяет прослушивать записи в любое время в любом месте любое количество раз с любой скоростью, а также автоматически получать обновления на свой компьютер или MP3-проигрыватель. Благодаря этому подкастинг создает не имеющее границ учебное пространство, что позволяет увеличить время, которое учащиеся могут посвятить изучению материала. Данное дидактическое свойство подкастинга можно определить как эффективная организация информационного пространства и времени.

Одним из основных свойств подкастинга является интерактивность, которая дает возможность общаться, высказывать свое мнение и узнавать мнение партнера по общению.

Простота использования и доступность подкастов обеспечиваются широким распространением компьютерных технологий и мобильных устройств, относительно малой стоимостью необходимого оборудования для создания подкастов, возможностью их бесплатной публикации, хранения и распространения.

3 ПОРТАЛ ЯДЕРНЫХ ЗНАНИЙ BelNET

Исполнителями данной НИР предложено краткое название разрабатываемого портала **BelNET** – *Belarusian Nuclear Education and Training*, которое ляжет в основу интернет-адреса портала.

С начала 2000-х годов МАГАТЭ уделяет огромное внимание управлению ядерными знаниями, в том числе разработке специализированных порталов ядерных знаний на различных уровнях. В результате этой работы в мире постепенно складывается единое информационное пространство в области ядерных знаний. Развитие атомной отрасли Беларуси ставит задачи подготовки квалифицированных специалистов в соответствующих областях науки и технологий, в том числе ядерной, нейтронной и реакторной физики, физики ионизирующих излучений, применении ядерно-физических методов в различных областях науки и техники, ядерной медицины и т. д. В связи с этим актуальным является создание в стране портала управления ядерными знаниями.

Предложения по созданию учебно-научного портала ядерных знаний, который бы в перспективе мог перерасти в общенациональный портал, содержатся в [18, 19] и были доложены в 2013 г. на IV Конгрессе физиков Беларуси (24–26 апреля 2013 г., Минск), X Международной школе-семинаре «Актуальные проблемы физики микромира» (Actual Problems of Microworld Physics), Гомель, июль 2013 г., Международном конгрессе по информатике «Информационные системы и технологии – CSIST’2013» (4–7 ноября 2013 г., Минск), международном совещании «Реализация информационной и коммуникативной стратегии Госатомнадзора путем создания и развития соответствующей программно-технической инфраструктуры», проведенном Обществом по технической и ядерной безопасности (GRS) (16–17 декабря 2013 г., Берлин, Германия).

3.1 Концепция и информационная модель портала ядерных знаний BelNET

Социально-экономическая значимость и необходимость создания портала ядерных знаний BelNET заключается в обеспечении быстрого доступа к необходимой информации, накоплении, сохранении и преумножении знаний на уровне, обеспечивающем безопасное, устойчивое и эффективное развитие ядерной энергетики и промышленности страны, а также популяризации ядерных знаний с целью привлечения в эту область способных молодых людей и создания позитивного имиджа ядерной энергетики.

Портал станет системой, объединяющей информационные ресурсы (приложения, базы данных и др.) и позволяющей создателям и потребителям знаний взаимодействовать друг с другом, предоставляя им единый защищенный доступ к информации и виртуальные каналы коммуникаций для совместной работы над документами из географически разнесенных мест через единый web-интерфейс в режиме коллективной работы со строгой персонализацией (разграничением права доступа к ресурсам: данным, сервисам, приложениям, документам) (см. рисунок 3.1). Основное отличие проектируемого портала от обычного веб-сайта – наличие интерактивных сервисов (почта, новости, форумы, инструменты для совместной и индивидуальной работы пользователей и т.д.).

Следует подчеркнуть, что процесс наполнения портала информацией и заполнения базы знаний ядерными знаниями, разработка специализированных материалов для системы дистанционного обучения, создание которой предполагается в рамках портала – процесс очень трудоемкий и длительный. Очевидно, что он должен быть продолжен и после завершения выполнения данной НИР.

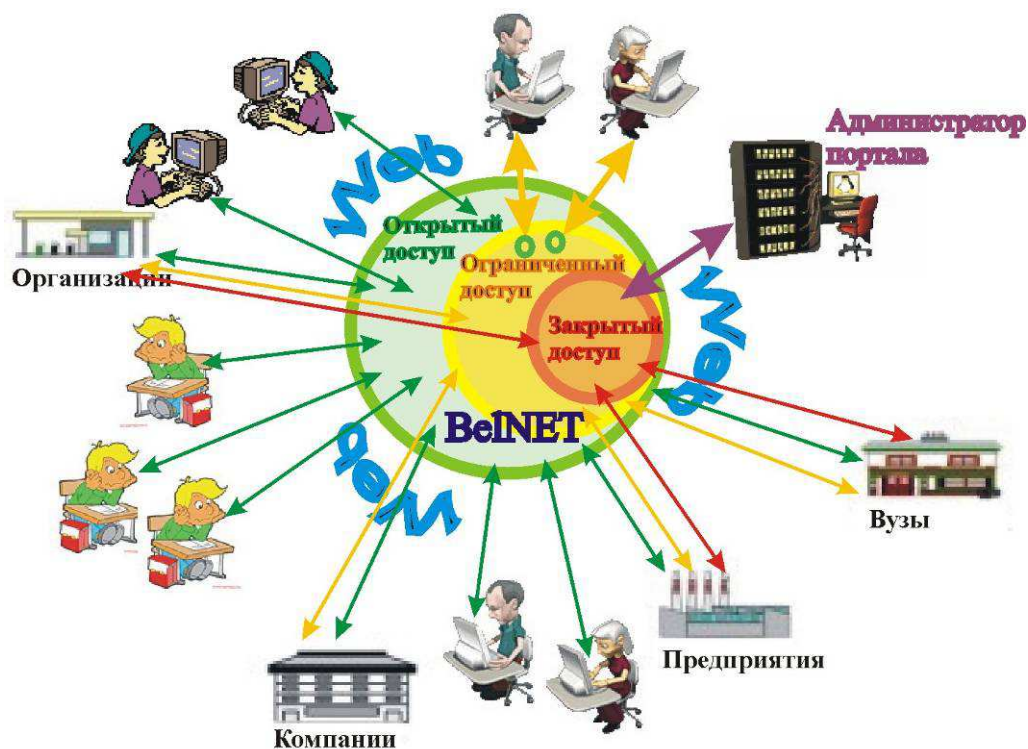


Рисунок 3.1 – Концепция портала ядерных знаний

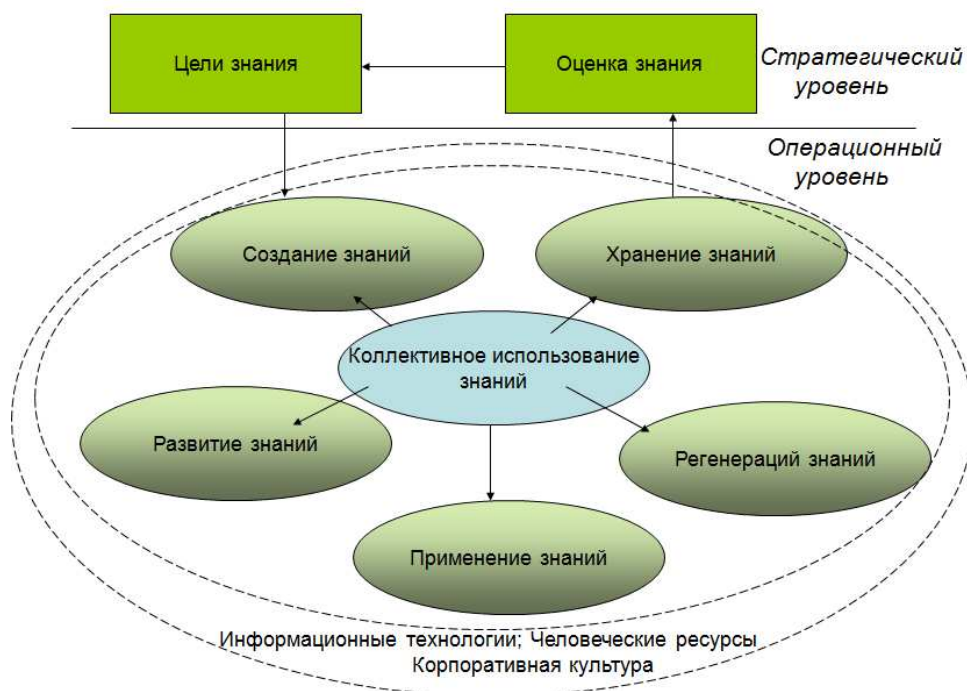


Рисунок 3.2 – Схема методологического подхода к разработке портала в области менеджмента ядерных знаний

3.2 Таксономия портала BelNET

В ходе выполнения НИР составлен рубрикатор и двуязычный (русский-английский) тезаурус для описания в выбранных предметных областях. Разработана таксономия электронного портала в области менеджмента ядерных знаний. Методологический подход

включает 2 основных уровня: стратегический и операционный, которые позволяют представить менеджмент ядерных знаний как интегрированный, систематический подход к процессу идентификации, получения, преобразования, развития, распространения, использования, передачи и сохранения знаний, значимых для достижения заданных целей (рисунок 3.2).

Таксономия раздела «Менеджмент ядерных знаний» (МЯЗ) включает базовую концепцию МЯЗ, основные понятия (данные, информация, виды знаний (явные и неявные), компетенции), цели и задачи МЯЗ, функции (управление знаниями и формирование корпоративной культуры), статус управления знаниями и способ их передачи, инструменты и модели МЯЗ.

Разработанная 4D структура портала (рисунок 3.3) является своеобразным «срезом» таксономии портала, о которой речь будет идти ниже.



Рисунок 3.3 – 4D структура портала

При разработке таксономии портала будем следовать идеологии, предлагаемой МАГАТЭ [20].

Основными задачами создаваемого портала ядерных знаний являются, во-первых, создание новых знаний и содействие в научно-исследовательских, образовательных и учебных программах в области ядерной физики и ядерной индустрии и, во-вторых, научно популярная пропаганда знаний с целью привлечения в эту область самых способных молодых людей и повышения имиджа ядерной отрасли. Эти цели определяют широкий диапазон и разный уровень предоставления информации, что влечет за собой разный уровень допуска к информации.

Структурирование портала преследует две основные цели: обеспечить поиск нужной информации с максимальной эффективностью и затратой минимального времени; возможность выбора темы и раздела для размещения нового материала или информации; получение разносторонней информации, начиная от новостей в данной области науки и кончая вакансиями работы и возможными темами научно-исследовательской работы.

Разрабатываемый портал для ускорения и облегчения поиска нужной информации разделен на ряд разделов, в которых информация, в свою очередь, разделена на различные темы. Внутри тем имеется ряд подразделов по более узким вопросам. Материал в разделах предполагает несколько уровней доступа: свободного доступа, доступа с регистрацией, например, интерактивные лабораторные или интерактивные тесты для студентов, видеоконференции и, наконец, уровень доступа только для специалистов. Это в первую очередь относится к некоторым нормативным документам, стандартам, электронному документообороту.

Таксономию (классификатор) портала можно представить в виде таблицы 3.1:

Таблица 3.1 – Таксономия портала ядерных знаний BelNET

Раздел (section)	1	2	3	4	5	6
Тема (topic)	Basic principles Основные принципы	R&D Научные исследования (для студентов и людей с высшим образованием)	Data&Analys is Данные и анализ (программы расчета, базы данных)	Legal and regulatory documents Нормативно-правовое регулирование	Industry, services and technologies Производство, услуги и технологии	Technical and metrological surveillance Научно-техническое и метрологическое сопровождение
0. Материалы общие для всех тем	1-0 Глоссарий	2-0.1 2-0.2 2-0.3 2-0.4 2-0.5 2-0.6 2-0.7	3-0.1 3-0.2 3-0.3 3-0.4 3-0.5 3-0.6 3-0.7		5-0	
1. Ядерная физика	1-1.1 1-1.2 1-1.3 1-1.4	2-0.8 2-0.9	3-1		5-1	
2. Ядерная энергетика	1-2.1 1-2.2		3-2	4-2	5-2	6-2

	1-2.3 1-2.4					
3. Ядерно-физические методы	1-3		3-3		5-3	6-3
4а.Ядерная и радиационная безопасность 4б.Физическая безопасность и защита;	1-4а.1 1-4а.2 1-4а.3 1-4а.4 1-4б.1 1-4б.2 1-4б.3 1-4б.4		3-4а. 3-4б	4-4а 4-4б	5-4а 5-4б	6-4а 6-4б
5. Физика ионизирующего излучения	1-5.1 1-5.2 1-5.3		3-5	4-5	5-5	6-5
6. Физика элементарных частиц	1-6.1 1-6.2 1-6.3		3-6		5-6	
7. Ядерные материалы	1-7		3-7	4-7	5-7	6-7
8.Радиационное материаловедение	1-8		3-8	4-8	5-8	6-8
9. Ядерная и радиохимия	1-9.1 1-9.2 1-9.3 1-9.4	2-9.1 2-9.2 2-9.3 2-9.4	3-9	4-9	5-9	6-9
10. Химия воды на АЭС	1-10.1 1-10.2	2-10.1 2-10.2	3-10	4-10	5-10	6-10

В таблице использованы следующие обозначения:

1-0 Глоссарий;

1-1.1 Научно-популярные материалы, включая видеофильмы, популярные статьи и книги в области ядерной физики;

1-1.2 Учебные материалы для системы повышения квалификации и переподготовки кадров по ядерной физике;

1-1.3 Для студентов и преподавателей (материалы по ядерной физике);

1-1.4 Для учителей и школьников (материалы по ядерной физике);

1-2.1 Научно-популярные материалы, включая видеофильмы, популярные статьи и книги в области ядерной энергетики;

1-2.2 Учебные материалы для системы повышения квалификации и переподготовки кадров по ядерной энергетике;

1-2.3 Для студентов и преподавателей (материалы по ядерной энергетике);

1-2.4 Для учителей и школьников (материалы по ядерной энергетике);

1-3 Ядерно-физические методы;

1-4а.1 Ядерная и радиационная безопасность (научно-популярные материалы);

1-4а.2 Учебные материалы для системы повышения квалификации и переподготовки кадров по ядерной и радиационной безопасности;

1-4а.3 Ядерная и радиационная безопасность (для специалистов, студентов и преподавателей);

1-4a.4 Ядерная и радиационная безопасность (для школьников и учителей);
 1-4b.1. Физическая безопасность и защита (научно-популярные материалы);
 1-4b.2 Учебные материалы для системы повышения квалификации и переподготовки кадров по физической безопасности и защите;
 1-4b.3. Физическая безопасность и защита (для специалистов);
 1-4b.4. Физическая безопасность и защита (для школьников);
 1-5.1 Источники излучения;
 1-5.2 Процессы взаимодействия излучения с веществом;
 1-5.3 Регистрация излучения;
 1-6.1 Научно-популярные материалы, включая видеофильмы, популярные статьи и книги в области физики частиц;
 1-6.2 Для студентов и преподавателей (материалы по физике частиц);
 1-6.3 Для учителей и школьников (материалы по физике частиц);
 1-7 Ядерные материалы;
 1-7 Радиационное материаловедение;
 2-0.1 Новости науки;
 2-0.2 Конференции, в том числе интернет-конференции;
 2-0.3 Информация о новых монографиях и статьях со ссылками на электронную библиотеку, журнал или Интернет-архив;
 2-0.4 Каталог крупных мировых ядерных центров;
 2-0.5 Каталог АЭС и центров, работающих в области ядерной энергетики;
 2-0.6 Каталог крупных ускорителей и центров физики частиц;
 2-0.7 Перечень тем исследовательских работ, которые разрабатываются или предлагаются для разработки в РФ;
 2-0.8 Отчеты по результатам исследовательских работ;
 2-0.9 Вакансии;
 3-0.1 Книги и журналы;
 3-0.2 Научно-популярная литература;
 3-0.3 Патенты;
 3-0.4 Законодательство и нормативные документы;
 3-0.5 Техническая документация;
 3-0.6 Таблица Менделеева;
 3-0.7 База данных физических констант;
 3-1 Программы и базы данных по ядерной физике;
 3-2 Программы и базы данных по ядерной энергетике;
 3-3 Программы и базы данных в области применения ядерно-физических методов;
 3-4a Базы данных по ядерной и радиационной безопасности;
 3-4b Базы данных по физической безопасности и защите;
 3-5 Программы обработки и базы данных по физике ионизирующего излучения;
 3-6 Программы и базы данных по физике частиц;
 3-7 Программы и базы данных по ядерным материалам;
 3-8 Программы и базы данных по радиационному материаловедению;
 4-2 Нормативные документы в области ядерной энергетики;
 4-4a и 4.5 Нормативные документы в области ядерной и радиационной безопасности;
 4-4b Нормативные документы в области физической защиты;
 4-7 Нормативные документы в области ядерных материалов;
 4-8 Нормативные документы в области радиационного материаловедения;
 5-0 Архив-Музей детектирующей аппаратуры;
 5-1, 5-2, 5-3, 5-4a, 5-4b, 5-5, 5-6, 5-7 и 5-8 Информация о приборах и производителях для областей указанных тем и подтем;

6-2, 6-3, 6-4a, 6-4b, 6-5, 6-7 и 6-8 Стандарты и метрологические документы, имеющиеся в данной области.

Рассмотрим более подробно иерархическую структуру и взаимосвязи различных разделов и тем.

1 раздел – основные принципы (basic principles). Этот раздел дает базовые знания по всем включенным в портал темам. Для этого раздела предполагается в основном открытый доступ. Раздел портала имеет образовательную и информационную направленность, а также научно-популярную пропаганду. Образовательные материалы, рассчитанные для студентов и преподавателей, такие как, видеофорумы, интерактивные лабораторные и тесты, необходимо отнести к уровню, требующему регистрации.

Очень важной частью первого раздела является Глоссарий, (который предлагается составить в расширенном варианте, т.е. типа Энциклопедии (Wiki). Это значит нужно давать не только расшифровку термина, но и предоставлять ключевую информацию с указанием индекса классификатора, дающего возможность перейти при необходимости получения более развернутой информации к соответствующему подразделу (теме) первого раздела, а также ссылки на электронную библиотеку, имеющиеся образовательные ресурсы (лекции, лабораторные и т.д.). Глоссарий предлагается организовать в алфавитном порядке без разделения на темы. Это существенно облегчит поиск, если известно ключевое слово, и будет являться одним из основных методов поиска необходимой информации.

Второй метод поиска – непосредственное использование классификатора (таксономии) портала ядерных знаний.

Рассмотрим более подробно предлагаемое разделение первого раздела по темам.

Первая тема – «Ядерная физика» – 1.1

- **1-1.1 Научно-популярные материалы, включая видеофильмы, популярные статьи и книги;**
- **1-1.2 Учебные материалы для системы повышения квалификации и переподготовки кадров:**
- **1-1.3 Для студентов и преподавателей.**
 - 1-1.3.1 Свойства и характеристики атомных ядер, энергия связи ядра, энергосвязывание;
 - 1-1.3.2 Нуклон-нуклонные взаимодействия;
 - 1-1.3.3 Ядерные модели;
 - 1-1.3.4 Основные закономерности радиоактивного распада;
 - 1-1.3.4.1 α - распад;
 - 1-1.3.4.2 β - распад;
 - 1-1.3.4.3 γ - распад;
 - 1-1.3.4.4 кластерный распад;
 - 1-1.3.4.5 протонный и двухпротонный распады;
 - 1-1.3.4.6 спонтанное деление.
 - 1-1.3.4.7 ядерная изомерия;
 - 1-1.3.5 Ядерные реакции, в том числе реакция деления и синтеза;
 - 1-1.3.6 УТС и цепная ядерная реакции;
 - 1-1.3.7 Ядерная астрофизика;
 - 1-1.3.8 Учебные материалы для студентов.

Интерактивные ссылки на учебную литературу, статьи и монографии, термины глоссария, учебные материалы предполагается приводить в каждом тематическом подразделе. Например, подраздел 1-1.3 связан интерактивными ссылками с разделом 3-1 (данные и анализ), так как предполагает возможность использования имеющихся в

Интернете программ по расчету характеристик уровней атомных ядер, энергий связи ядер, энергии распадов, пороговых энергий реакции энерговыделения в ядерных реакциях.

Для удобства пользователей «Учебные материалы для студентов» можно суммировать отдельным пунктом с перечислением имеющихся в портале по этой теме учебных материалов – лекции, видеолекции, лабораторные работы, интерактивные тесты и т.д. соответствующего уровня изложения.

1-1.4 Для учителей и школьников.

- 1-1.4.1 Свойства и характеристики атомных ядер, энергия связи ядра;
- 1-1.4.2 Ядерные силы;
- 1-1.4.3 Ядерные модели;
- 1-1.4.4 Основные закономерности радиоактивного распада;
 - 1-1.4.4.1 α - распад;
 - 1-1.4.4.2 β - распад;
 - 1-1.4.4.3 γ - распад;
 - 1-1.4.4.4 другие виды распадов
- 1-1.4.5 Ядерные реакции, в том числе реакция деления и синтеза;
- 1-1.4.6 Ядерная астрофизика;
- 1-1.4.7 Учебные материалы для школьников.

Изложение материала предполагается давать на уровне, доступном для школьников. Интерактивные ссылки на научно-популярную литературу, представленную в электронной библиотеке, предполагается приводить в каждом тематическом подразделе.

Для удобства пользователей в отдельном подразделе «Учебные материалы для школьников» предлагается суммировать все имеющиеся в портале учебные материалы для школьников – лекции, видеолекции, лабораторные работы, интерактивные тесты и т.д. соответствующего уровня изложения.

Вторая тема – «Ядерная энергетика» – 1-2.

1-2.1 Научно-популярные материалы, включая видеофильмы, популярные статьи и книги;

1-2.2 Учебные материалы для системы повышения квалификации и переподготовки кадров;

1-2.3 Для студентов и преподавателей.

- 1-2.3.1 Обзор развития ядерной энергетики в мире;
- 1-2.3.2 Атомные станции;
- 1-2.3.3. Состав активной зоны;
- 1-2.3.4 Взаимодействие нейтронов с ядрами, размножение нейтронов и их баланс;
- 1-2.3.5 Кинетика и динамика ядерного реактора;
- 1-2.3.6 Тепломассоперенос в ядерной установке;
- 1-2.3.7. Системы управления и контроля активной зоны;
- 1-2.3.8 Биологическая защита ядерной установки;
- 1-2.3.9 Ядерное топливо и ядерный топливный цикл;
- 1-2.3.10 Отработанное топливо и радиоактивные отходы;
- 1-2.3.11 Реакторы на быстрых нейтронах;
- 1-2.3.12 Ядерные источники энергии в космосе;
- 1-2.3.13 Возобновляемые источники энергии;
- 1-2.3.14 Физическая защита АЭС;
- 1-2.3.15 АЭС в Республике Беларусь;
- 1-2.3.16. Учебные материалы для студентов.

Для удобства пользователей «Учебные материалы для студентов» (1-2.3.16) можно суммировать отдельным пунктом с перечислением имеющихся в портале учебных материалов по этой теме – лекции, видеолекции, лабораторные работы, интерактивные тесты и т.д. соответствующего уровня изложения. Целесообразно поместить ссылку на программу моделирования ядерного реактора, которая была разработана МИФИ по заказу МАГАТЭ и размещена в Интернете для свободного пользования. Предполагается на базе этой программы разработать несколько лабораторных работ разного уровня.

1-2.4 Для учителей и школьников.

- 1-2.4.1 Обзор развития ядерной энергетики в мире;
- 1-2.4.2 Принципы получения ядерной энергии;
- 1-2.4.3 Атомные станции и устройство ядерного реактора;
- 1-2.4.4 Ядерный топливный цикл и радиоактивные отходы;
- 1-2.4.5 Ядерные источники энергии в космосе;
- 1-2.4.6 Возобновляемые источники энергии;
- 1-2.4.7 Учебные материалы для школьников.

Изложение материала предполагается давать на уровне, доступном для школьников. Интерактивные ссылки на научно-популярную литературу, представленную в электронной библиотеке, а также ссылки на все имеющиеся по этой теме учебные материалы соответствующего уровня изложения (лекции, видеолекции, лабораторные работы, интерактивные тесты и т.д.) суммируются в подразделе (1-2.4.7) учебные материалы для школьников.

Третья тема – «Ядерно-физические методы» – 1-3.

В этом разделе предполагается рассмотреть физические принципы различных ядерно-физических методов с интерактивными ссылками на соответствующие нормативные документы и описание конкретных приборов, использующихся в промышленности, медицине, в системе безопасности, геологии и т.д. На наш взгляд нецелесообразно структурировать информацию по разным уровням изложения, так как эта тема предназначена в первую очередь для пользователей с определенным уровнем знаний (студенты и люди с высшим образованием).

- 1-3.1 Ядерный магнитный резонанс (ЯМР);***
- 1-3.2 Электронный парамагнитный резонанс (ЭПР);***
- 1-3.3 Мессбауэровская спектроскопия;***
- 1-3.4 Использование изотопов в промышленности и медицине;***
- 1-3.5 Методы неразрушающего контроля;***
- 1-3.6 Ядерная физика в геологии (ядерный каротаж);***
- 1-3.7 Активационный анализ;***
- 1-3.8 Контроль безопасности (обнаружение взрывчатых и делящихся веществ);***
- 1-3.9 Методы ядерной физики в сельском хозяйстве;***
- 1-3.10 Рентгеновская флюорография, томография, маммография, ангиография и т.д.***

1-3.11 Стерилизация;

1-3.12 Протонная и борная терапия.

В данном разделе, в первую очередь, приводятся физические основы метода, а также рассматриваются практические применения. Раздел тесно связан интерактивными ссылками с разделами 3-3, 3-4 и 3-5, 4-4. В разделе 3-3 собраны возможные программы обработки результатов, полученных ядерно-физическими методами, находящиеся в открытом доступе или разработанные непосредственно для портала. На разделы 3-4 и 4-4 необходимы ссылки, дающие возможность ознакомиться с соответствующими регулирующими документами (Республики Беларусь, МАГАТЭ, России), определяющими требования использования

ядерно-физических методов. В разделе 3-5 предполагается разместить информацию о конкретных приборах, которые используются в различных применениях ядерно-физических методов.

Четвертая тема – «Ядерная и радиационная безопасность» — 1-4.

В этой теме должны быть приведены ссылки на глоссарии, в первую очередь, [21] (раздел 1-0 в таксономии портала), а также выделены следующие основные подтемы:

1-4a. Ядерная и радиационная безопасность;

1-4b. Физическая безопасность и защита.

Материал данных подтем необходимо излагать на нескольких уровнях:

1-4a.1 Научно-популярные материалы, включая видеофильмы, популярные статьи и книги;

1-4a.2 Учебные материалы для системы повышения квалификации и переподготовки кадров;

1-4a.3 Для студентов, преподавателей и специалистов.

1-4a.4 Для учителей и школьников.

И соответственно для второй подтемы:

1-4b.1 Научно-популярные материалы, включая видеофильмы, популярные статьи и книги;

1-4b.2 Учебные материалы для системы повышения квалификации и переподготовки кадров;

1-4b.3 Для студентов, преподавателей и специалистов.

1-4b.4 Для учителей и школьников.

Рубрикация каждого из уровней должна вестись в соответствии с назначением разделов портала и подтемами, например, первая подтема 4a в изложении для специалистов, студентов и преподавателей будет иметь общую часть 1-4a.2 и в ней предусмотрено размещать информацию, касающуюся общих принципов, подходов к обеспечению ядерной и радиационной безопасности и подразделяться на 3 подраздела:

1-4a.3 «Ядерная и радиационная безопасность»

1-4a.2.1 Ядерная безопасность;

1-4a.2.2 Радиационная безопасность и защита;

1-4a.2.3 Радиационная экология;

Соответственно для второй подтемы:

1-4b.2 Физическая безопасность и защита;

1-4b.2.1 Физическая ядерная безопасность и физическая защита ядерных объектов;

1-4b.2.2 Физическая безопасность и физическая защита радиационно-опасных объектов;

1-4b.2.3 Гарантии и нераспространение ядерных материалов.

Подтема 4a разделена на части, находящиеся между собой в функциональной взаимосвязи: 1-4a.(1,2,3).1 «Ядерная безопасность»; 1-4a.(1,2,3).2 «Радиационная безопасность и защита». Предмет ядерной безопасности состоит в изучении условий безопасного функционирования сложных технических систем, которыми являются ядерные и радиационно-опасные объекты, а также поведения этих систем в случае проектных событий и запроектных аварий. Последствия этих событий могут оказывать влияние на здоровье человека и окружающей среды. Поэтому оценка их тяжести дает исходные данные для анализа ситуации по обеспечению радиационной безопасности при работе на ядерных и радиационно-опасных объектах. С другой стороны, именно требования по ограничению потенциального неблагоприятного воздействия ядерных и радиационно-опасных объектов

на человека и окружающую среду закладываются в основу проектирования их всего жизненного цикла.

Из сказанного вытекает, что ссылки на информацию, собранную в частях «Ядерная безопасность» и «Радиационная безопасность и защита», необходимо сделать перекрестными.

Относительно самостоятельной является подтема 1-4b«Физическая безопасность и защита», в которой выделены следующие части:

1-4b.(1,2,3).1 «Физическая ядерная безопасность и физическая защита ядерных объектов»;

1-4b.(1,2,3).2 «Физическая безопасность и физическая защита радиационно-опасных объектов»;

1-4b.(1,2,3).3 «Гарантии и нераспространение ядерных материалов».

Необходимость такого разделения диктуется различием в подходах к обеспечению безопасности ядерных и радиационно-опасных объектов, которое связано, главным образом, с физической природой размещенных в них источниках опасности. Однако способы предотвращения угроз и минимизации их последствий основываются на одинаковых принципах, что приводит к необходимости объединения этих частей в классификаторе портала (см. колонку 1).

Остальные части должны быть представлены отдельно.

Выделение части «Гарантии и нераспространение ядерных материалов» обусловлено тем, что в этой области существуют отдельные стандартизованные методы и процедуры обеспечения выполнения международных конвенций о контроле наработки ядерных материалов на ядерных объектах и их нераспространении. Но эта часть опирается на материал, который будет размещен в части 1-4.(1,2,3).1. Поэтому в ней необходимо будет организовать соответствующие ссылки на материал, размещенный в других частях.

При разработке оболочки портала следует предусмотреть неограниченную возможность развития данной структуры путем пополнения количества и перегруппировки содержания отдельных подразделов в зависимости от результатов развития в мире понимания содержания данной области знаний и деятельности.

В каждой части раздела портала «Ядерная и радиационная безопасность» должна быть сформулирована своя Парадигма с отражением в иерархии соответствующих документов (международных, региональных, национальных).

В первых двух частях выделены следующие разделы:

1. Ядерная и радиационная безопасность:

1.1. Ядерная безопасность;

1.2. Радиационная безопасность и защита;

2. Физическая безопасность и защита:

2.1. Физическая ядерная безопасность и физическая защита ядерных объектов;

2.2. Физическая безопасность и физическая защита радиационно-опасных объектов.

В каждом из перечисленных разделов и в части 3 выделяются общие требования по видам безопасности и конкретные требования к безопасности в зависимости от вида источника опасности и вида деятельности.

Их обоснование и выполнение базируется на:

1. Научно-технических основах соответствующего вида деятельности;

2. Научно-практическом опыте ведения этой деятельности;

3. Экономических и экологических аспектах;

4. Политико-правовых аспектах [22, 23];

5. Культуре безопасности.

Пятая тема – «Физика ионизирующего излучения» – 1-5.

1-5.1 Источники ионизирующих излучений;

1-5.2 Взаимодействие излучения с веществом;

1-5.3 Регистрация ионизирующего излучения.

Первый подраздел (1-5.1) содержит общие сведения обо всех видах ионизирующего излучения и характеристиках, используемых для их описания, информацию об источниках ионизирующего излучения, которая распределяется в соответствии с механизмом генерации излучения: радиоактивный распад (радиоизотопные источники) или ядерные реакции и другие процессы (ускорители, генераторы нейтронного и тормозного излучения и т.п.). Информацию о так называемом естественном или природном излучении, учитывая его важную роль как источника фона при многих ядерно-физических измерениях, предлагается вынести в отдельный подраздел.

Структура подраздела:

1-5.1.1. Характеристики потока излучения.

1-5.1.2. Радиоизотопные источники.

1-5.1.3. Источники на основе ядерных реакций.

1-5.1.4. Естественное излучение.

Второй подраздел (1-5.1.2) содержит информацию о взаимодействиях ионизирующих излучений с веществом. Выделяются процессы в облучаемом веществе, в частности пространственно-временная картина формирования треков заряженных частиц, и изменения, происходящие с излучением. Знание закономерностей этих взаимодействий необходимо как для понимания принципов измерения излучений, так и с других точек зрения: распространение излучения в различных веществах и объектах, защита от ионизирующих излучений и т.д.

1-5.2.1. Процессы в веществе;

1-5.2.2. Изменение характеристик излучения.

Третий подраздел (1-5.3) содержит общую информацию о методах измерения, составе и функционировании измерительных устройств: чувствительный объем и рабочее вещество, выходной сигнал, фон и шум детектора, функция отклика детектора. Рассматриваются физические принципы измерения: необходимость взаимодействия регистрируемого излучения с рабочим веществом детектора, роль заряженных частиц при регистрации, неоднозначная связь параметров выходного сигнала с характеристиками излучения. Включено описание конкретных методов регистрации. Взаимодействие различных детектирующих элементов общей измерительной системы важно для понимания принципа работы таких систем, и составляет содержание отдельного подраздела. Также самостоятельного подраздела требует понимание статистических особенностей регистрируемого потока частиц ионизирующего излучения.

Структура подраздела.

1-5.3.1. Физические принципы и методы регистрации излучений.

1-5.3.1.1. Структурная схема измерительного устройства. Физические принципы регистрации.

1-5.3.1.2. Статистические методы в экспериментальной ядерной физике.

1-5.3.1.3. Ионизационный метод регистрации.

1-5.3.1.4. Сцинтилляционный метод регистрации.

1-5.3.1.5. Другие методы регистрации.

1-5.3.1.6. Измерительные системы.

1-5.3.2. Устройства для регистрации излучений.

1-5.3.2.1. Классификация устройств.

Спектрометры.

Дозиметры.
Радиометры.

1-5.3.2.2. Метрологическое обеспечение измерений.

Образцовые источники излучения.

Калибровка измерительных устройств.

1-5.3.2.3. История совершенствования методов эксперимента.

Шестая тема – «Физика элементарных частиц» – 1-6.

Материал данной темы, также как и материал тем один и два целесообразно разделить на несколько уровней по изложению материала, так как в них изложена информация в первую очередь образовательного характера.

1-6.1 Научно-популярные материалы, включая видеофильмы, популярные статьи и книги.

1-6.2 Для студентов и преподавателей.

1-6.2.1 Ускорители элементарных частиц;

1-6.2.2 Классификация элементарных частиц;

1-6.2.3 Диаграммы Фейнмана;

1-6.2.4 Понятие о электрослабой теории;

1-6.2.5 Квантовая хромодинамика;

1-6.2.6 Современные объединительные теории.

1-6.3 Для учителей и школьников.

1-6.3.1. Принципы ускорения частиц и ускорители;

1-6.3.2. Фундаментальные частицы;

1-6.3.3 Зоопарк частиц;

1-6.3.4 Структура адронов;

1-6.3.5 Объединительные теории.

Второй раздел таблицы 3.1 называется «Наука» – 2.

Этот раздел предлагается не разбивать по темам, так как он рассчитан в первую очередь на специалистов, которым представляет интерес информация по всем темам в области ядерной физики и ядерной технологии. Структурирование раздела происходит только по различным категориям информации:

2-0.1 Новости науки;

2-0.2 Конференции, в том числе интернет-конференции;

2-0.3 Информация о новых монографиях и статьях со ссылками на электронную библиотеку, журнал или Интернет-архив;

2-0.4 Каталог крупных мировых ядерных центров;

2-0.5 Каталог АЭС и центров, работающих в области ядерной энергетики;

2-0.6 Каталог крупных ускорителей и центров физики частиц;

2-0.7 Перечень тем исследовательских работ, которые разрабатываются или предлагаются для разработки в РБ;

2-0.8 Отчеты по результатам исследовательских работ;

2-0.9 Вакансии.

Последние три подраздела целесообразно ограничить доступ «только для специалистов с регистрацией».

На наш взгляд, целесообразно составить каталоги крупных мировых ядерных центров, АЭС и центров, работающих в области ядерной энергетики, а также обзор крупных ускорителей с указанием параметров и центров физики частиц с указанием, где возможно, сайтов этих центров. Обзор ядерных установок приведен на сайте МАГАТЭ, поэтому достаточно привести соответствующую ссылку.

Третий раздел «Данные и анализ» – 3.

Основным общим подразделом раздела «Данные и анализ» является «**Электронная библиотека**» (3-0).

В нее входят все монографии, учебники, патенты, отчеты или соответствующие интерактивные ссылки.

Отдельную часть электронной библиотеки составляют нормативные документы как Республики Беларусь, так и международные нормативные документы, изданные МАГАТЭ, а также частично нормативные документы России, особенно касающиеся ядерной энергетики и не разработанные еще для Республики Беларусь.

Классификацию книг электронной библиотеки целесообразно взять из реферативного журнала, так как эта индексация общепринятая, что облегчит поиск необходимой литературы.

3-0.1 Книги и журналы;

3-0.2 Научно-популярная литература;

3-0.3 Патенты;

3-0.4 Законодательство и нормативные документы;

3-0.5 Техническая документация;

Базы данных, общие для всех тем, являются следующими:

3-0.6 Таблица Менделеева

3-0.7. База данных физических констант

«Карта атомных ядер», в частности, имеется в свободном доступе по ссылке <http://cdfc.sinp.msu.ru/services/ground/index.HTML>.

В разделе 3 предполагается поместить программы, разработанные для данного сайта, а также программы и базы данных, имеющиеся в открытом доступе (можно интерактивными ссылками). Программы и базы данных целесообразно структурировать по темам.

Например, в подразделе 3-1 целесообразно поместить программы, разработанные НИИ ЯФ им. Константинова МГУ и имеющиеся в открытом доступе и очень удобные для расчета основных параметров ядер и ядерных реакций [24].

- Программа-калькулятор для расчета энергии связи ядер http://cdfc.sinp.msu.ru/services/calc_thr/calc_thr_ru.HTML;
- Программа-калькулятор для расчета энергии отделения нуклонов и ядер http://cdfc.sinp.msu.ru/services/cflc_thr/calc_thr_ru.HTML#2;
- Программа-калькулятор для расчета энергии распадов – http://cdfc.sinp.msu.ru/services/cflc_thr/calc_thr_ru.HTML#3;
- Программа-калькулятор для расчета порогов и энергий реакции http://cdfc.sinp.msu.ru/services/cflc_thr/calc_thr_ru.HTML#4;
- Программа-калькулятор для расчета энергии деления ядер http://cdfc.sinp.msu.ru/services/cflc_thr/calc_thr_ru.HTML#5;

В первых трех программах имеется возможность строить графически различные зависимости изучаемых параметров от атомного номера, массового числа ядер, числа нейтронов. Это позволяет более глубоко понять основные закономерности характеристик атомных ядер.

Существует в свободном доступе ряд программ, позволяющих рассчитывать параметры основных и изомерных ядер, а также дающие информацию о возможных радиоактивных переходах и их вероятностях:

- <http://sdfc.sinp.msu.ru/services/gsp.ru.HTML>;
- <http://www.nndc.bnl.gov/wallet/wccurrent.HTML> – программа Национального центра ядерных данных США и другие программы.

В данном разделе необходимо также разместить интерактивные лабораторные работы, видеоматериалы и ролики лекций и выступлений ученых по различным темам, что позволит пользователю облегчить поиск конкретного материала. Учебный материал целесообразно структурировать по темам.

В подраздел (3-2), как указывалось ранее, целесообразно поместить Программу, моделирующую работу ядерного реактора, с соответствующими разработками методики выполнения лабораторных работ с использованием данной программы.

Четвертый раздел «Регулирующие документы» – 4.

Из таблицы видно, что данный раздел имеется не для всех тем. Темы 1 и 6 имеют в первую очередь образовательный характер и не имеют своей нормативной базы. Однако при экспериментальной работе с источниками или на ускорителях существуют жесткие санитарные нормативы, которые относятся к радиационной и ядерной безопасности, поэтому нормативные документы по радиационной безопасности, имеют общий характер для всех тем, относящихся к ядерной физике и ядерным технологиям. Для второй темы кроме нормативных документов по радиационной безопасности добавляются и документы по ядерной безопасности важных при эксплуатации АЭС.

Пятый раздел «Производство, услуги и технологии» – 5.

В разделе выделена общая часть

5.0 – Архив детектирующей аппаратуры.

В «Архив» предполагается сделать в виде обзора, включающего различную детектирующую аппаратуру, если можно с фотографией и описанием параметров, которая выпускалась промышленностью на протяжении нескольких последних десятков лет. Необходимость в таком «Архиве-Музее» назрела давно, так как детектирующие приборы меняются, их параметры тоже изменяются, и возникает проблема сравнения результатов измерений, сделанных в настоящее время, с результатами измерений, сделанных несколько десятков лет назад. Особая необходимость такого архива имеется при проведении сравнительных измерений в области радиационных последствий Чернобыльской аварии и оценки доз, полученных за прошедшие годы населением Республики.

Для конкретных тем в данном разделе предполагается разместить в первую очередь различные приборы, выпускаемые промышленностью Республики Беларусь, Россией и другими странами с указанием параметров, области применения и ссылками (сайт, электронная почта) на производителя. Предполагается возможность «форума», т.е. дать возможность пользователям не только найти нужную аппаратуру, но и высказать свое мнение о параметрах и качестве этой аппаратуры. По нашему мнению информация данного раздела будет полезна для специалистов, хотя уровень допуска должен быть в основном свободный. Необходимо предоставить возможность различным заинтересованным производителям размещать в разделе информацию о своей продукции. Данная информация позволит оптимизировать поиск необходимой аппаратуры, что часто представляет значительные трудности.

Данный раздел имеет неодинаковую важность для различных тем. В первую очередь данный раздел имеет вес для таких тем как: «Ядерно-физические методы», «Ядерная и радиационная безопасность». «Физика ионизирующего излучения».

В частности, в теме 4 «Ядерная и радиационная безопасность» предлагается ввести следующую структуру данного раздела:

5-4.1 Ядерные объекты и установки (Nuclear facilities);

5-4.1.1 Ядерные энергетические установки и атомные станции (Nuclear Power Reactors and Plants);

5-4.1.2 Исследовательские ядерные реакторы (Research Nuclear Reactors);

5-4.1.3 Медицинские применения ядерных реакторов (Applications of Nuclear Reactors in Medicine);

5-4.1.3 Производство изотопов с помощью ядерных реакторов (Isotope Production by Nuclear Reactors);

5-4.2 Перевозка ядерных и радиоактивных материалов (Transportation of Nuclear and Radiactive Materials)

5-4.3 Обращение с ядерными и радиоактивными отходами (Nuclear and radioactive waste management);

5-4.4 Радиационный мониторинг окружающей среды (Environmental Radiation Monitoring);

5-4.5 Аварийная готовность и реагирование (Emergency Preparedness and Response);

5-4.6 Регулирующий контроль (Regulatory Control);

Для темы 5 «Физика ионизирующего излучения» в пятом разделе необходимо ввести следующие подразделы:

5-5.1 Использование источников ионизирующего излучения (Activities with Radiation Sources);

5-5.1.1 Промышленный и научно-исследовательский сектор (Industrial and Research Sector);

5-5.1.2 Промышленная радиография (Industrial Radiography);

5-5.1.3 Промышленные и научно-исследовательские облучательные установки (Industrial and Research Irradiators);

5-5.1.4 Ядерные и радиационные датчики, каротаж (Nuclear and Radiation Gauges, well-logging);

5-5.1.5 Производство радионуклидных источников (Radiation Sources Production);

5-5.1.6 Использование радионуклидных источников в научных исследованиях (Research Radionuclide Sources);

5-5.1.7 Исследовательские ускорители (Research Accelerators);

5-5.1.8 Добыча и переработка полезных ископаемых (Mining and Raw Processing - Naturally Occurred Radioactive Materials (NORM));

5-5.2 Медицина

5-5.2.1 Дентальная рентгенология (Dental Radiology);

5-5.2.2 Диагностическая и интервенционная радиология (Diagnostic and Intervention Radiology);

5-5.2.3 Лучевая терапия и брахитерапия (Radiotherapy and Brachithrapy);

5-5.2.4 Ядерная медицина (Nuclear Medicine);

5-5.2.5 Использование источников ионизирующего излучения в других видах медицинской деятельности: хирургия и др. (Other Medical Activities with Radiation Sources: surgeons, etc.);

5-5.3 Другие отрасли

5-5.3.1 Ветеринария (Veterinary);

5-5.3.2 Сельское хозяйство (Agriculture);

5-5.3.3 Досмотр (Security Procedures).

Каждому из этих направлений применения ядерных и радиационных технологий будет соответствовать специфическая информация, размещаемая в других разделах портала. Например, каждый вид практической деятельности регулируется специальными

санитарными правилами и нормами, относящимися только к этому виду деятельности, для соблюдения которых предусмотрено специфическое метрологическое обеспечение.

Более детальное структурирование информации по данному разделу, кроме отмеченных выше тем, нерационально.

Шестой раздел «Научно-техническое и метрологическое сопровождение»

В этом разделе предполагается размещение информации о различных патентах, стандартах и стандартизованных методиках измерений. Как и предыдущий раздел, раздел 6 важен только для тем, связанных с использованием различной аппаратуры и методик измерений.

Перейдем теперь к разделам по химии.

Раздел 9. Ядерная и радиохимия

Здесь должны быть материалы по следующим подразделам:

9.1 Ядерная химия

Подраздел включает сведения о химических последствиях ядерных превращений, методах синтеза новых элементов и радионуклидов, а также областях их использования.

9.2 Общая радиохимия

Подраздел включает информацию о физико-химических закономерностях поведения радиоактивных элементов и изотопов, распределении микроколичеств радиоактивных элементов между твердой и жидкой фазами, процессах адсорбции, ионообменных, экстракционных и электрохимических методах разделения и выделения радиоактивных элементов.

9.3. Химия радиоактивных элементов

Подраздел содержит информацию о химии наиболее важных радиоактивных элементов, включая технеций, уран, торий и продукты их распада, трансурановые элементы.

9.4 Прикладная радиохимия

В подразделе рассмотрено место радиохимии в технологии производства и переработки ядерных материалов, обезвреживания РАО, радиационном мониторинге, а также применение метода радиоактивных индикаторов в различных областях науки и техники.

Раздел 10. Химия воды на АЭС

Подразделы:

10.1. Водно-химические режимы АЭС с ВВЭР (Водо-водяной энергетический реактор)

10.1.1. ВХР (водно-химический режим) первого контура

10.1.2. ВХР второго контура

Подраздел включает информацию о физико-химических процессах, происходящих в контурах энергоблоков с водным теплоносителем, источниках водоснабжения для АЭС, типах ВХР, нормируемых и диагностических показателях, системах контроля и поддержания ВХР, а также путях их совершенствования.

10.2. Методы водоподготовки и водоочистки

Подраздел содержит сведения о системах очистки вод различных типов на АЭС, основных технологических приемах и методах, обеспечивающих требуемое качество воды, включая коагуляцию, фильтрование, осаждение, ионный обмен, мембранные методы и др.

3.3 Общие линейные и функциональные связи между разделами портала

На первом этапе выполнения работы не были в достаточной мере отражены связи между отдельными таксономическими элементами, применимыми в той или иной степени ко всем тематическим разделам портала. Поэтому на втором этапе была проведена проработка связей как внутри отдельных разделов портала, так и между ними.

Виды связей между разделами портала и их назначение

Существуют несколько типов связей между разделами любой системы (физической, информационной, биологической и т.п.). Все они могут быть сведены к двум типам:

- **детерминированные связи,**
- **стохастические связи.**

Изучением стохастических связей занимается корреляционный анализ (например, при анализе и обработке экспериментальных данных). Применительно к задачам портала необходимо рассмотреть, в первую очередь, *детерминированные связи*. Стохастические связи между разделами портала могут быть установлены, например, по частоте встречаемости какого-либо ключевого слова, или термина, и т.п., т.е. на этапе, когда портал уже будет создан.

Детерминированные связи можно разделить на два класса:

- **линейные связи,**
- **функциональные связи.**

Линейные связи устанавливают либо жесткую подчиненность одних разделов другим (*вертикальные связи*, или лестничные связи по терминологии [5]), либо равноправное участие одних разделов в управлении нижестоящими разделами (*горизонтальные связи*). Функциональные связи выводят за рамки прямой подчиненности или соподчиненности и могут существовать вне жесткой иерархии линейных связей.

И линейные и функциональные связи могут быть отображены в виде некоторых графических схем, диаграмм. На этих схемах и диаграммах линейные и функциональные связи могут проходить по одним и тем же ребрам соответствующего графа, что не позволяет в некоторых случаях отличить линейную связь разделов от функциональной связи. Это следует иметь в виду, проводя анализ связей между отдельными разделами портала.

Ведущим разделом в этой схеме является первая колонка таблицы 3.1: «Основные принципы и глоссарии». *Любая информация, размещенная в ячейках таблицы 3.1, должна иметь ссылки на нее.*

Современные научные исследования в ядерной физике, ядерных и радиационных технологиях, их развитие и практическая реализация, обеспечение безопасности, требующие специфического научно-технического и метрологического обеспечения, невозможны без надежных, верифицированных источников данных о свойствах ядер, частиц ионизирующего излучения, атомов и молекул и вещества в целом, а также методов обработки данных. Практическая деятельность в этой области связана с потенциальными угрозами для здоровья и жизни человека, затрагивает государственные интересы и поэтому должна быть законодательно регламентирована, а научные разработки для этой области знаний подлежат регулируемому контролю. Поэтому информация, содержащаяся во второй и пятой колонках таблицы 3.1 должна опираться и соотноситься с информацией 3, 4 и 6. В иерархической структуре информация, помещенная в колонках 3, 4 и 6, управляет

содержанием информации, помещаемой в колонках 2 и 5. Поэтому «Данные и анализ», «Научно-техническое и метрологическое сопровождение», «Нормативно-правовое регулирование» на рисунке 3.4 расположены выше направлений «Научные исследования» и «Технологии».

На данной структурной схеме отражены, главным образом, линейные связи (вертикальные и горизонтальные). Таким образом, представленная на рисунке 3.4 иерархическая структура отношений и связей между общими разделами портала представляет собой «мгновенный снимок» системы в момент, когда она оказалась в некотором «почти равновесном состоянии». В то же время именно научные исследования и развитие технологий оказывают влияние и фактически формируют и систему принципов и понятий, и подходы к анализу и обработке данных, техническому и метрологическому обеспечению, законодательной и нормативно-правовой базе. Поэтому динамическое развитие рассматриваемой системы неизбежно приводит к установлению соответствующих функциональных связей.

Установление функциональных связей внутри каждой темы портала и между ними должно не только отражать современное понимание проблемного поля темы, но и служить облегчению поиска необходимой информации, и в перспективе, ее активному применению, в том числе, через выполнение специальных учебных действий в режиме «онлайн», к чему должна быть приспособлена создаваемая база знаний.

Среди задач, которые должны выполнять функциональные связи между разделами портала, необходимо выделить следующие [24]:

- достаточная версальность (многогранность, изменчивость, способность к адаптации), позволяющая отразить все направления деятельности, связанной с ядерными и радиационными технологиями;
- должная унификация подходов к содержанию информации в темах, относящихся к различным областям знаний и практической деятельности;



Рисунок 3.4 – Основная иерархическая структура разделов, характерных для любой темы портала

- адекватная полнота отражения содержания основных тематических направлений портала;
 - оптимизация диапазона тем, позволяющая исключить чрезмерную детализацию и облегчить обращение с базой данных;
- и, в то же время:
- достаточная избыточность, позволяющая путем некоторого дублирования информации в отдельных разделах и темах системы гарантировать рассмотрение всех существенных аспектов этой информации;
 - способность к развитию и расширению при необходимости с целью облегчения поддержания системы в рабочем состоянии.

Рассмотрим с этой точки зрения функциональные связи между отдельными разделами портала.

3.4 Функциональные связи в иерархической структуре основных разделов портала

Рассмотрим функциональные связи между разделами, отраженными на схеме, изображенной на рисунке 3.4.

Основной несущей конструкцией является связка между разделами «Основные принципы», «Научные исследования» и «Производство, услуги и технологии». Разделы «Данные и анализ», «Научное и метрологическое сопровождение» и «Нормативно-правовое регулирование» являются вспомогательными. Поэтому иерархия ссылок в портале должна быть выстроена таким образом, чтобы информация, помещенная в основных разделах, была подкреплена ссылками на вспомогательные разделы, перечисленные выше. Между разделами схемы «Данные и анализ» и «Научно-техническое и метрологическое сопровождение» имеется непосредственная связь, поэтому они должны содержать прямые ссылки друг на друга.

Информация, размещаемая в разделе «Нормативно-правовое регулирование», с одной стороны, носит сравнительно независимый характер, но опирается в существенных своих разделах на «Данные и анализ» и «Научно-техническое и метрологическое сопровождение», обоснование которых, в свою очередь, содержится в основных разделах «Основные принципы», «Научные исследования» и «Производство, услуги и технологии». Например, дозовые пределы и нормативные требования по пределам поступления радионуклидов в организм человека устанавливаются законодательством на основе материала, размещенного в разделах «Данные и анализ» и «Научно-техническое и метрологическое сопровождение». В этом и подобных случаях необходимо сделать соответствующие краткие комментарии и перекрестные ссылки при подготовке к размещению информации в портале.

4 АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ И УСЛОВИЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПОРТАЛА

Портал ядерных знаний является информационным порталом. Поэтому он должен соответствовать следующим требованиям: обязательно включать в себя средства для обеспечения ввода и организации входной информации, надежного хранения данных, получения и аналитической обработки данных. Кроме того, портал знаний играет роль эффективного инструмента для полнофункционального поиска информации по всему объёму знаний, собранных самими пользователями. Под аналитической обработкой данных подразумевается технология организации баз данных, оптимизированная для обработки запросов и получения отчетов (web-страниц, сформированных в соответствии с результатом запроса пользователя). Портал ядерных знаний должен ускорять доступ к необходимой информации, уменьшать продолжительность обработки данных, ускорять обмен информацией, значительно увеличивать объем доступной информации, улучшать форму представления данных (например, полезной будет функция сохранения содержимого страницы в формате pdf), сохранять неявные знания.

Разрабатываемый портал ядерных знаний должен обладать следующими особенностями:

- Поиск и навигация. В разрабатываемой системе должна быть обеспечена возможность полнофункционального поиска информации по разным типам файлов и документов как по всему portalу в целом, так и по выбранному разделу.
- Наличие карты портала (древовидная структура), позволяющая перемещаться по нему.
- Наличие защиты конфиденциальной информации за счет авторизации пользователей и разделения прав доступа.
- Возможность настройки интерфейса «под себя» каждым пользователем. Создание пользовательского профиля с учетом его информационных потребностей.
- Собственную систему управления содержанием (CMS – content management system система загрузки / удаления / правки / перенесения материалов на портале). С помощью данного сервиса информация портала систематизируется по структурированным каталогам, которые содержат ссылки на содержимое портала. Необходимо предусмотреть возможность пользователям создавать собственные разделы портала, формировать их структуру и наполнять необходимой информацией.

Любой документ, вводимый в портал, должен содержать информационную карту (ИК) со следующей информацией:

1. Код
2. Наименование
3. Тип
4. Обозначение
5. Регистрационный код
6. Авторы
7. Источник
8. Дата публикации
9. Издание
10. Язык
11. Число страниц
12. Ключевые слова
13. Резюме
14. Ссылка
15. Вложенные файлы

16. Область доступа документа – открытая, ограниченная, закрытая.

В области ограниченного доступа должны быть:

- АРМ администратора
- АРМ преподавателя
- АРМ студента

Доступ к каждому рабочему месту дается в зависимости от прав, получаемых при регистрации

Система дистанционного обучения (СДО) должна быть очень простой, включать в себя АРМ преподавателя и студента. Должна состоять из материалов по темам:

- Глоссарий
- Курсы лекций (pdf или видео)
- Лабораторные (интерактивные)
- Литературу по теме
- Соответствовать стандарту SCORM (Sharable Content Object Reference Model)

АРМ преподавателя должен предоставлять:

- Система управления проектом (работа над курсом, книгой и т.д.)
 - Календарь
 - Сроки работ
 - Информацию кто что когда делал
 - Версионность проекта
- CMS
- Конвертация введенных материалов в pdf
- Все материалы СДО

АРМ студента должен предоставлять для просмотра:

- Глоссарий
- Курсы лекций (pdf или видео)
- Литературу по теме
- Для выполнения – Лабораторные (интерактивные)

АРМ администратора должен обязательно содержать:

- Журнал событий
- Должна быть создана группа экспертов для предпросмотра материалов, выкладываемых на портал

Основные принципы электронного документооборота в соответствии с Wikipedia:

- Однократная регистрация документа, позволяющая однозначно идентифицировать документ.
- Возможность параллельного выполнения операций, позволяющая сократить время движения документов и повышения оперативности их исполнения
- Непрерывность движения документа, позволяющая идентифицировать ответственного за исполнение документа (задачи) в каждый момент времени жизни документа (процесса).
- Единая (или согласованная распределённая) база документной информации, позволяющая исключить возможность дублирования документов.
- Эффективно организованная система поиска документа, позволяющая находить документ, обладая минимальной информацией о нём.
- Развитая система отчётности по различным статусам и атрибутам документов, позволяющая контролировать движение документов по процессам

документооборота и принимать управленческие решения, основываясь на данных из отчётов

На уровне портала это означает строгий контроль за поступаемыми материалами – после появления нового материала он должен быть в оговоренные сроки направлен эксперту по соответствующей тематике. Эксперт за фиксированное время должен провести экспертизу и либо отправить материал автору на доработку, либо вообще отклонить, либо переслать его администратору для размещения материала в нужном разделе БД. Все этапы прохождения документа (материала) должны фиксироваться в электронной системе отчетности.

Отдельные документы должны выноситься на заседание экспертного совета портала. Особое внимание должно уделяться документам из закрытой области.

4.1 Техническая спецификация на портал

Перечень программного обеспечения, которое должно быть установлено на сервере, где будет располагаться портал:

1. Операционная система MS Windows (Windows Server 2008 R2) или Debian GNU/Linux (выбор операционной системы лежит на администраторе сервера).
2. Веб-сервер Apache 2.x.
3. Сервер баз данных Firebird 2.x.
4. Сервер приложений PHP 5.x.
5. Библиотеки XAJAX и ADODB PHP.

Аппаратное обеспечение сервера:

Для обеспечения оптимального функционирования портала при пиковых нагрузках необходим сервер, удовлетворяющий следующей конфигурации:

Количество процессоров: 2 (или больше)

Модель процессора: Intel Xeon E5-2640 (или аналогичный)

Количество ядер: 6 ядер (или больше)

Объем памяти: 32 ГБ (4x8 ГБ) (или больше)

Тип памяти: DDD3-1333 (1600) Registered Low Voltage

Слоты для памяти: 24 слота DIMM

RAID контроллер HP Smart Array P420i/1G FBWC (RAID 0/1/5/6/10)

Сетевой контроллер: HP Ethernet 1Gb 2-port 361i Adapter (или аналогичный)

Маршрутизатор и коммутатор (например, производства Cisco Systems)

Требования к рабочей станции конечного пользователя

Программное обеспечение:

- Любой из следующих браузеров: “Windows Internet Explorer” версии не ниже 8.0, “Mozilla Firefox” версии не ниже 3.6, “Google Chrome” версии не ниже 10.0, “Opera” версии не ниже 11.0. В настройках браузера должно быть разрешено выполнение JavaScript.

Аппаратное обеспечение:

- 64 MB RAM или более (Рекомендуется).
- 256 MHz процессор или выше (Рекомендуется).
- Сетевая карта.

Требования к функционированию портала

- Круглосуточная работоспособность;

- Сохранность данных, введенных пользователями;
- Защищенное от внешнего вредоносного воздействия функционирование приложения.

Оптимальное функционирование при пиковых нагрузках – до 2000 одновременно работающих пользователей (возможный максимум – 5000, но при этом вся оперативная память будет потрачена на нужды веб-сервера, что недопустимо. Оценка сделана из расчета, что на обслуживание 40 запросов в секунду необходимо затратить 256 МБ оперативной памяти. Такие числа вполне характерны для высоконагруженных систем, работающих с базами данных. При увеличении количества обращений в секунду необходимо либо строить кластерные системы, либо улучшать характеристики сервера, либо заниматься тонкой настройкой веб-сервера и оптимизацией запросов к базе данных. (Последний вариант предпочтительнее). Для расчета нагрузки от 1000 пользователей одновременно нагрузка повышается в среднем 2500 – 5000 rps (rps – количество запросов к серверу в секунду). Как правило, один, даже выделенный сервер, такие нагрузки не сможет выдержать. В этом случае организуется кластер, который включает: два или более WEB серверов, один-два сервера БД, балансировщик нагрузки и сервер бэкапа. Иногда балансировщик нагрузки совмещают с бэкап-сервером. Если размер базы не очень огромный, то и данные могут быть физически уместены на одном сервере. Для распределения нагрузки организуется репликация, и данные отдаются одновременно с нескольких серверов баз данных (репликация – механизм синхронизации содержимого нескольких копий объекта, в нашем случае – таблиц данных). При репликации, изменения сделанные на одной копии объекта (в одной таблицы данных), распространяются на другие копии.

Предлагается следующий вариант подключения пользователей к серверу, обслуживающего портал ядерных знаний – использование двух провайдеров – основного и резервного. При возникновении проблем с основным каналом выхода в интернет (ISP1 – **Internet Service Provider**), должно происходить переключение на резервный канал (ISP2). Переключение проводится сменой шлюза по умолчанию на роутере (например, D-Link DSL-1510G/A1A). Таким образом, для организации доступа к portalу необходимо иметь:

- собственный развернутый сервер (или кластерную систему),
- два независимых канала постоянного подключения сервера к сети с реальным статическим IP-адресом. Скорость приема/передачи должна быть не менее 25/25 Мбит/с (чем выше, тем лучше). Белтелеком для юридических лиц предлагает тарифный план, предусматривающий максимальную скорость приема/передачи до 50/50 Мбит/с,
- зарегистрированное доменное имя,
- необходима подсистема гарантированного электропитания, для поддержки надежной работы в случае перебоев электроснабжения,
- наличие избыточных и отказоустойчивых компонентов,
- для обеспечения сохранности и целостности информации пользователей в случае аппаратных аварий, сбоев ПО и т.п. необходима подсистема резервного копирования данных,
- почтовый сервер. Для организации сервера исходящей почты необходим мощный MTA (Mail Transfer Agent), например Exim,
- антивирусное и антиспамовое ПО. Для идентификации спама во входящем потоке можно использовать бесплатный спам-фильтр SpamAssassin.
- систему мониторинга таких параметров, как история посещений (за месяц, неделю, час), списки хостов посетителей, авторизованные пользователи (полный список, последний визит), навигация (продолжительность визитов, тип интересующих файлов, число просмотров). Также будет полезен генератор полной сводки о трафике (просмотр страниц портала, скачивание файлов).

Динамические требования к веб-интерфейсу:

- Размер загружаемой главной страницы не должен превышать 1Мб
- Время загрузки любой страницы – до 500 мс (при скорости приема в 3072 кбит/с), без учета контента конкретных страниц
- Для DOMContentLoaded: до 100 мс.

Требования к структуре портала

- Портал должен состоять из следующих функциональных разделов:
 - ✓ Открытая область (доступна всем пользователям)
 - ✓ Область ограниченного доступа (доступна зарегистрированным пользователям, в зависимости от их роли)
 - ✓ Область закрытого доступа (помимо администратора, доступ будут иметь ограниченный набор пользователей, определенных администратором)
 - ✓ Область управления порталом (доступ имеет только администратор портала)
- Администратору портала должны быть доступны все функции портала.
- Все функциональные области, в том числе их части, существуют в единой информационной среде: единый сервер, единая БД, единые программные модули, сегментированные по функциональным областям
- Должна быть реализована возможность масштабируемости портала – добавления/удаления новых страниц портала без ущерба действующей функциональности и дизайну портала.

Требования на систему аутентификации пользователей

Для регистрации пользователю необходимо будет заполнить поля формы регистрации с обязательным указанием своего логина, пароля и адреса электронной почты. После этого на указанный адрес будет выслано письмо, с подтверждением успешной регистрации и содержащее ссылку, по которой следует перейти, для окончания процедуры. Таким образом, будет реализована система аутентификации обычных пользователей. Им будут назначены соответствующие роли (администратором ресурса) для доступа к определенным разделам базы данных. Должна быть создана группа ролей – для каждой категории пользователей, с различным уровнем доступа к базе данных. Дополнительно должно быть реализовано программное средство CAPTCHA (англ. Completely Automated Public Turing test to tell Computers and Humans Apart) – компьютерный тест, используемый для того, чтобы определить, кем является пользователь системы: человеком или компьютером.

Требования к структуре области управления содержанием портала:

- Область управления содержанием Портала доступна только Администраторам Портала.
- Администратор портала имеет возможность изменить, добавить, удалить содержание любой страницы открытой области, области ограниченного доступа, области управления порталом через web-интерфейс.

Требования к дизайну портала

- Дизайн портала должен зависеть от функциональных возможностей и удобства использования портала.
- Дизайн интерфейса всех частей портала должен быть максимально понятный потенциальным пользователям портала
- Дизайн всех портала должен быть выполнен в единой цветовой гамме и едином стиле.
- Дизайн должен иметь легко читаемые шрифты.

- В верхней части всех страниц портала расположен логотип.
- В нижней части всех страниц портала расположена информация об авторских правах и разработчиках портала, а также ссылка на контакты Администратора портала.
- Дизайн портала корректно отображается во всех основных браузерах при разрешении экрана 1024x768 и выше.
- Информация, размещенная на портале, должна быть доступна для пользователей, независимо от уровня их образования и технической подготовки. Дизайн интернет-сайтов должен разрабатываться с учетом рекомендаций W3C WAI WCAG.

Требования по навигации по portalу ядерных знаний

- Для обеспечения первоочередной загрузки важнейших элементов на странице Портала и их доступности необходимо размещать основные навигационные ссылки в верхней части каждой страницы портала. Выбранный и определенный порядок навигации должен соблюдаться на каждой странице портала.
- Вся информация, размещенная на портале, должна быть доступна посетителю через ссылку или пункт меню. Количество переходов по элементам навигации для доступа к запрашиваемой информации не должно превышать пяти. Навигационные элементы должны выделяться на фоне остальных элементов портала.
- Каждая гиперссылка должна быть рабочей и приводить пользователя к ожидаемому им ресурсу. В случае если дается гиперссылка на внешний ресурс, рекомендуется, чтобы оповещение об этом пользователя осуществлялось заранее, при этом страницы, на которые указывают такие гиперссылки, должны открываться в новом окне веб-браузера. Если гиперссылка используется для загрузки файла, рекомендуется указывать его тип и размер.
- Необходимо использовать навигационные цепочки, содержащие путь следования по разделам от главной страницы портала до текущей открытой страницы.
- Так как предполагается использование больших объемов информации, необходимо предусмотреть наличие дополнительных навигационных элементов:
 - указатели (алфавитный, тематический и т. п.), представляющие собой подборку ссылок на страницы портала, сгруппированных по различным критериям;
 - ссылки на самые посещаемые страницы портала или недавно добавленные документы.
- При размещении на странице портала большого объема текстовой информации необходимо использовать внутренние ссылки (якоря) на различные разделы страницы. В свою очередь, в каждом разделе страницы должна быть ссылка «Вернуться в начало», позволяющая пользователю вернуться к началу страницы.

Требования к механизму поиска, реализуемого на базе портала ядерных знаний

Поиск по portalу следует реализовывать средствами PHP и Firebird: При вводе поисковой фразы будет осуществлена проверка на безопасность вводимых данных. Затем проведено обращение к базе данных (к той ее части, к которой данных пользователь имеет доступ) для поиска и вывода запрашиваемой информации.

- Форма поиска либо ссылка на нее должна быть доступна на каждой странице портала. Поле для ввода поискового запроса должно обеспечивать ввод не менее 20 символов.
- Результаты поиска должны выводиться на отдельной странице, имеющей соответствующий заголовок, при этом поисковый запрос должен оставаться в строке поиска.
- На странице вывода результатов поиска должен быть отображен список найденных документов, а также ссылка на форму расширенного поиска.

- По умолчанию список результатов поиска должен быть отсортирован по релевантности. Каждый пункт в списке должен содержать ссылку на страницу портала и фрагмент текста, в котором выделены ключевые слова, заданные в поисковом запросе.
- В результатах поиска для каждого документа должна быть указана дата его обновления.
- Если результат поиска относится не к HTML странице, то рядом со ссылкой на такой документ необходимо указать его формат и размер.
- Если в результате поиска не были найдены документы, удовлетворяющие поисковому запросу, то пользователь должен быть проинформирован об этом соответствующим образом, кроме того, на странице должна быть предоставлена краткая информация по улучшению поискового запроса.

4.2 Требования к безопасности портала

Требования к надежности портала и сохранности информации

- Сервер, на котором расположен портал, должен обеспечивать ежедневное создание полной или инкрементальной резервной копии базы данных портала.
- Сервер, на котором расположен портал, должен иметь резервный (независимый от основного) канал доступа в сеть Интернет и блок бесперебойного питания, обеспечивающие функционирование портала в течение 2 часов с момента наступления аварийной ситуации.

Требования к безопасности и защите информации портала

- Информация портала должна быть расположена в закрытой БД, доступ к которой разрешен только из программных модулей портала и только с использованием пароля доступа.
- Доступ к закрытым областям (областям ограниченного доступа) портала разрешен только пользователям, прошедшим процедуру регистрации.
- Наличие защиты от несанкционированного доступа и распространенных типов атак (SQL-injection, XSS – тип атаки на веб-системы, заключающийся во внедрении в выдаваемую веб-системой страницу вредоносного кода и взаимодействии этого кода с веб-сервером злоумышленника).
- Любые введенные посетителями данные должны обрабатываться PHP-функциями **strip_tags()** или **htmlspecialchars()**. Кроме того, так как посетителям портала будет предоставлена возможность загружать на веб-сервер какие-либо файлы, должны быть предприняты меры, предотвращающие загрузку исполняемых скриптов с возможностью их последующего запуска (проверка типа загружаемых файлов, выдача файлов через скрипт без прямой ссылки и т.п.).
- Необходимо экранировать угловые скобки, чтобы не получить скрипт на странице результатов поиска. Отслеживание наличия скриптов в пользовательских текстах и рисунках. Следует экранировать спецсимволы HTML.
- Надо явно указывать кодировку страницы до каких-либо пользовательских полей для обеспечения невозможности обхода фильтрации спецсимволов.
- Должна быть предусмотрена защита от перехвата идентификатора сессии и её подмены.

5 АРХИТЕКТУРА ПОРТАЛА

5.1 Архитектура портала

Разработанная в процессе выполнения НИР архитектура портала изображена в виде схемы на рисунке 5.1.

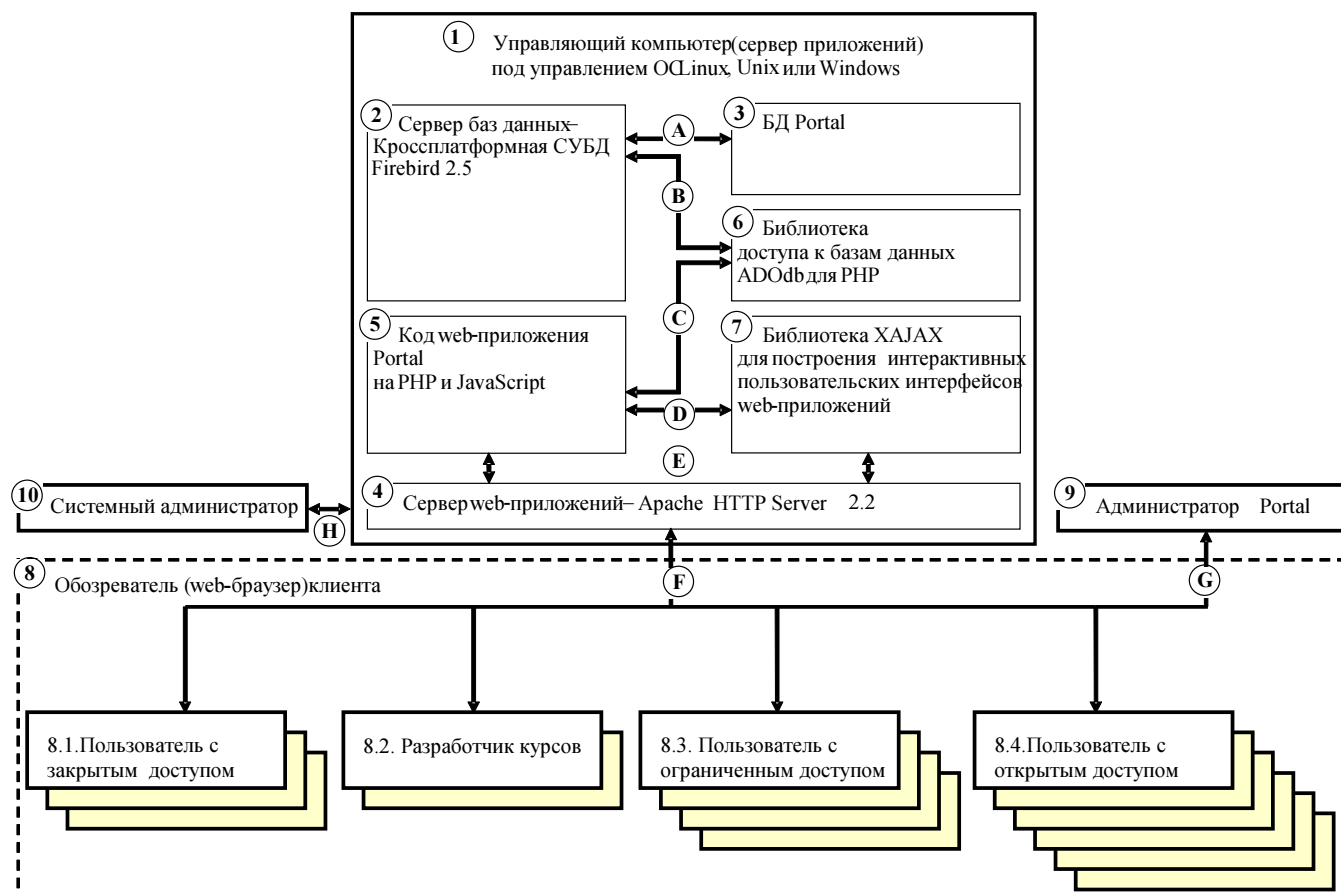


Рисунок 5.1 – Архитектура портала

Компоненты

1. Управляющий компьютер (сервер приложений) под управлением ОС Linux, Unix или Windows
2. Сервер баз данных – кроссплатформная СУБД Firebird 2.5
3. БД Portal
4. Сервер web-приложений – Apache HTTP Server 2.2
5. Код web-приложения Portal на PHP и JavaScript
6. Библиотека доступа к базам данных ADOdb для PHP
7. Библиотека XAJAX для построения интерактивных пользовательских интерфейсов web-приложений
8. Обозреватель (web-браузер) клиента, категории клиентов
 - 8.1. Пользователь с правами закрытого доступа
 - 8.2. Разработчик курсов
 - 8.3. Пользователь с правами ограниченного доступа
 - 8.4. Пользователь с правами открытого доступа

- 8.4. Пользователь с открытым доступом
9. Администратор Portal
10. Системный администратор

Потоки данных (рисунок 5.2)

- A. Потоки данных между сервером баз данных Firebird и базой данных Portal
- B. Потоки данных на уровне библиотеки ADOdb и СУБД Firebird
- C. Взаимодействие web-приложения Portal с базой данных Portal через библиотеку ADOdb и СУБД Firebird
- D. Внедрение XAJAX библиотеки в web-приложение Portal
- E. Формирование и обработка HTTP(S) запросов сервером web-приложений Apache
- F. Передача данных от сервера к клиенту и обратно через сервер web-приложений
- G. Взаимодействие администратора Portal с системой Portal
- H. Взаимодействие системного администратора с сервером приложений и системой Portal

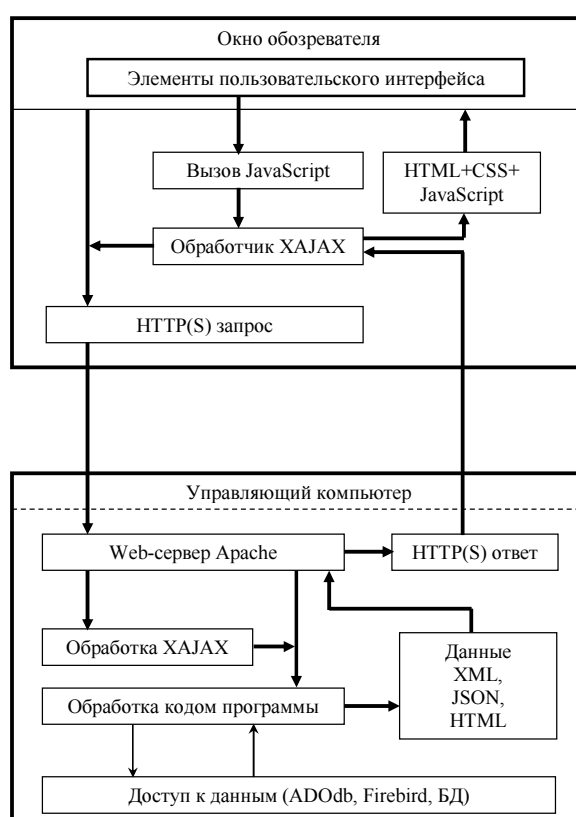


Рисунок 5.2 – Потоки данных

Система Portal и данные размещаются на управляющем компьютере сети – сервере приложений – системным администратором.

Системный администратор имеет полный и непосредственный доступ к серверу приложений, включая базы данных. Системный администратор отвечает за функционирование, защиту и безопасность серверных приложений и данных.

Пользователи, включая администраторов web-приложения Portal, являются клиентами системы и взаимодействуют с системой и данными по сети Интернет или по внутренней (корпоративной) сети посредством обозревателя, который установлен и используется на рабочей станции пользователя. В качестве рабочей станции могут использоваться персональные настольные компьютеры, ноутбуки, планшеты и смартфоны.

Потоки данных между клиентами и web-приложением в обоих направлениях

осуществляется через web-сервер Apache, который обеспечивает проверку, фильтрацию и перенаправление HTTP(S)-запросов.

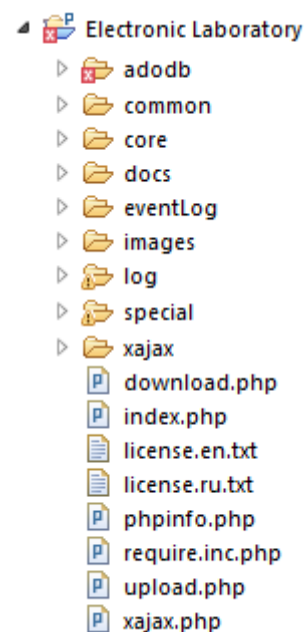
Интерактивный интерфейс пользователя формируется на сервере приложений и отображается в окне обозревателя на рабочей станции через серверную (на PHP) и клиентскую (на JavaScript) части прослойки XAJAX в соответствии с HTTP(S) запросами пользователя. Интерфейс включает в себя пользовательские элементы – ссылки, кнопки, списки, таблицы и другие DOM-элементы, где поддерживается динамическое обращение к серверу по технологии AJAX, что позволяет изменять содержимое обозревателя без перезагрузки всей страницы (содержимого окна) целиком.

5.2 Составные части ПО

Исходные тексты кода программы Portal структурированы и размещены в папке проекта «**Electronic Laboratory**»:

Таблица 5.1 – Модули программы

№ п/п	Наименование	Описание
1	2	3
	adodb	Библиотека ADOdb
	common	Общие файлы для всех однотипных проектов
	core	Ядро программы Portal
	docs	Документация
	eventLog	Модуль поддержки журнала событий
	images	Коллекция картинок визуального оформления
	log	Журналы событий на диске
	special	Раздел со специализацией.
	xajax	Библиотека XAJAX
	download.php	Модуль обеспечения передачи (загрузки) бинарных данных от сервера к клиенту
	index.php	Стартовая страница приложения
	phpinfo.php	Статическая страница с информацией о текущей конфигурации PHP
	require.inc.php	Модуль сборки и загрузки всех инициализационных модулей (includes), необходимых для функционирования программы Portal
	upload.php	Модуль обеспечения передачи (загрузки) бинарных данных от клиента на сервер
	xajax.php	Стартовая страница при обработке HTTP(S) запросов и ответов в режиме XAJAX



5.3 Ядро и модули Portal

Ядро core программы Portal содержит модули PHP, JavaScript и CSS, которые обеспечивают общую функциональность системы для всех пользователей в едином формате: аутентификацию, дизайн страниц, пользовательские элементы управления (кнопки, списки, таблицы), шаблоны, генераторы отчетов и другое.

Специфика для каждого типа пользователей выносится в соответствующие разделы, которые определяются как модули соответствующего автоматизированного рабочего места (АРМ). Модули АРМ собраны в папке `special`.

Ядро обеспечивает возможность наследования модулей АРМ. Наследуемость позволяет создавать новые рабочие места методом добавления новых файлов и/или переопределения существующих файлов согласно требуемой функциональности для конкретного типа пользователя.

Наследуемость организована на уровне названий папок в разделе `special` и отслеживается кодом ядра при формировании HTTP-ответов (HTML-страниц). Идентификатор справа от точки-разделителя в имени папки указывает на имя модуля предка, от которого идет наследование. Поиск и подключение файлов происходит по цепочке от потомка к предку. При достижении конца списка наследуемости и не обнаружении требуемого файла для подключения, поиск осуществляется в папке `common`, сервер отдаст запрашиваемую страницу, дизайн которой определен по умолчанию. В случае отсутствия файла для подключения сервер вернет страницу с информацией об ошибке и зафиксирует это событие в журнале событий. Пример наследуемости модулей: **01.manager** → **director.01** → **officer.director**.

Ядро Portal вместе со специализированными модулями обеспечивает централизованную валидацию входных (HTTP-запросы) и выходных (HTTP-ответы) данных, защиту от внедрения несанкционированного кода, аутентификацию пользователей и доступ к контенту в соответствии с установленными разрешениями для соответствующих пользователей. Основным назначением ядра является централизованная и быстрая генерация контента страниц для отображения их в разных обозревателях в соответствии с хранимыми данными (БД), реакция на события от разных пользователей и соответствующая модификация контента и хранимых данных. Содержимое страниц зависит от поступающих запросов и согласовано с базой данных соответствующего программного продукта.

Модель классов, обеспечивающих функциональность ядра программы, разработана «с нуля» и не зависит от каких-либо сторонних библиотек. Основными классами ядра являются класс **pageDocument** – потомок класса **printer** и класс **page** – потомок класса **webPage**. Объект класса **pageDocument** выполняет непосредственно генерацию контента отображаемых в обозревателе страниц. Объект класса **page** содержит ссылку на **pageDocument**, создается в единственном экземпляре (singleton) для каждой страницы, обеспечивает уникальность страницы при динамическом обмене данными с сервером через `ajax` процесс.

В разделе специализации содержатся триплеты PHP, JS и CSS файлов для каждой отображаемой в обозревателе страницы, причем JS и CSS файлы являются дополняющими и не обязательными. Все страницы перечислены и пронумерованы в конфигурационном файле системы `../common/inc/config.php`. Каждый страничный (специализированный) PHP-файл содержит код инициализации объектов типа **page** и **pageDocument**. Все страничные PHP-файлы в обязательном порядке содержат следующий код:

```
<?PHP
$page = page::singleton(string $PageName);
$page->print__contents();
?>
```

Рисунок 5.3 – Общий код всех специализированных страниц в разделе «special». Создается единственный экземпляр объекта страницы типа «page» и стартует метод объекта, печатающий контент в окно обозревателя

5.4 Функционирование системы. Алгоритмы работы

HTTP-запрос включает в себя наименование стартового скрипта. Имя скрипта в запросе от пользователя – **index.php**. В случае коротких запросов через XAJAX, которые создаются автоматически, – **xajax.php**. Веб-сервер **apache**, разбирая поступивший запрос, запускает соответствующий скрипт. Дальнейший алгоритм работы программы Portal имеет следующий вид.

Подгружаются необходимые модули, выполняется инициализация переменных, проверяется идентификатор требуемой страницы, осуществляется аутентификация пользователя, запускается специализированный скрипт – генератор (регенератор или модификатор, в случае хajax-запроса) соответствующей страницы. Содержимое страницы соответствует допустимым разрешениям для текущего пользователя.

Результатом работы скрипта является формирование HTTP-ответа клиенту, содержащего соответствующую страницу или ее часть в виде HTML, XML, JSON, что разбирается и обрабатывается обозревателем клиента.

При хajax-запросах вместо **index.php** начинает работу скрипт **xajax.php**. В этом случае также подгружаются все необходимые модули и выполняется инициализация объектов, осуществляется проверка пользователя и его разрешений. Но страница целиком не пересоздается и не перегружается. Выполняется модификация отдельных пользовательских элементов и части контента.

В хajax-запросах содержатся наименования методов, процедур или функций, которые должны быть выполнены на стороне сервера, а также их входные параметры:

Обработчик хajax запросов – `function xajax_Process($filename, $callback, $arg1, и т.д.)`.

Первым параметром передаётся имя модуля с описанием запрашиваемых действий.

Вторым параметром передаётся `callback` – имя функции или метод объекта в формате `array(object, method)`, далее параметры этой функции (метода) через запятую.

В переданной функции (методе) первым параметром обязательно идёт `xajaxResponse`-объект.

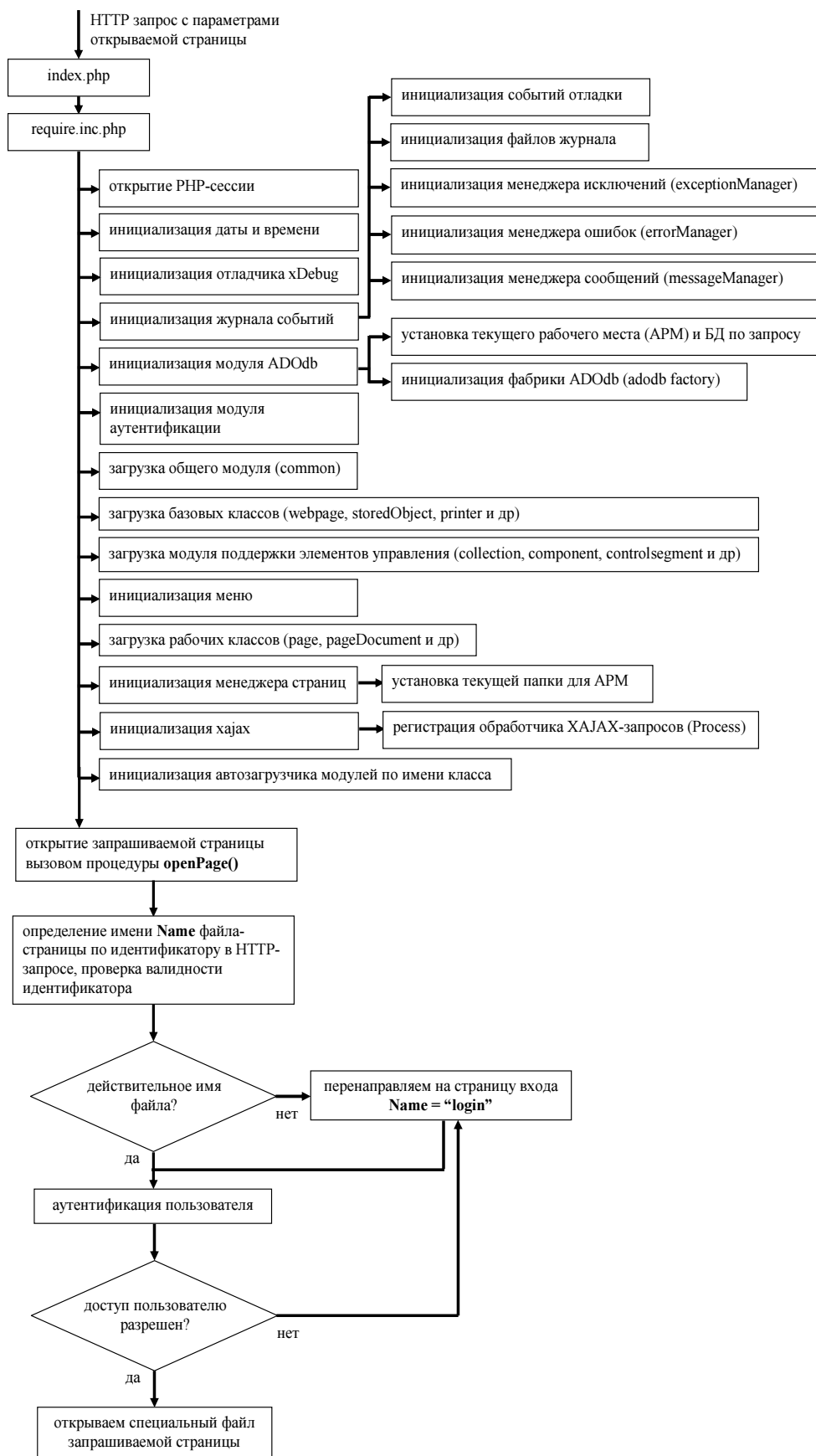


Рисунок 5.4 – Алгоритм работы программы Portal в общем виде

5.5 Система классов Portal

Root class collection

collection

Root class colname

- colname

Root class column

column

Root class columnset

columnset

Root class controlState

controlState

griddivs_state

grid_state

Root class dataset

dataset

query_dataset

control_query_dataset

table_dataset

Root class node

node

hrefnode

tree

datasettree

menutree

Root class pagereg

pagereg

Root class select

- select

Root class state

- state
 - columnManager
 - docheader
 - docfooter
 - filter
 - grid
 - order
 - pageManager
 - pageMenu
 - qparams

Root class stateObject

- stateObject

Root class storedObject

- storedObject
 - printer
 - attachmentForm
 - component
 - controlsegment
 - control
 - grid
 - griddivs
 - splitter
 - treeview
 - control2
 - copyright
 - doctype
 - document
 - pageDocument
 - element
 - block
 - body
 - abody
 - head
 - ahead
 - mainblock
 - introduction
 - template

- maintemplate
- href
 - ahref
- menu
 - mainmenu
 - mquit
 - submenu
- menubar
- menuItem
- switchVisibility
- switchVisibility_panel
- table
 - tabledoc
- table_control
 - dataset_table_control
- tdSplitter

Root class webPage

- webPage
 - page

Root class xajaxResponse

- my_xajaxResponse

5.6 Интерфейс пользователя

Блок-схема вызова окон интерфейса приведена на рисунке 5.5.

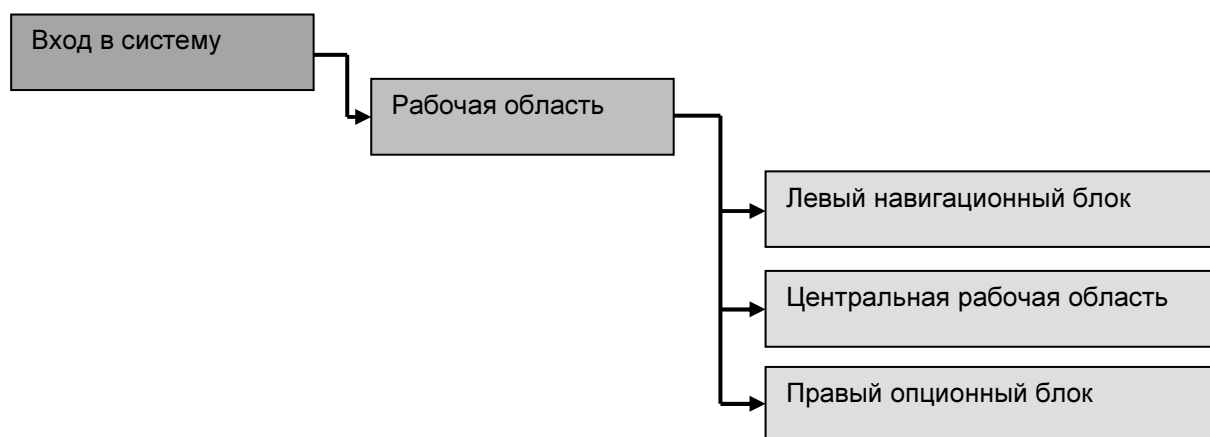


Рисунок 5.5 – Блок-схема вызова окон интерфейса

Система является Web-приложением, поэтому основными компонентами пользовательского интерфейса являются стандартные элементы управления, модифицированные для обеспечения функционирования в рамках единой архитектуры диспетчеризации событий в Portal.

Ниже опишем некоторые термины, использующиеся в интерфейсе. Их наглядное описание будет дано в главе 6.

Блок – логически выделенный регион клиентской области (окна)

Элемент – стандартный или нестандартный элемент управления (строка ввода, селектор, список и др.)

Рабочая область системы разделяется на 5 регионов:

1. Главное меню
2. Левый навигационный блок
3. Правый опционный блок
4. Центральная рабочая область отображения и редактирования данных
5. Нижняя область отображения статуса

Главное меню представляет собой горизонтальную область сверху клиентского окна для навигации между основных подразделов системы. Состав главного меню и ниспадающих подменю зависит от текущего уровня доступа пользователя системы.

Главное меню содержит 2 уровня, чтобы не перегружать пользователя сложностью навигации. Отнесение функции к 1-му либо второму уровню соответствует последовательности действий по работе с объектами системы. Т.е. выбрать категорию – затем выполнить действие над объектом.

Левый навигационный блок расположен под главным меню слева от рабочей области. Блок предназначен для показа списка действий над текущим выбранным объектом либо древовидного списка объектов текущей выбранной категории.

Размер левого навигационного блока может быть изменён с помощью перетягиваемого мышью элемента пользовательского интерфейса «разделитель».

Блок может быть скрыт или показан кнопкой (синий прямоугольник) в левой верхней части рабочей области.

Правый опционный блок расположен под главным меню справа от рабочей области. Блок предназначен для настройки отображения рабочей области и задания фильтров (см

Элемент управления **типа фильтр**) для уменьшения количества данных рабочей области.

Блок может быть скрыт или показан кнопкой (синий прямоугольник) в правой верхней части рабочей области.

Центральная рабочая область расположена под главным меню между левым навигационным и правым – опционным блоком. Занимает максимальную площадь. Содержит данные, над которыми производится редактирование либо просмотр.

В зависимости от типов данных и режима доступа предоставляется табличный редактор, либо редактор записей.

В режиме отображения таблицы имеется возможность настройки количества отображаемых одновременно записей с помощью параметров опционного блока. Для перемещения по страницам таблицы используются страничные навигаторы, расположенные сверху и снизу таблицы.

Нижняя область отображения статуса - Блок расположен под центральной рабочей областью и предназначен для отображения статистических сведений о выполненной операции и дополнительных сведений о рабочей странице.

Элемент управления таблица - основной рабочий элемент системы. Элемент позволяет настроить список столбцов, выбрать сортировку по столбцам, осуществлять редактирование строки (записи) с помощью элемента типа

представляет собой комбинированный модуль, содержащий редакторы для всех видимых колонок таблицы. Типы редакторов определяются автоматически. Данные по отредактированной записи (строке таблицы) передаются по нажатию кнопки сохранить

(значок с книжкой в верхней части редактора). Для каждой таблицы возможно открытие нескольких редакторов. Данные передаются в рамках транзакции только после закрытия редактора.

Элемент управления табличный навигатор является составной частью таблицы, для которой число рядов лимитировано. Указывает число доступных страниц и текущую видимую страницу. Элемент позволяет перемещаться на выбранную страницу нажатием ссылки с номером записи (номера кратны количеству записей на страницу).

Элемент управления строка ввода предназначен для ввода текстовой информации. Лимит на длину значения определяется метаданными базы. Для ввода многострочных значений используется кнопка со стрелкой в левом верхнем углу редактора, что увеличивает размер поля ввода.

Элемент управления комбо-бокс предназначен для выбора значений из предоставленного списка. В зависимости от контекста или от метаданных поля позволяет добавить новое значение или не позволяет.

Элемент управления типа фильтр предназначен для выполнения набора логических соотношений над данными рабочей области. Элемент представляет собой редактируемый список элементов типа «комбо-бокс», содержащий текст и логическое отношение к данным.

Фильтр может быть включен или выключен без уничтожения данных и соотношений.

Элемент управления типа дерево предназначен для отображения иерархических списков (например, подразделений предприятия). Обработка выбора в дереве выполняет обновление рабочей области.

5.7 Подключение пользователей к базам данных

В процессе создания системы eLab с целью повышения безопасности был разработан алгоритм подключения пользователей к базам данных, где для первого подключения к любой БД, в том числе к системной базе данных системы eLab, требуется указать соответствующий логин к БД. Это справедливо для всех аналогичных систем. Как правило, параметры доступа к базе данных прописываются в защищенном конфигурационном файле системы с открытым кодом. В eLab кроме защиты конфигурационного файла применяется еще и защита данных в этом файле путем шифрования последних.

В конфигурационном файле зашифрован безопасный логин к БД, с помощью которого можно выполнить только одну хранимую в базе данных процедуру. Доступ к другим объектам и данным для данного логина ограничен. Указанная процедура принимает на входе идентификационные параметры клиента и в случае удачной авторизации возвращает новый логин с расширенными правами доступа к базе данных, который закрепляется за пользователем и в дальнейшем используется для доступа пользователя к БД. При этом указанные логины с расширенными правами доступа недоступны в явном виде для пользователя ни на стороне клиента, ни на стороне сервера приложений.

Логины с расширенными правами доступа защищены на стороне сервера баз данных следующим образом. Идентификационные параметры и логины хранятся в базе данных в зашифрованном виде и передаются по сети также в зашифрованном виде независимо от протокола обмена (HTTP или HTTPS). Для обеспечения такого механизма потребовались одинаковые алгоритмы шифрования данных, как на стороне сервера приложений, так и на стороне сервера баз данных. С этой целью разработаны на языке PSQL и внесены в системную базу данных соответствующие алгоритмы шифрования, которые хранятся в специальной защищенной правами доступа таблице и скрыты от пользователей, подключающихся к базе данных с помощью безопасного логина.

5.8 Сохранения текущих состояний пользовательского интерфейса

Важным в системе eLab является сохранение для каждого пользователя текущих состояний пользовательского интерфейса, включая данные вводимые пользователями в соответствующие элементы редактирования. В web-приложениях этому вопросу не всегда уделяется должное внимание. В качестве примера таких приложений приведем Информационную систему Регулирующего органа RAIS МАГАТЭ (ее описание см. ниже), систему управления обучением Moodle и др. Рассмотрим часто встречающуюся ситуацию: пользователь вводит данные на текущей web-странице. В процессе набора требуется переключиться на другую страницу, чтобы посмотреть, скопировать или вспомнить часть информации из другого раздела без подтверждения сохранения текущих данных, а затем вернуться на прежнюю страницу для продолжения ввода данных с прежнего места. Зачастую приходится набирать данные заново. В системе eLab разработан собственный механизм сохранения промежуточных (в том числе, межстраничных) данных, опирающийся на стандартные возможности языка PHP и протокола HTTP с учетом поведения и логики работы стандартных браузеров. Причем в eLab не используются скрытые поля или специальные cookie-наборы, а также механизм view state технологии ASP.NET. В системе eLab вводимая клиентом информация сохраняется в системной базе или в специальном файле (аналогично файлу сессии) на сервере и восстанавливается каждый раз при загрузке соответствующей страницы. Конфиденциальность этих данных обеспечивается теми же правами доступа клиента к БД и настройками сервера web-приложений Apache и файловой системы.

6 ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ПОРТАЛА

В результате выполнения НИР на основе фреймворка eLab были программно реализованы модули портала BelNET, доступные по адресу <http://lar.inpnet.net/el/belnet/>. Ниже дается краткое описание проведенных работ, подкрепленное экранными копиями работы портала.

1. Разработан архитектурный каркас портала ядерных знаний на основе принципов MVC (Model-view-controller – модель-представление-поведение) с использованием фреймворка системы eLab.

1.1. Разработана модель и созданы соответствующие шаблоны проектирования портала с разделением программного обеспечения портала на две независимые части (категории):

- программное обеспечение портала для представления открытой информации в сети и предоставления способов взаимодействия клиентов с указанной информацией, включая поиск информации и получение этой информации (загрузка файлов с сервера),
- программное обеспечение портала для редактирования открытого контента, включая редактирование и настройку меню портала, и модификацию данных (добавление, удаление и редактирование содержимого портала).

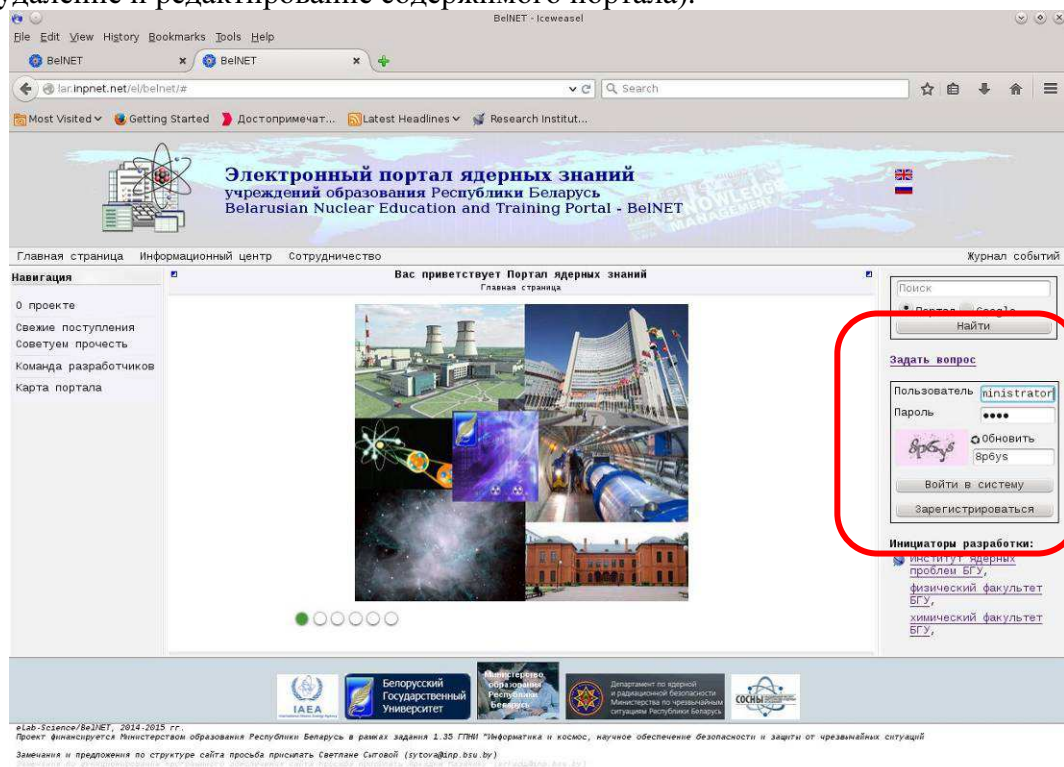


Рисунок 6.1 – Авторизация пользователей на портале ядерных знаний.

1.2. Система eLab, как лабораторная информационная система (ЛИС), предполагает обязательную аутентификацию пользователей, в то время как клиентами портала является широкий круг людей – гостей портала. Указанное в п.1.1. разделение позволило прозрачно выполнить разделение гостей портала и администраторов контента.

1.3. Для администрирования и редактирования открытого контента используется фреймворк системы eLab.

2. Разработан способ авторизации пользователей на портале ядерных знаний (см. рисунок 6.1), где в том числе реализовано средство CAPTCHA.

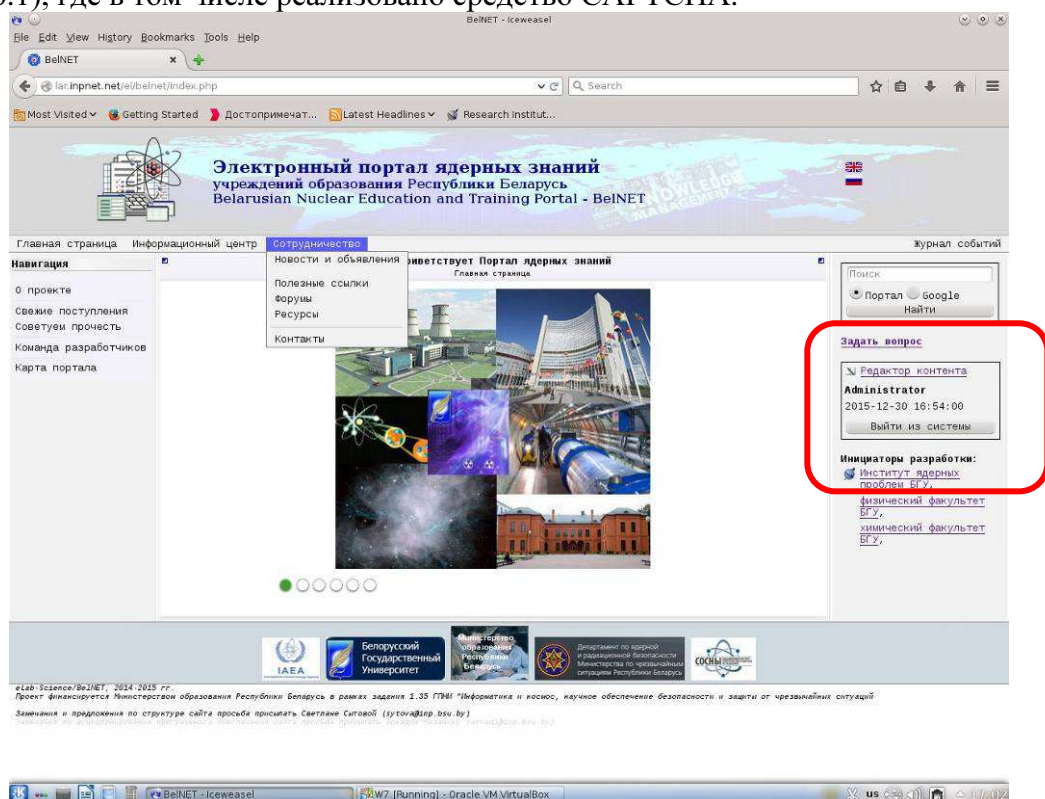


Рисунок 6.2 – Успешная авторизация пользователя.

В случае неверного ввода имени, пароля или букв CAPTCHA пользователь видит сообщение:

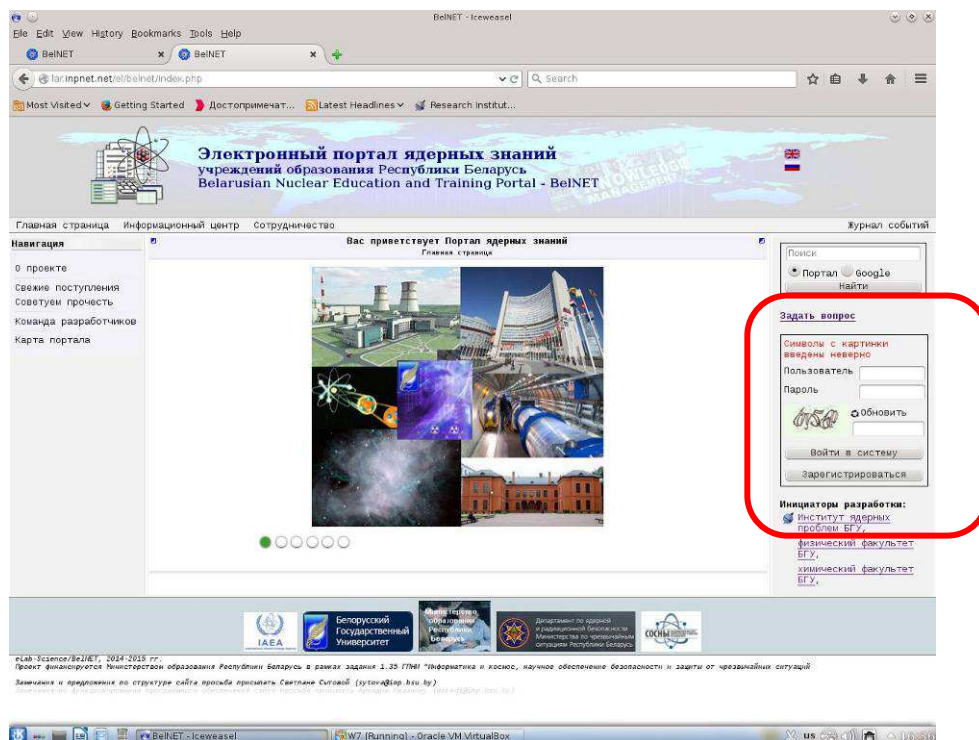


Рисунок 6.3 – Авторизация пользователей на портале ядерных знаний – сообщение о неверной расшифровке CAPTCHA.

Либо:

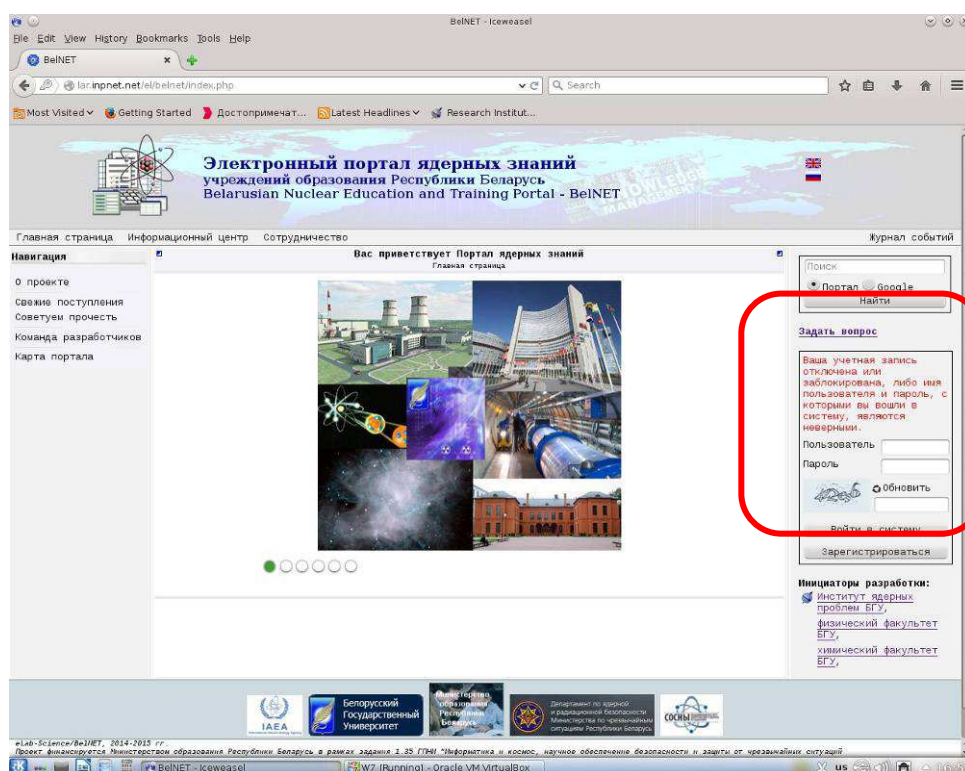


Рисунок 6.4 – Авторизация пользователей на портале ядерных знаний – сообщение о вводе неверного имени пользователя или пароля.

3. Разработан дизайн портала, включая «BelNET Logo», изображенный на рисунке 6.5. Этот логотип основан на логотипе фреймворка eLab, с добавлением схемы атома. Дизайн портала в настоящее время выдержан в очень строгом стиле, позволяющем сосредоточиться на той серьезной информации, которую должен предоставлять портал (см. рисунок 6.6). Портал реализован на русском и английском языках, также реализовано слайд-шоу с картинками и фотографиями по теме.

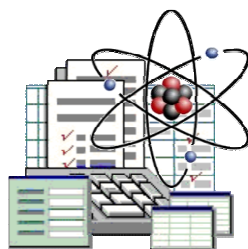


Рисунок 6.5 – BelNET Logo.

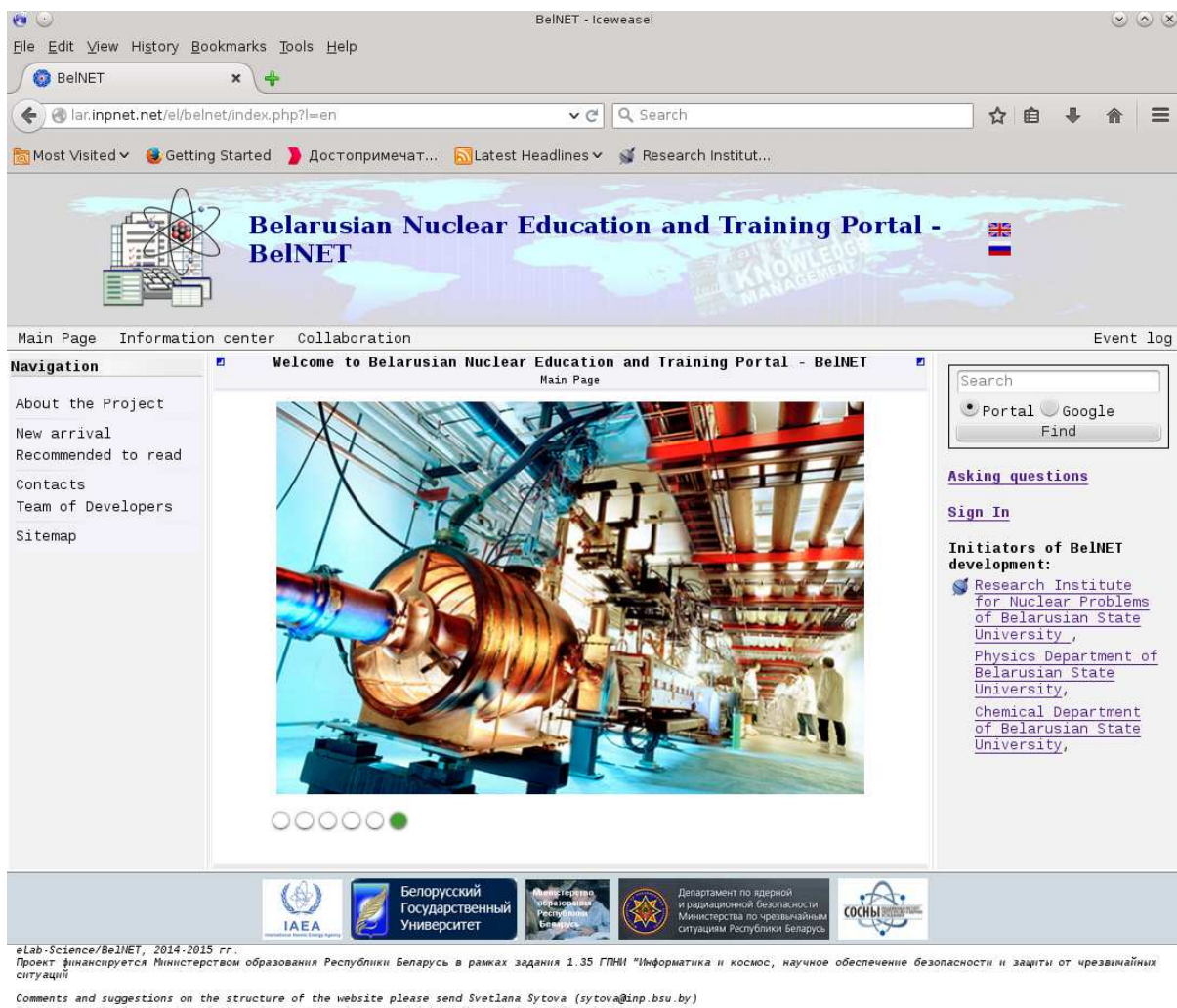


Рисунок 6.6. Главная страница портала на английском языке.

4. Разработан механизм перехода от страниц просмотра знаний к страницам редактирования и обратно (см. рисунок 6.7).

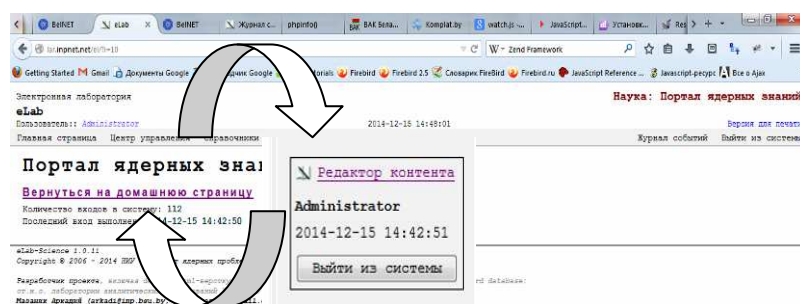


Рисунок 6.7 – От редактора контента к порталу знаний и обратно.

5. По предложенной таксономии портала разработана система категорирования данных портала в виде древовидной структуры. Каждый элемент структуры содержит ссылку на «родительский» элемент. Причем в общем случае, дерево элементов может состоять из более одного корневого элемента, например, как это демонстрируется в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Древовидная структура

Идентификатор элемента	Ссылка на родительский элемент	Наименование элемента информации
1	NULL (корень)	Ядерная физика
2	1	Свойства атомных ядер, энергия связи ядра, энергосвязывание
3	1	ядерные силы
...	...	...
10	NULL (корень)	Ядерная энергетика
11	10	Обзор развития ядерной энергетике в мире
12	10	Атомные станции
...	...	...

В эту структуру укладываются и такие элементы как новости, основные принципы ядерных знаний, включая глоссарий и научно-популярную литературу, наука, как фундаментальная, так и прикладная, практика, учебные курсы и законодательство.

Предложен единственный корневой уровень для всех категорий: «Ядерное образование и обучение». Каждый пункт древовидной структуры знаний содержит в себе также и этот корневой пункт. Таки образом, если рассмотреть, например, законодательство, то получим примерно следующую структуру, изображенную на рисунке 6.6.

6. Создана база данных elab\$science со следующими объектами:

TABLE MENU1 (// **Категории информации по п.4.**

ID integer NOT NULL,

OWNER integer,

NAME varchar(253)

);

CREATE TABLE MENU2 (// **Содержимое меню портала «Информационный центр»**

ID integer NOT NULL,

ID_MENU integer // идентификатор категории ресурса из таблицы MENU1

);

CREATE TABLE RESOURCE (// **Таблица ресурсов портала**

ID integer NOT NULL,

NAME varchar(1023),

SIGN varchar(253),

CODE varchar(127),

AUTHOR varchar(1023),

PUBLISHED timestamp,

EDITION varchar(63),

KEYS varchar(1023),

SUMMARY varchar(4095),

HREF varchar(1023)

);

CREATE TABLE TOPIC (// **Классификация ресурсов**

ID_RESOURCE integer, // идентификатор ресурса из таблицы RESOURCE

ID_MENU integer // идентификатор категории ресурса из таблицы MENU1

);

В БД elab\$science созданы хранимые процедуры и просмотры, обеспечивающие функциональность портала с древовидной структурой данных

7. База данных elab\$science содержит объекты для функционирования в рамках системы eLab.

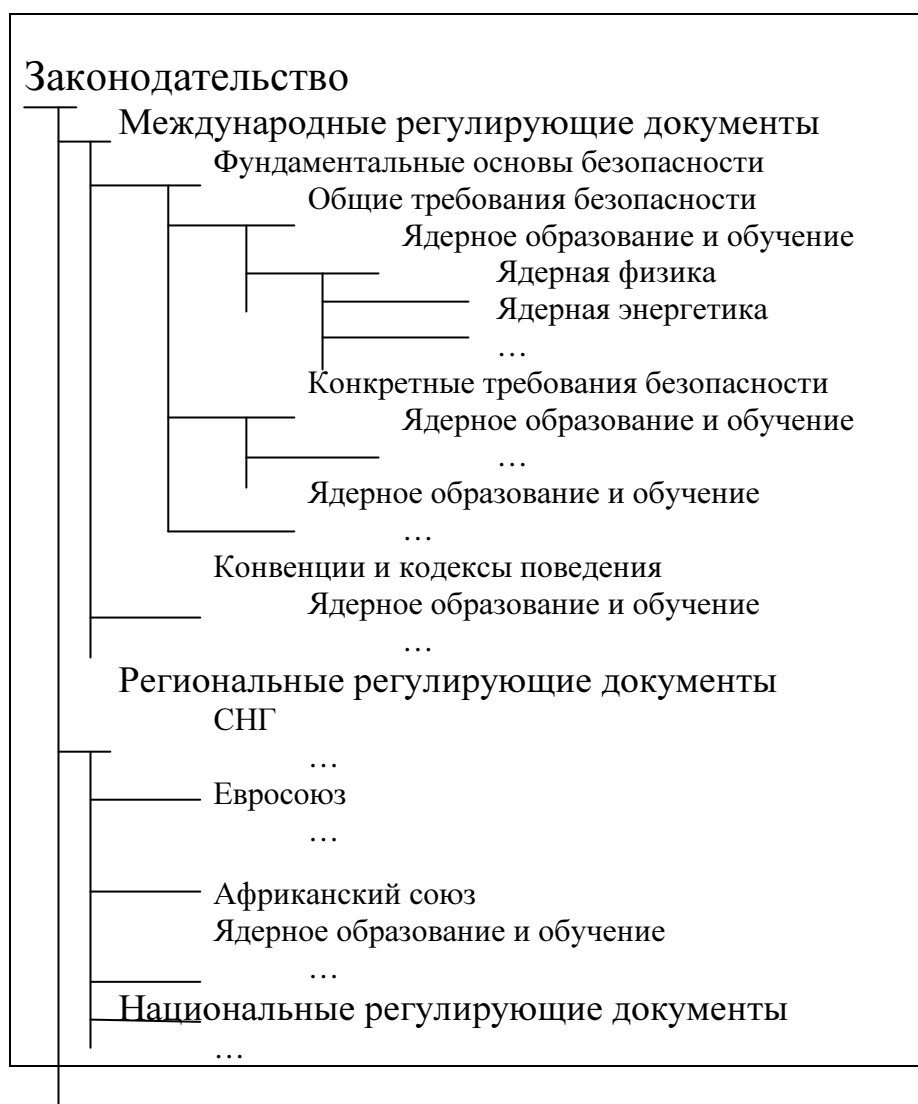


Рисунок 6.8 – Древовидная структура знаний

8. Разработано меню портала.

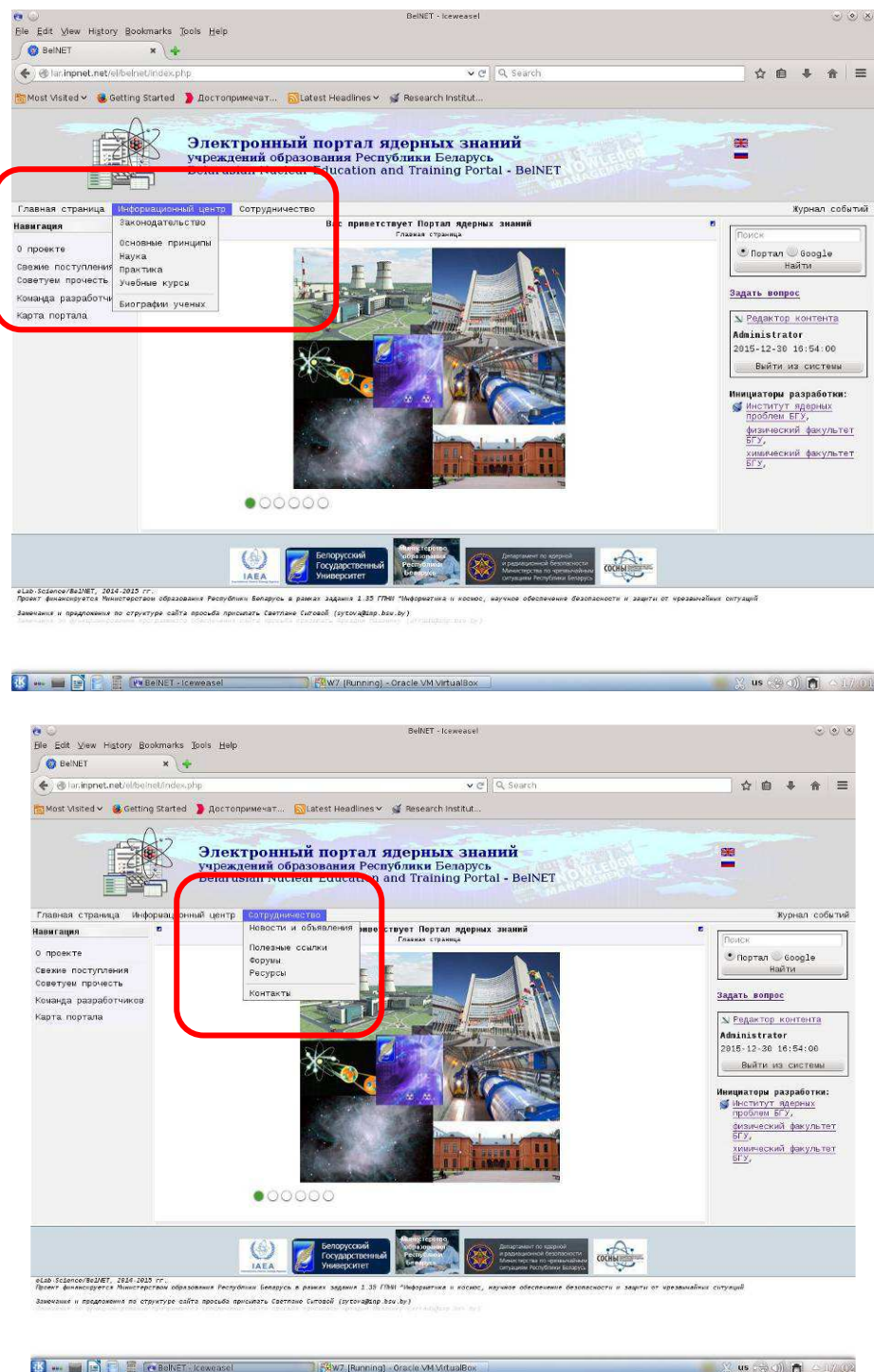


Рисунок 6.9 – Меню портала ядерных знаний.

9. Каркас страницы портала состоит из пяти областей: заголовок, нижний колонтитул и главная информационная часть, поделенная динамическими разделителями на центральную информационную область, левую и правую управляющую области. Динамические разделители позволяют клиенту в браузере легко масштабировать контент для удобства восприятия данных и управления контентом. Динамические разделители реализованы на уровне JavaScript.

10. С привлечением инструментов PHP, JavaScript и XAJAX, разработан пользовательский элемент управления **treeview** для отображения и управления контентом в иерархической структуре типа «дерево» (см. рисунок 6.10).

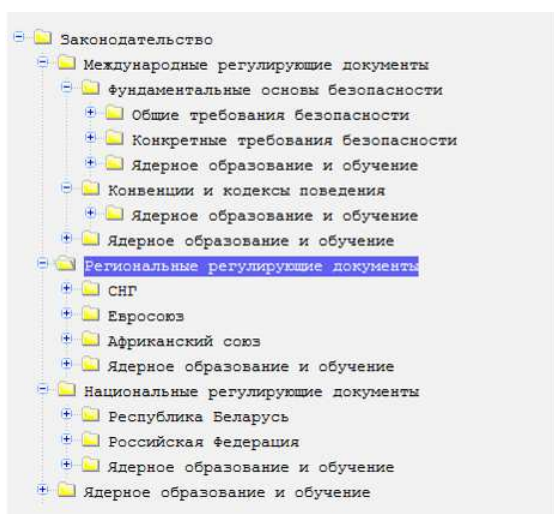


Рисунок 6.10 – Дерево ядерных знаний.

11. Разработан механизм детализации информации (см. рисунок 6.11) и загрузки файлов документов и данных с сервера, здесь реализован механизм ввода информации ИК документа. Фактически таким образом реализована CMS портала.

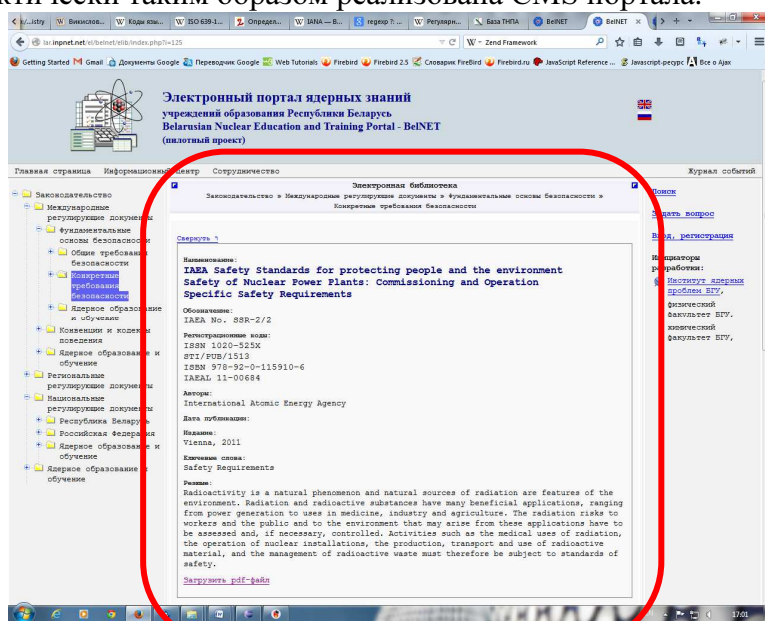


Рисунок 6.11 – Детализация информации, загрузка файлов.

12. Для администрирования и редактирования открытого контента в системе eLab зарегистрировано web-приложение “Science”, разработаны специальные модули (которые создаются по установленным шаблонам, но не автоматически).

12.1. Главная страница администратора портала:

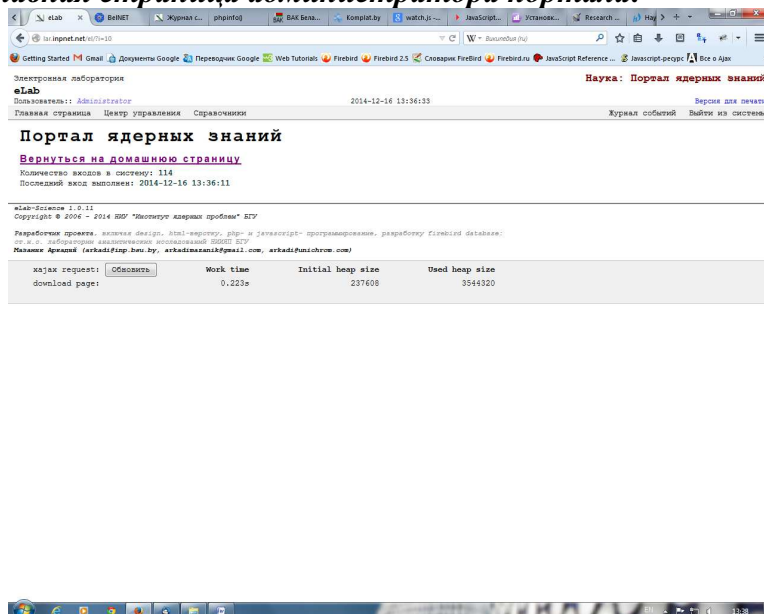


Рисунок 6.12 – Главную страницу администратора портала ядерных знаний.

12.2. Разделы портала знаний.

Разделы портала соответствуют выбранной таксономии портала, представляют собой категории информации с древовидной иерархией (см. п.4 данной главы), определяются содержимым таблицы MENU1 (см. п.5.) в базе данных elab\$science.

Для редактирования содержимого таблицы MENU1 разработана административная страничка портала «Разделы портала знаний» (см. рисунок 6.13), позволяющая добавлять новые разделы знаний, удалять и модифицировать существующие разделы, включая наименования разделов и их взаимные зависимости. Доступ к странице осуществляется через пункт главного меню «Центр управления»

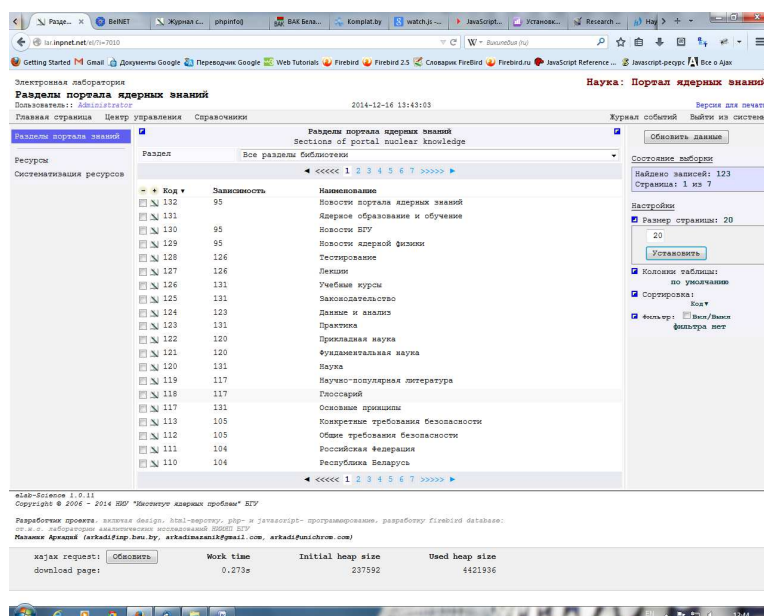


Рисунок 6.13 – Разделы портала знаний.

12.3. Ресурсы портала ядерных знаний

Ресурсы портала ядерных знаний в базе данных представлены таблицей RESOURCE. Таблица содержит карточку-описание ресурса (файла или группы файлов) и ссылку на соответствующий файл. Ссылки могут быть как локальными (на сервере) так и глобальными (в интернете). Отсюда следует, что портал может быть использован как средство категорирования и упорядочивания информации по ядерной тематике, находящейся в интернете.

Для редактирования указанной таблицы разработана административная страничка портала «Ресурсы портала ядерных знаний» (см. рисунок 6.14), позволяющая добавлять новые ресурсы, удалять и модифицировать существующие ресурсы портала ядерных знаний.

Доступ к странице осуществляется через пункт главного меню «Центр управления».

12.4. Систематизация ресурсов портала ядерных знаний

Категорирование ресурсов портала ядерных знаний в соответствии с таксономией портала (разделами знаний по п.14.2. данной Главы) фиксируется в таблице TOPIC (см. п.5.) базы данных портала. Процесс категорирования представляет собой сопоставление выбранному ресурсу одной и более категории из таблицы MENU1.

Для редактирования таблицы TOPIC разработана административная страничка портала «Систематизация ресурсов портала ядерных знаний» (см. рисунок 6.15), позволяющая каждому ресурсу присваивать новые категории и удалять существующие категории.

Доступ к странице осуществляется через пункт главного меню «Центр управления».

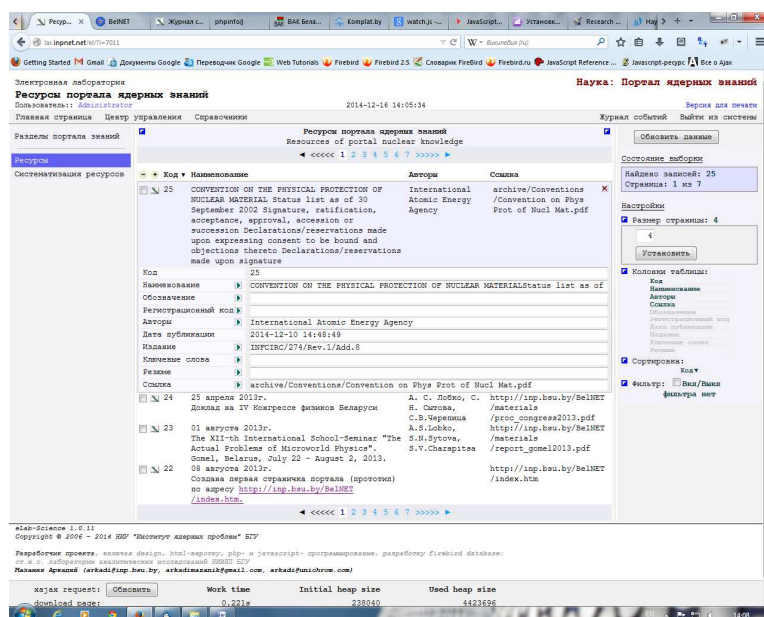


Рисунок 6.14 – Ресурсы портала ядерных знаний.

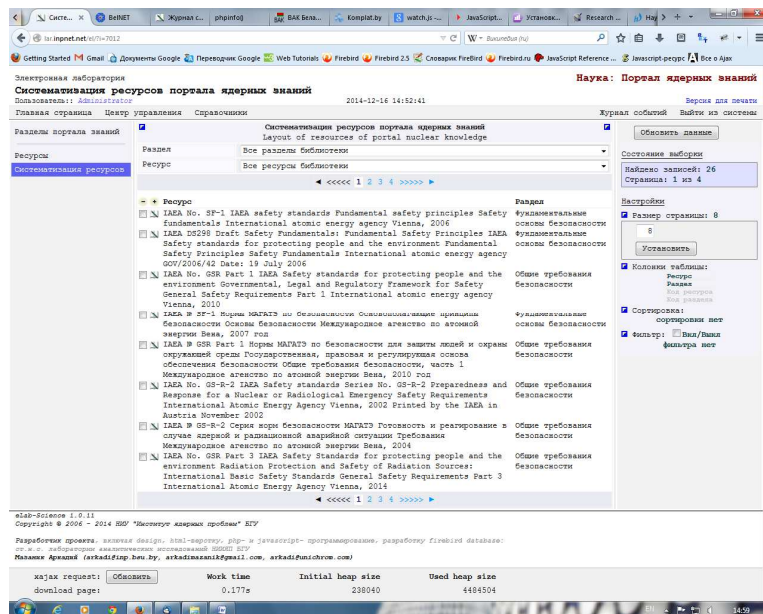


Рисунок 6.15 – Систематизация ресурсов портала ядерных знаний.

13. Разработан собственный механизм сохранения текущих состояний пользовательского интерфейса, включая данные, вводимые пользователями в соответствующие элементы редактирования, для каждого пользователя.

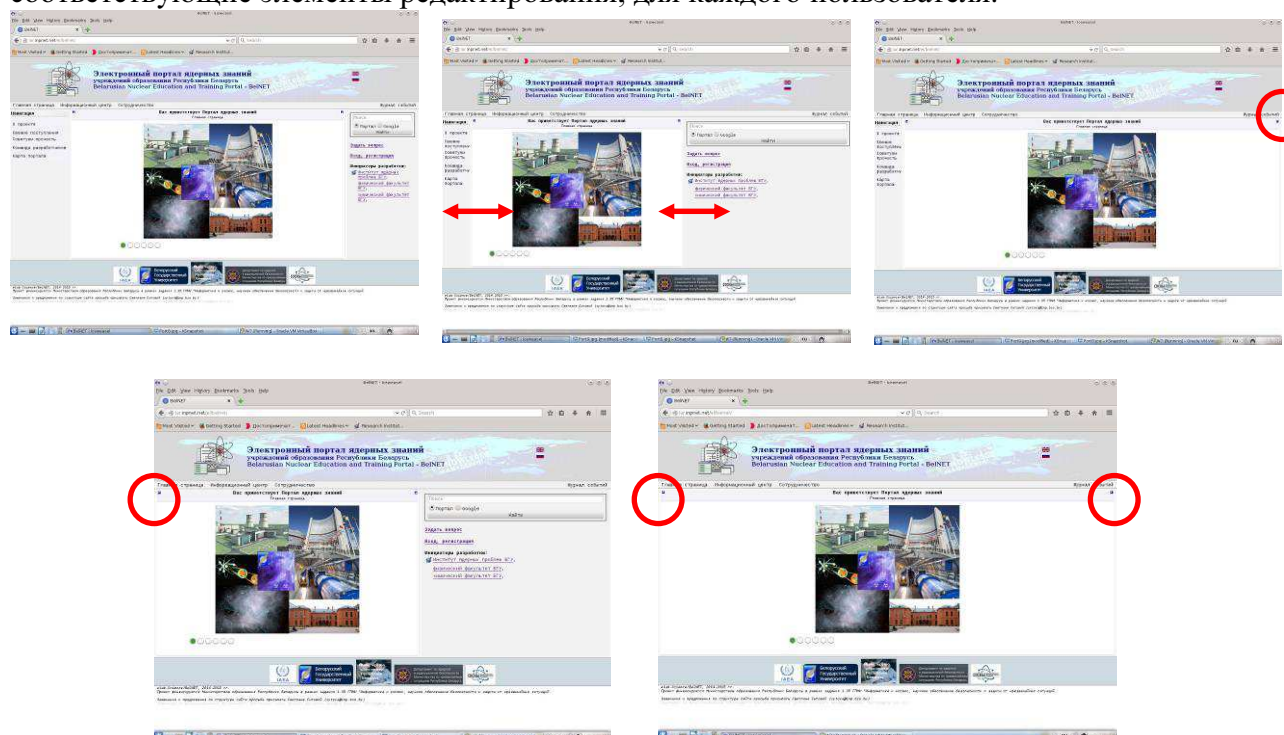


Рисунок 6.16 – Механизм сохранения текущих состояний пользовательского интерфейса.

14. Реализованы процедуры настройки размера страницы, поиска, сортировки и фильтрации по нескольким параметрам (см. рисунок 6.17).

Доступ к файлам может быть задан (изменен) стандартными для портала средствами путем выбора необходимого доступа из списка:

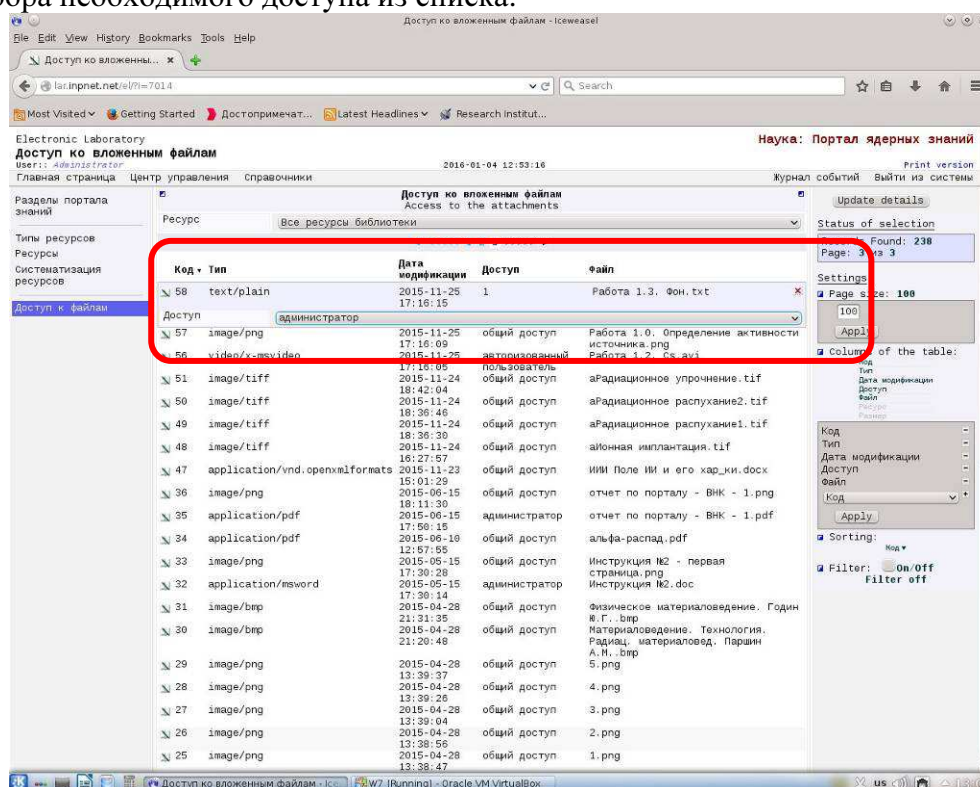


Рисунок 6.19 – Определение доступа к файлам.

По умолчанию файлам присваивается общий доступ.

В случае присвоения файлам свойства «авторизованный пользователь» файлы доступны для прочтения только в случае авторизации пользователя (файлы помечены «зеленой» фишкой), в противном случае – «красной» фишкой (см. рисунок 6.20) и недоступны для просмотра и скачивания.

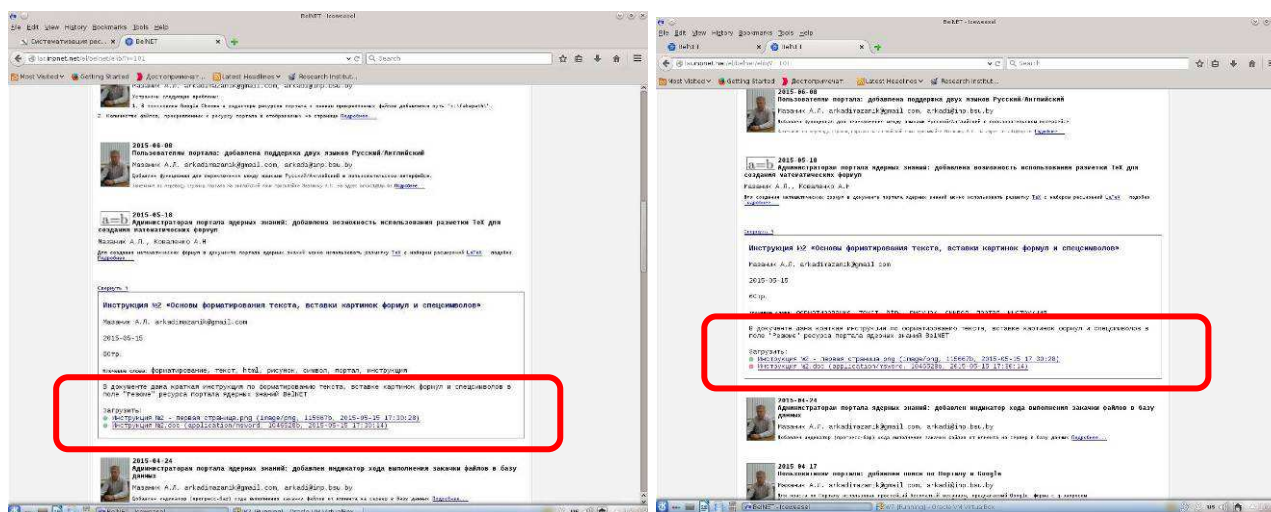


Рисунок 6.20 – Реализация доступ к файлам.

16. Реализован индикатор хода выполнения загрузки файлов в базу данных.

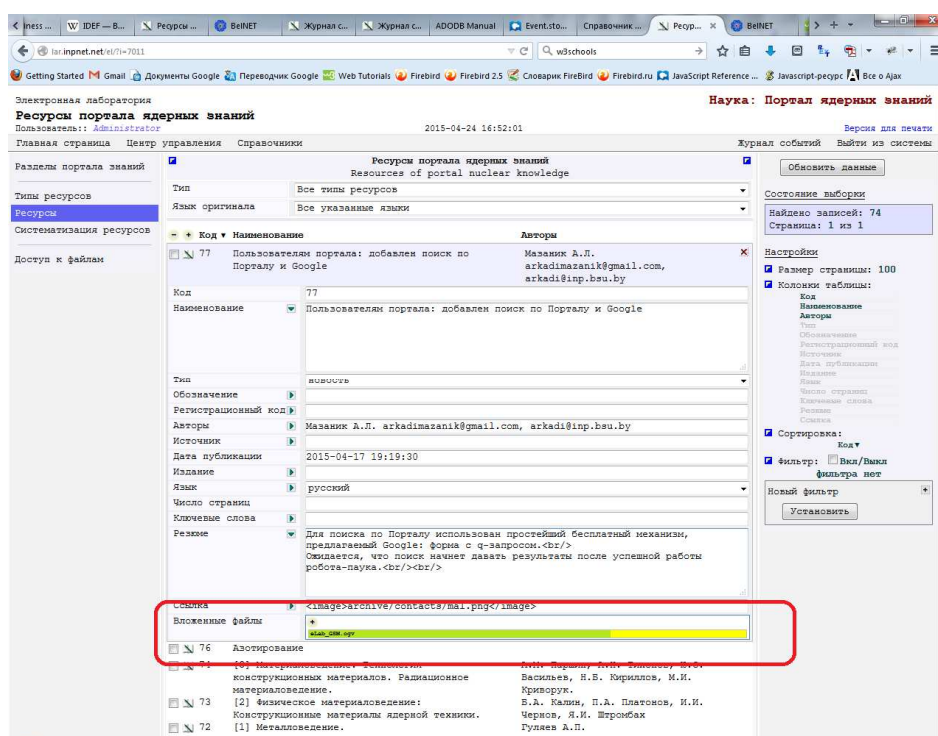


Рисунок 6.21 – Индикатор хода выполнения загрузки файлов в базу данных.

Максимальный объем загружаемого файла не должен превосходить 16 Мб. Рекомендуется разбивать большие файлы на несколько частей.

17. Порядок добавления ресурса в библиотеку портала ядерных знаний BelNET заключается в следующем.

Открываем ссылку <http://lar.inpnet.net/el/belnet/>.

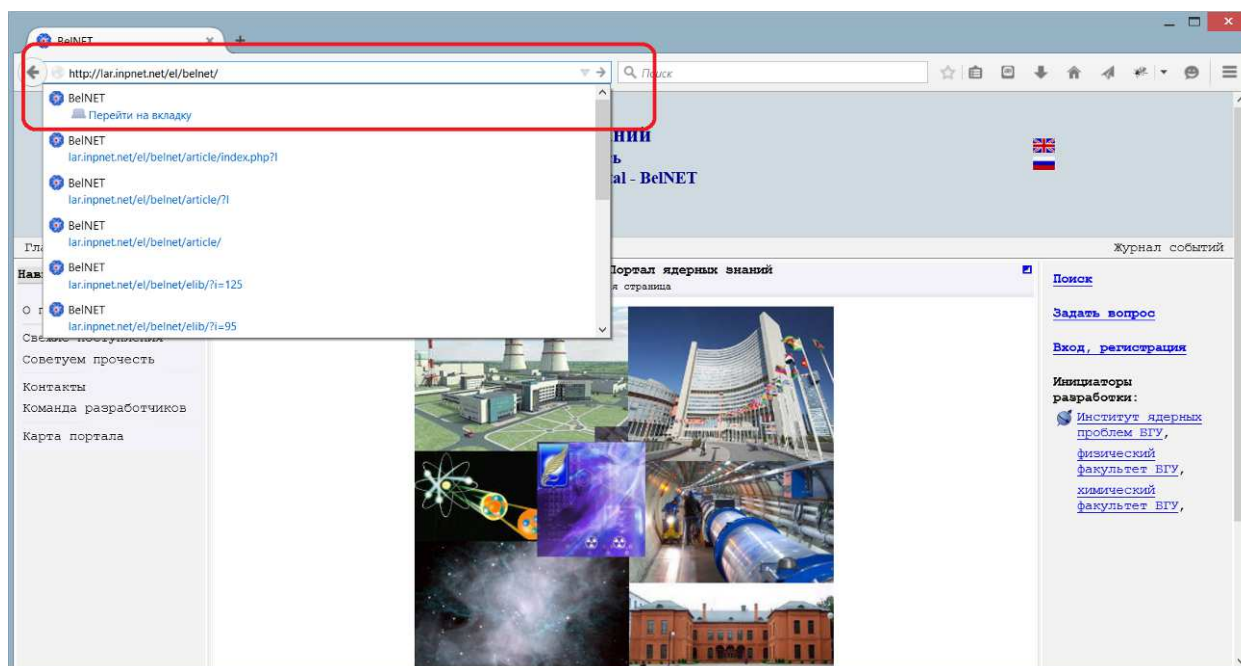
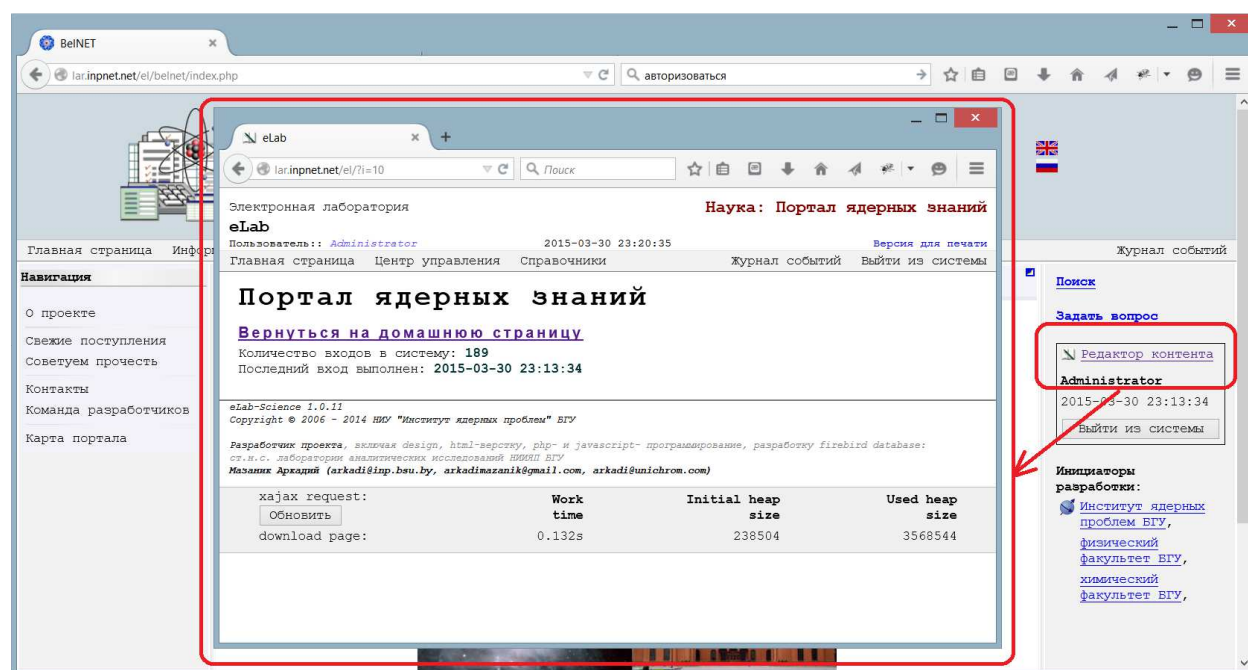


Рисунок 6.22 – Первый этап добавления ресурса в библиотеку BelNET.

The screenshot shows the BeNET website interface. The header includes the portal's name in Russian and Belarusian, a logo of a nuclear reactor, and a navigation bar. The main content area features a large image of a nuclear power plant and a building. A sidebar on the left contains navigation links. A search bar and a login/register section are visible on the right. Red annotations highlight the 'Вход, регистрация' (Login, registration) link and the 'Администратор' (Administrator) section.

Переходим в редактор контента.



Выбираем раздел «Ресурсы».

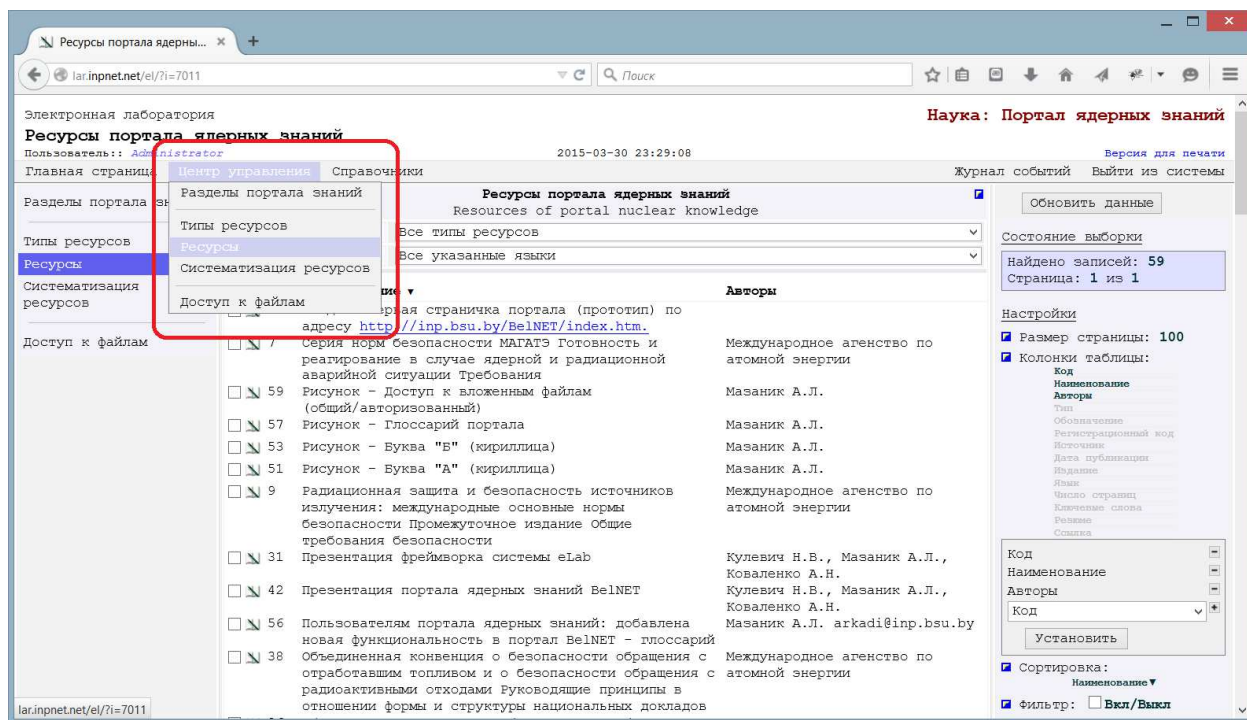


Рисунок 6.25 – Четвертый этап добавления ресурса в библиотеку BelNET.

Добавляем новую запись, нажимая кнопку .

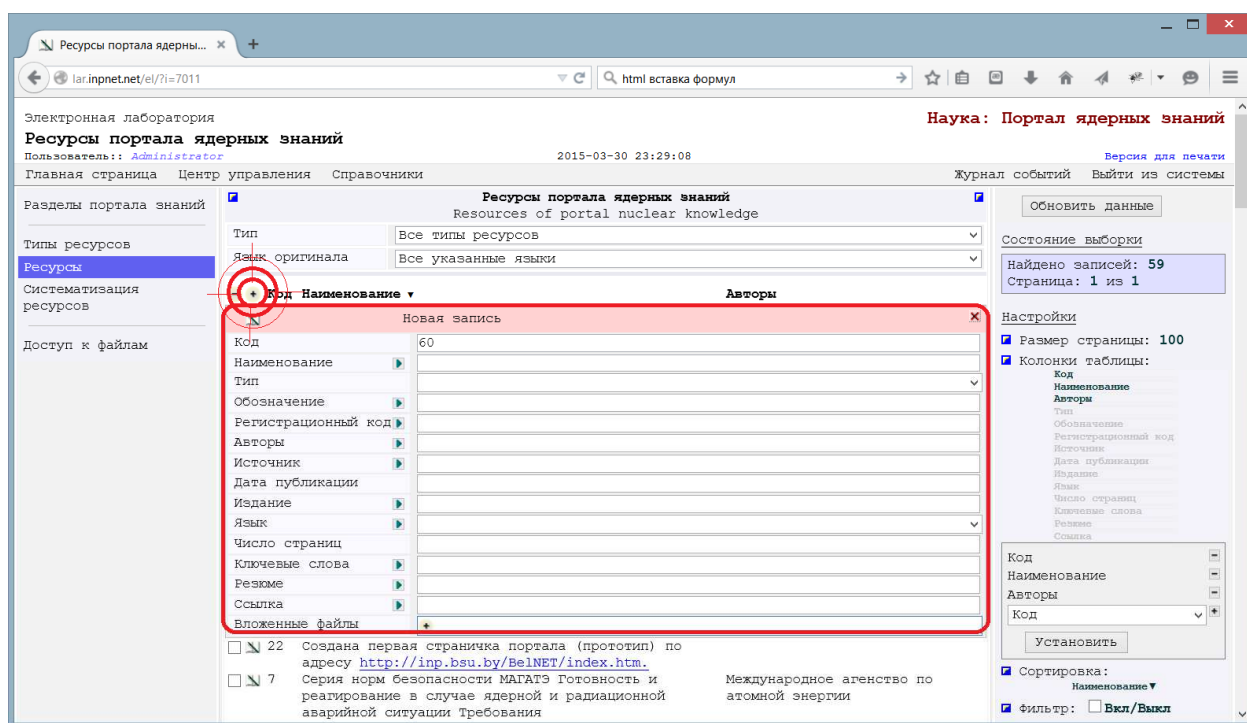


Рисунок 6.26 – Пятый этап добавления ресурса в библиотеку BelNET.

«Код» – ключевое поле таблицы ресурсов в базе данных целого типа; значение для новой записи предлагается автоматически с возможностью модификации пользователем; если введенное значение уже имеется, будет высвечена соответствующая ошибка при попытке сохранить запись.

Заполняем информационную карту ресурса в соответствии с приведенными названиями полей и сохраняем запись, нажимая кнопку .

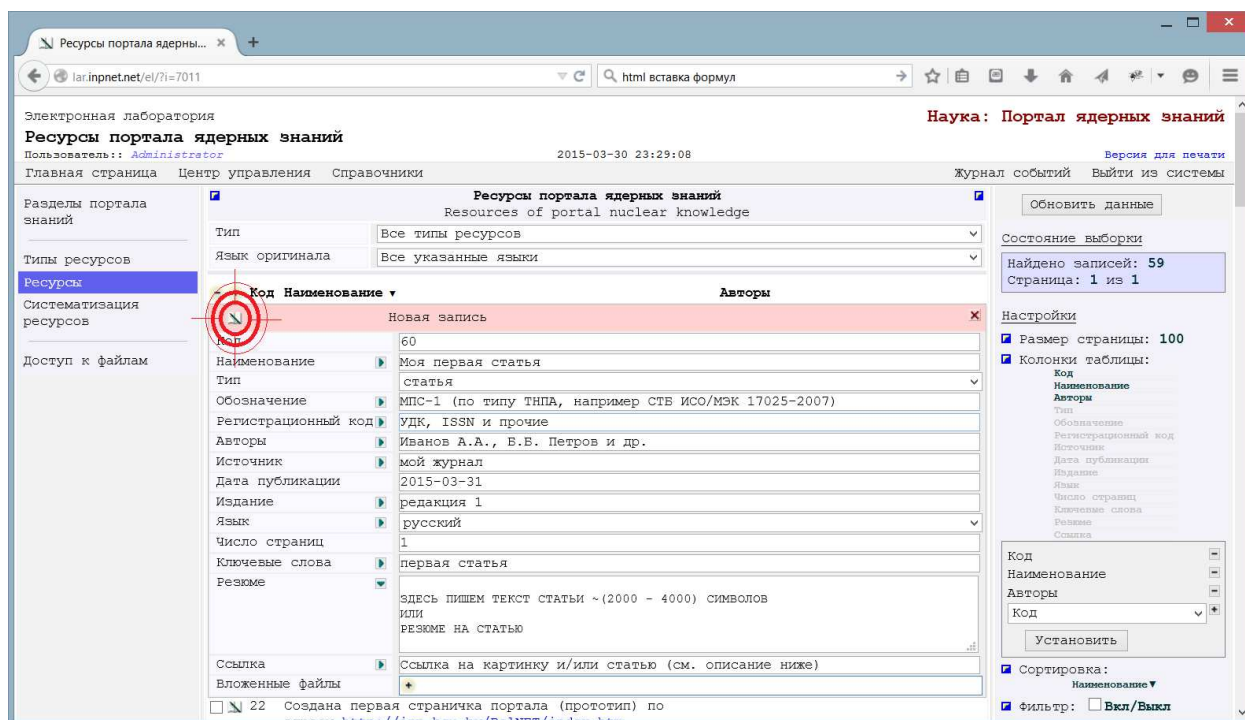


Рисунок 6.27 – Шестой этап добавления ресурса в библиотеку BelNET.

Для отмены операции сохранения нажимаем кнопку .

Выбираем раздел «Систематизация ресурсов».

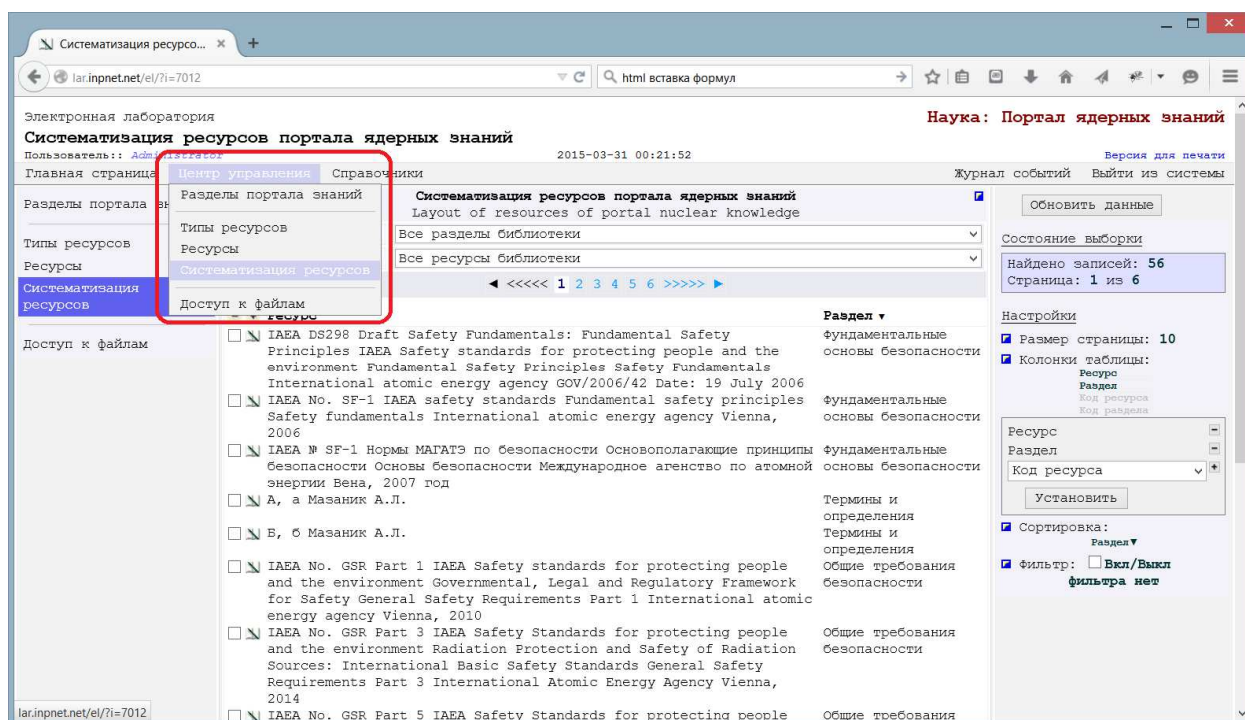


Рисунок 6.28 – Седьмой этап добавления ресурса в библиотеку BelNET.

Здесь выполняется сопоставление вводимого ресурса с разными разделами портала знаний.

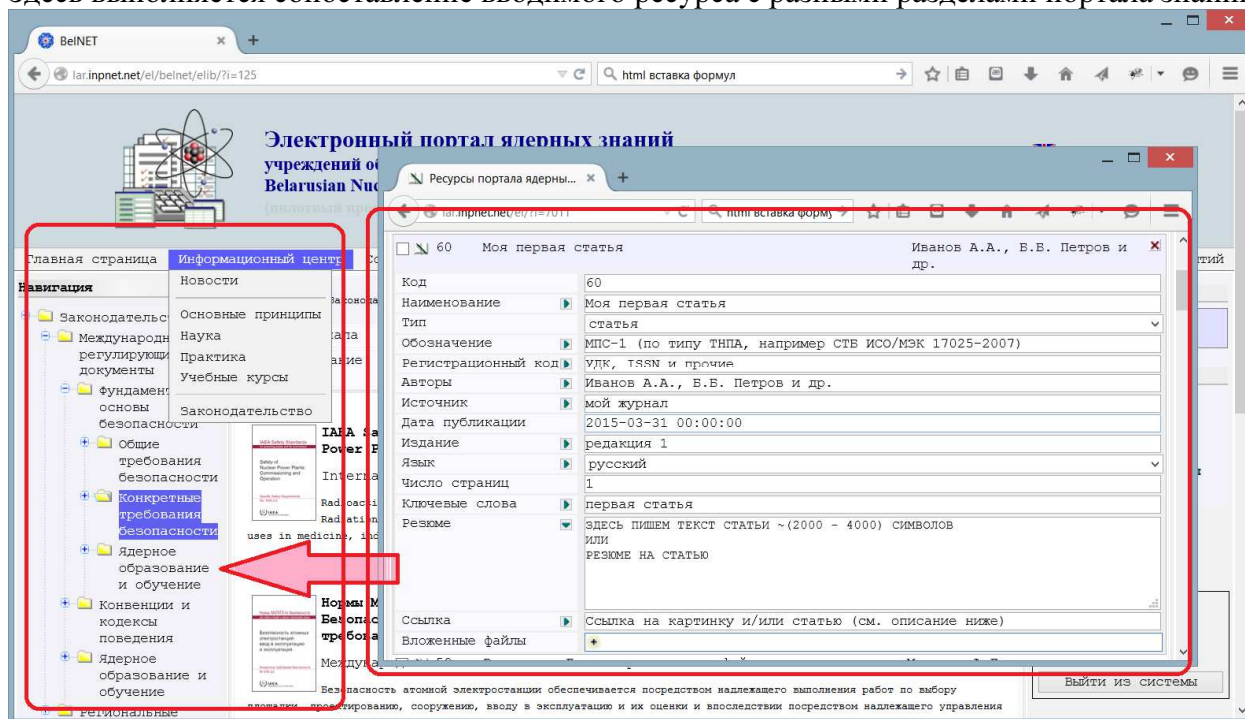


Рисунок 6.29 – Восьмой этап добавления ресурса в библиотеку BelNET.

Любой ресурс может быть охарактеризован более чем одной категорией и, соответственно, будет присутствовать в соответствующих разделах портала знаний.

Добавляем новую запись , выбираем ресурс и соответствующий ему раздел знаний, сохраняем изменения

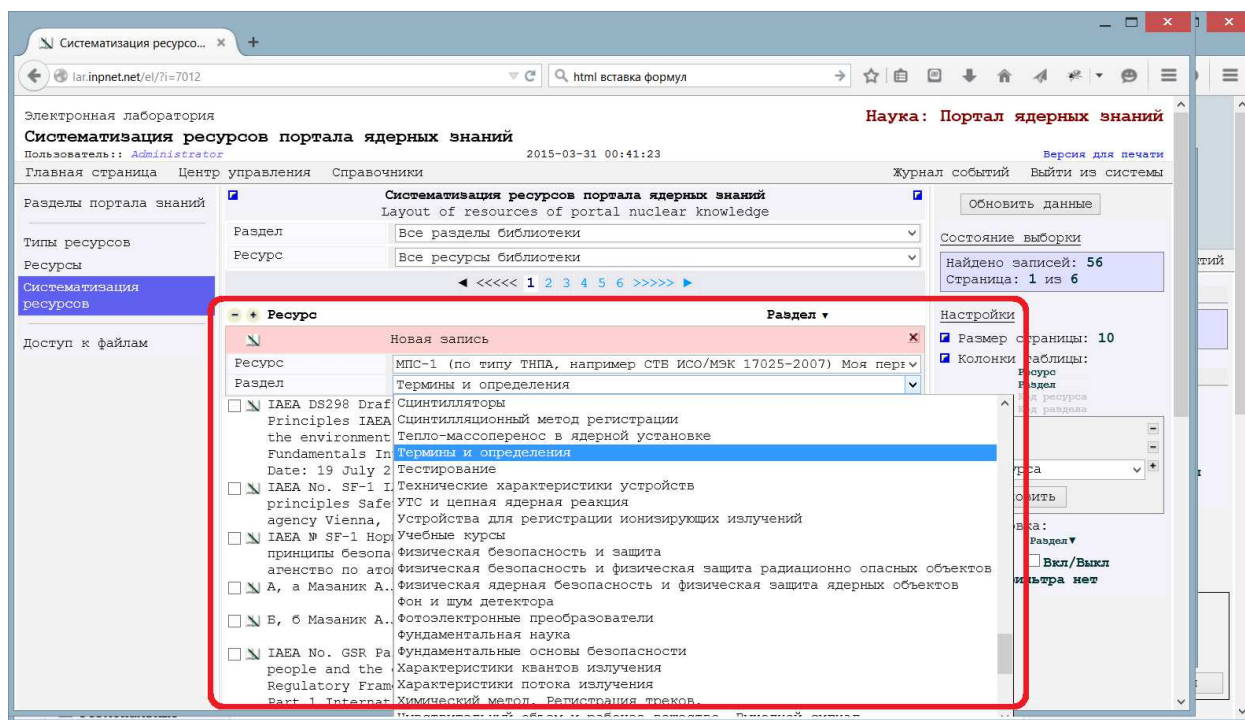


Рисунок 6.30 – Девятый этап добавления ресурса в библиотеку BelNET.

Возвращаемся в «Информационный центр» портала и проверяем свою работу.

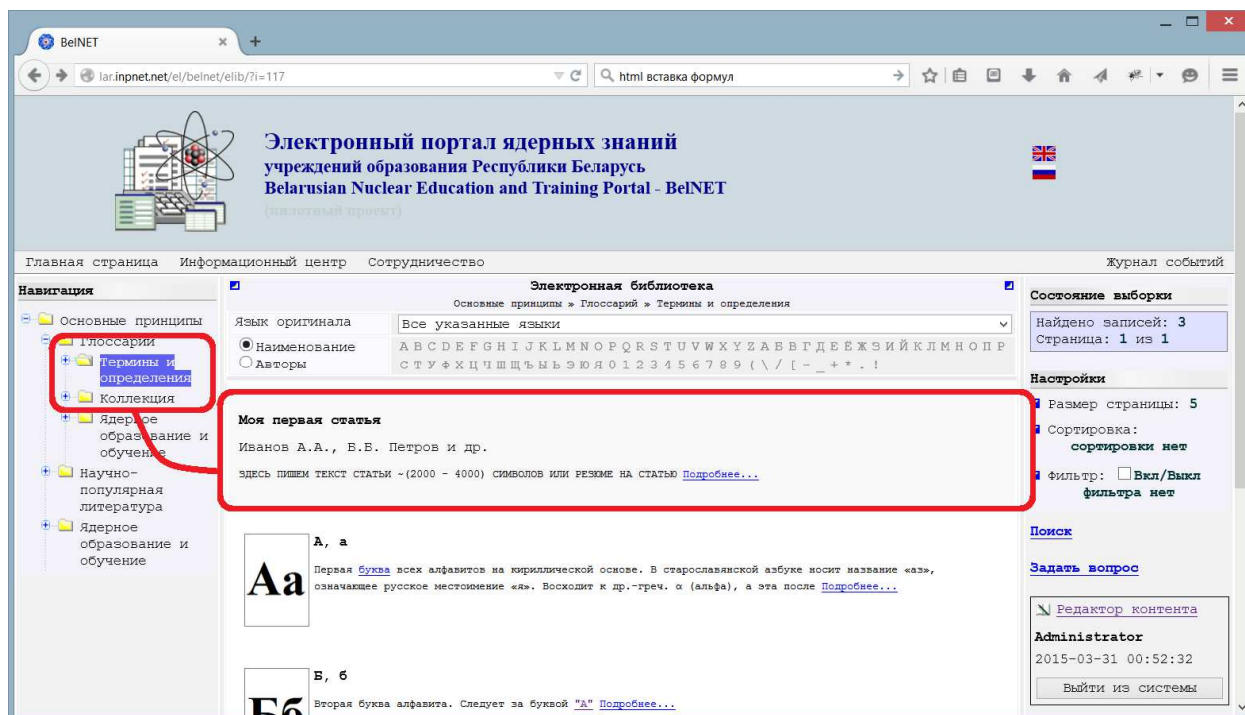


Рисунок 6.31 – Последний этап добавления ресурса в библиотеку BelNET.

18. Реализованы основы форматирования текста, вставки картинок формул и спецсимволов. Инструкция по форматированию текста заключается в следующем.

- Содержимое ресурса **редактируется** в поле «Резюме».
- Сворачивание  или **раскрывание**  области редактирования при необходимости осуществляется соответствующими кнопками.
- **Изменение** размер области редактирования при необходимости можно произвести ухватив и двигая «мышкой» за правый нижний угол этой области .
- **Ввод и редактирование** содержимое ресурса осуществляется **по правилам HTML** (от англ. HyperText Markup Language — «язык гипертекстовой разметки») — стандартный язык разметки документов во Всемирной паутине.
- **Язык разметки** см., например, здесь: <http://www.w3schools.com/tags/>

Каждый новый **параграф** оборачивается тегами `<p>содержимое параграфа</p>`

Выделенный текст оборачивается тегами `<b>выделенный (жирный) текст</b>`

Наклонный текст оборачивается тегами `<i>наклонный текст (курсив)</i>`

Верхний индекс оборачивается тегами `<sup>верхний индекс (superscript)</sup>`

Нижний индекс оборачивается тегами `<sub>нижний индекс (subscript)</sub>`

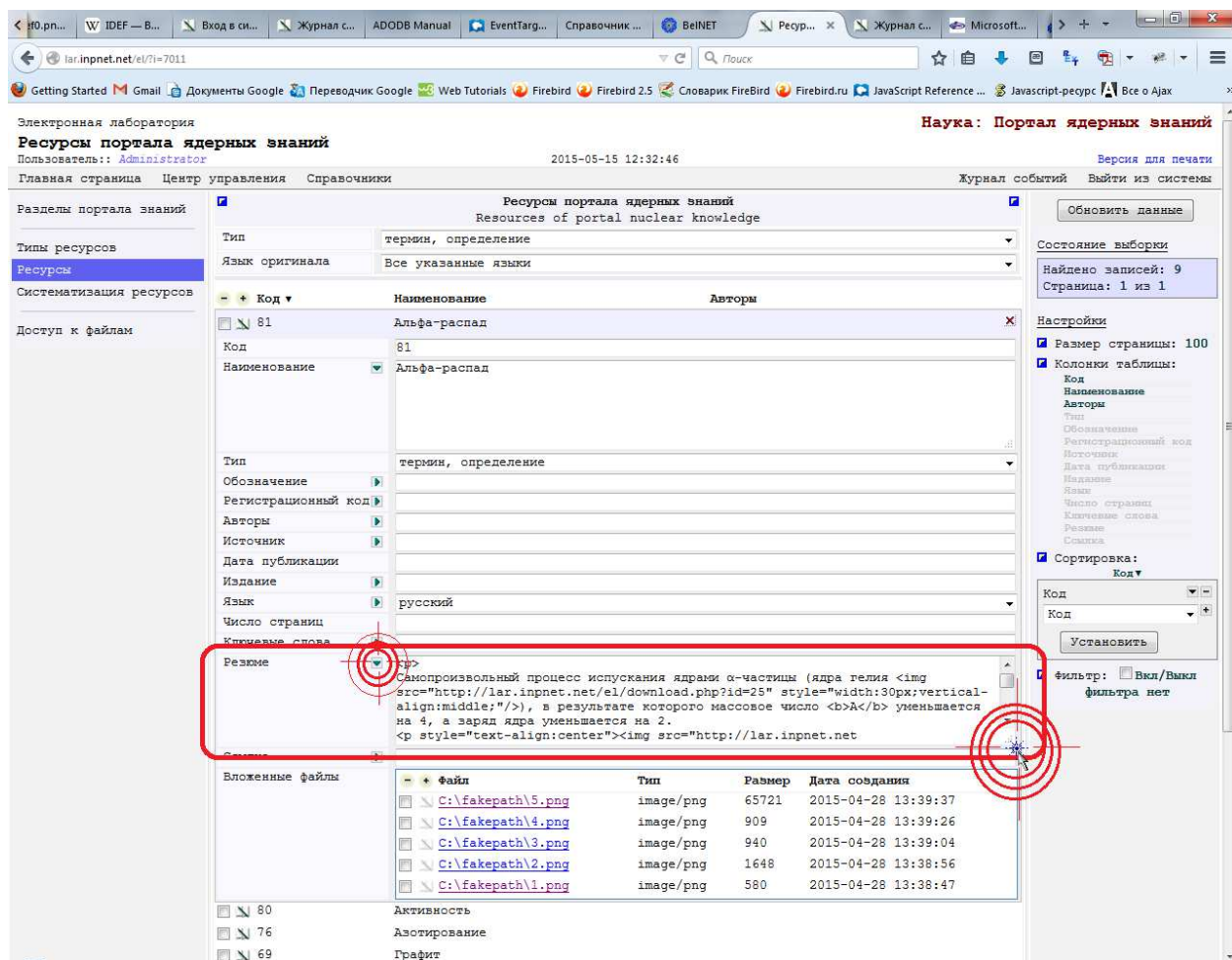


Рисунок 6.32 – Форматирование текста.

- **Красная строка** задается стилем параграфа
`<p style="text-indent:Npx;">содержимое параграфа</p>`, где *N* – целое число – величина сдвига текста в пикселях.
- **Выравнивание текста** задается стилем параграфа
`<p style="text-indent:Npx; text-align:Align;">содержимое параграфа</p>`, где *Align* – строка принимающая следующие значения:
 - left** – по левому краю
 - right** – по правому краю
 - center** – по центру
 - justify** – по ширине
- **Шрифт и размер текста** задается стилем параграфа
`<p style="text-indent:Npx; text-align:Align;font-family: Имя шрифта; font-size:Npx;">содержимое параграфа</p>`, где *Имя шрифта* – строка-наименование шрифта (можно посмотреть в списке шрифтов редактора Word), *N* – целое число – размер шрифта в пикселях.

Более полную информацию см., например, здесь http://www.w3schools.com/css/css_font.asp

- **Вставка картинки** может производиться как в текущем параграфе, так и в собственном параграфе с иными атрибутами выравнивания с использованием тега
``, где

Ссылка – строка-ссылка на картинку из интернета, например <http://inp.bsu.by/personal/sytova/sytova.jpg>.

- **Размер картинки** задаем стилем ``, где
X – целое число – ширина картинки в пикселях
Y – целое число – высота картинки в пикселях
Если необходимо сохранить пропорции картинки, необходимо задавать только ширину (width) или только высоту (height) картинки.

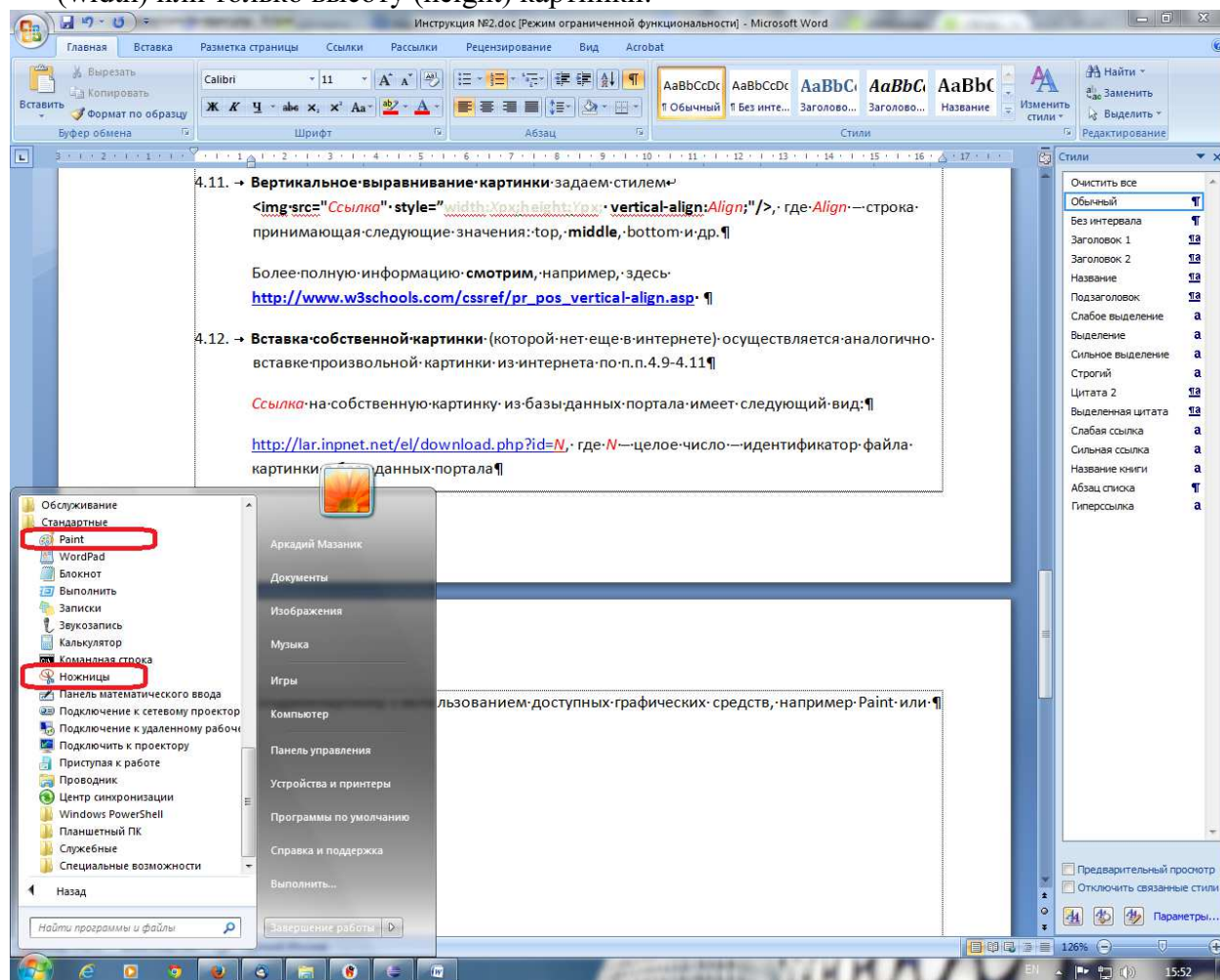


Рисунок 6.33 – Форматирование текста.

- **Вертикальное выравнивание картинки** задаем стилем ``, где *Align* – строка принимающая следующие значения: top, middle, bottom и др.

Более полную информацию **смотрим**, например, здесь:

http://www.w3schools.com/cssref/pr_pos_vertical-align.asp

- **Вставка собственной картинки** (которой нет еще в интернете) осуществляется аналогично вставке произвольной картинки из интернета.

Ссылка на собственную картинку из базы данных портала имеет следующий вид:

<http://lar.inpnet.net/el/download.php?id=N>, где *N* – целое число – идентификатор файла картинки в базе данных портала.

- **Создание и сохранение картинки** осуществляется на диске компьютера пользователя с использованием доступных графических средств, например **Paint** и **Ножницы**, которые являются стандартными программами Windows.
- **Добавление картинки в список вложенных файлов** ресурса осуществляется нажатием на **+** в поле «Вложенные файлы» (шаг 1).
- **Сохранение** внесенных изменений произвести как в шаге 2, в результате чего вложенные файлы приобретают уникальные идентификаторы в пределах базы данных портала.
- **Определение идентификатор картинки** (шаг 3) из содержимого ссылки производится установлением указателя «мышки» на сформированную ссылку или из адресной строки, открыв эту ссылку в новом окне или закладке.
- **Идентификатор** собственной картинки указывается в ссылке на эту картинку в поле «Резюме».
- **Вставка формулы** выполняется в два этапа: а) преобразуем формулу в рисунок, например, с использованием стандартных средств Windows **Paint** и **Ножницы**; б) вставляем рисунок формулы в содержимое ресурса.

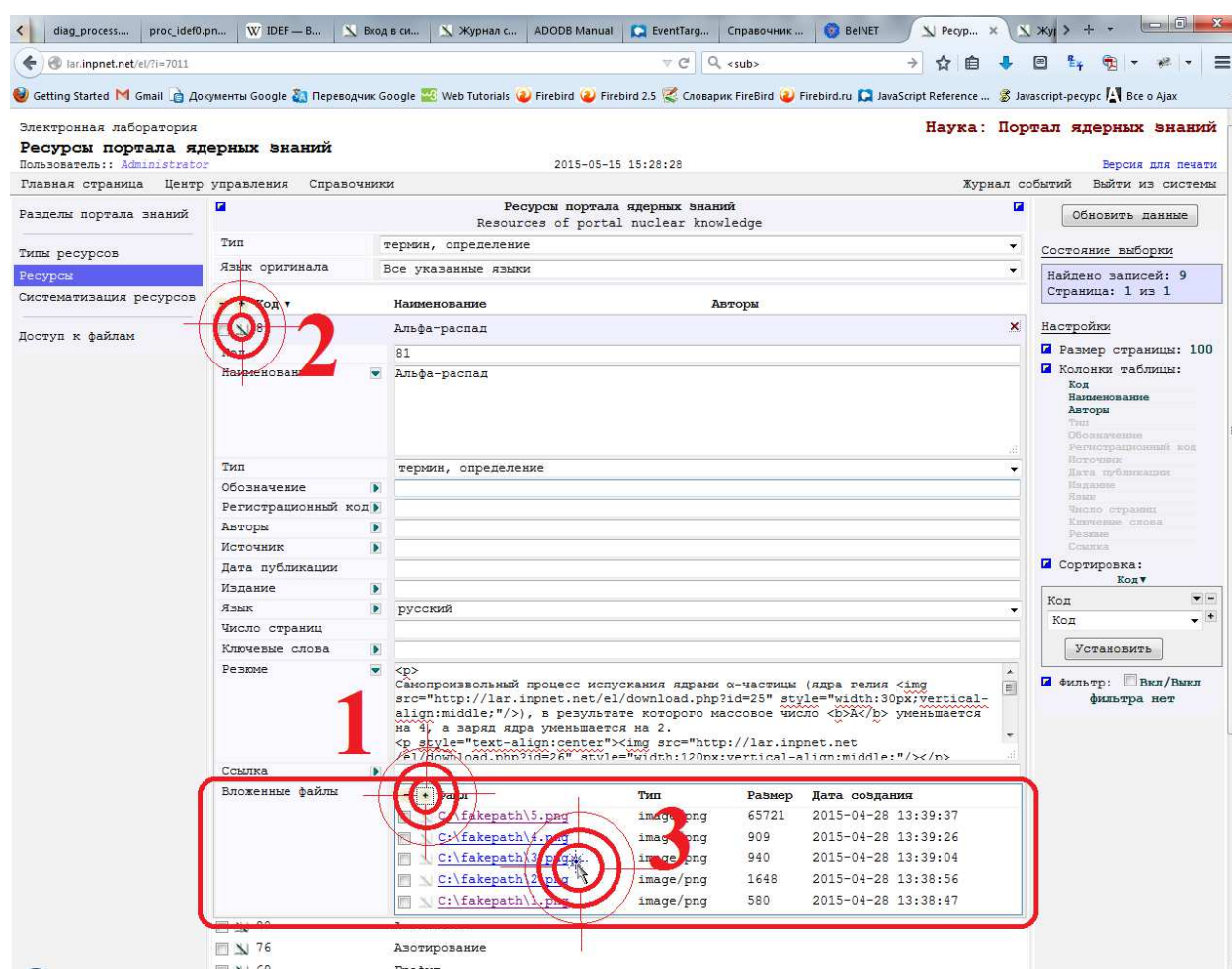


Рисунок 6.34 – Форматирование текста.

- **Вставка специальных символов** осуществляется операциями копирования и вставки (copy/paste) символов из стандартного служебного приложения windows **Таблица символов**.

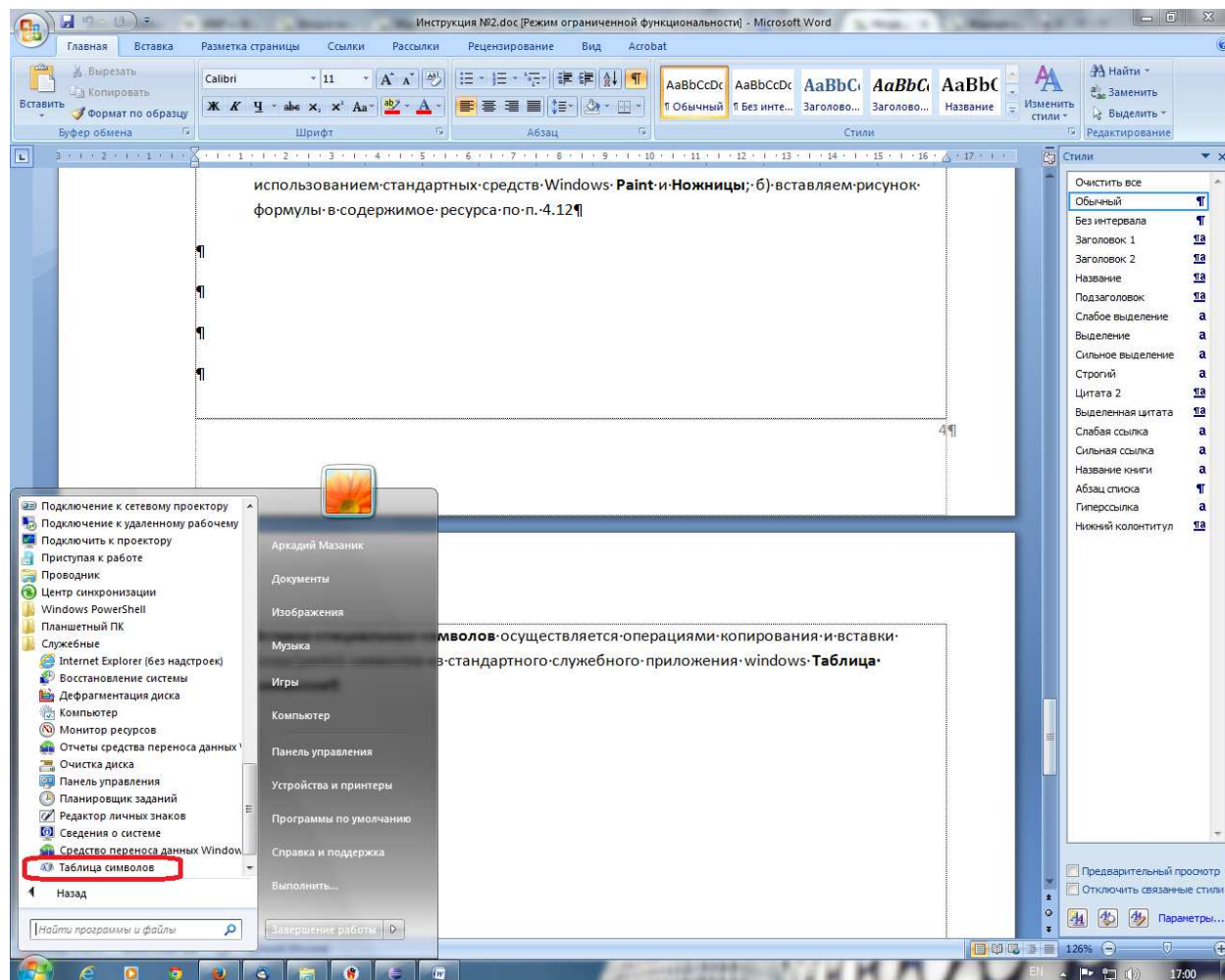


Рисунок 6.35 – Форматирование текста.

- **Шрифт** выбирается «Arial unicode MS», содержащий полный список существующих символов.

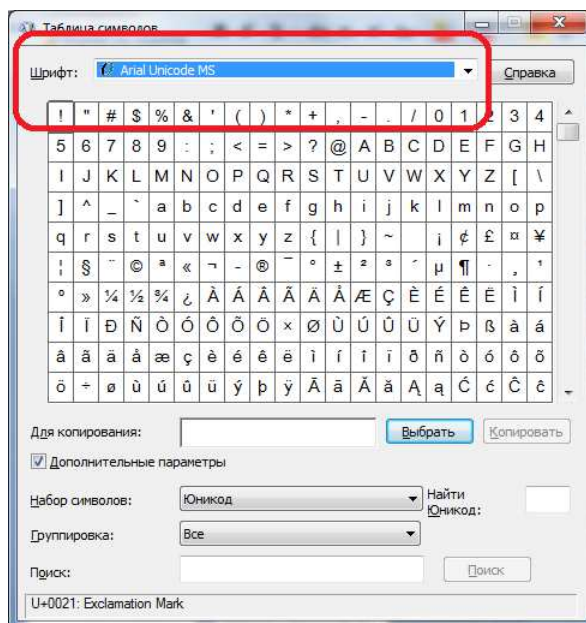


Рисунок 6.36 – Форматирование текста.

- Находим и копируем символ из указанной таблицы.
- Вставляем символ в текст ресурса.

Пример!

```
<p>
Самопроизвольный процесс испускания ядрами  $\alpha$ -частицы (ядра гелия ), в результате которого массовое число <b>A</b> уменьшается на 4, а
заряд ядра уменьшается на 2.
<p style="text-align:center"></p>
<p>
Например, в результате  $\alpha$ -распада ядро радия  преобразуется в ядро радона 
</p>
<p style="text-align:center"></p>
```

Количество текста в поле «Резюме» ограничено 4000 байтами. Символы ASCII (латиница) имеют размер в 1 байт. Специальные символы Unicode – 4 байта. Кириллические символы представлены кодировкой Unicode.

19. Для создания математических формул в документе портала ядерных знаний можно использовать разметку TeX с набором расширений LaTeX подобно разметке формул в MediaWiki.

Формулы отображаются в виде рисунка *.png, например:

$$A = \int_{a_1}^{a_2} |F_2(r) - F_1(r)| \cdot dr$$

$$r_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

20. Продемонстрирована возможность реализации на базе разработанной в рамках задания 1.35 системы управления контентом портала знаний в области наноэлектромагнетизма – CoExAN для международного проекта «Collective Excitations in Advanced Nanostructures» (CoExAN) в рамках программы Horizon 2020 (проект № ID 644076 Call H2020-MSCA-RISE-2014) с участием ученых Италии, Великобритании, Финляндии, Исландии, Беларуси, Армении, Филиппин, Украины. Тестовая версия портала расположена по адресу: <http://lar.inpnet.net/el/coexan/index.html>.

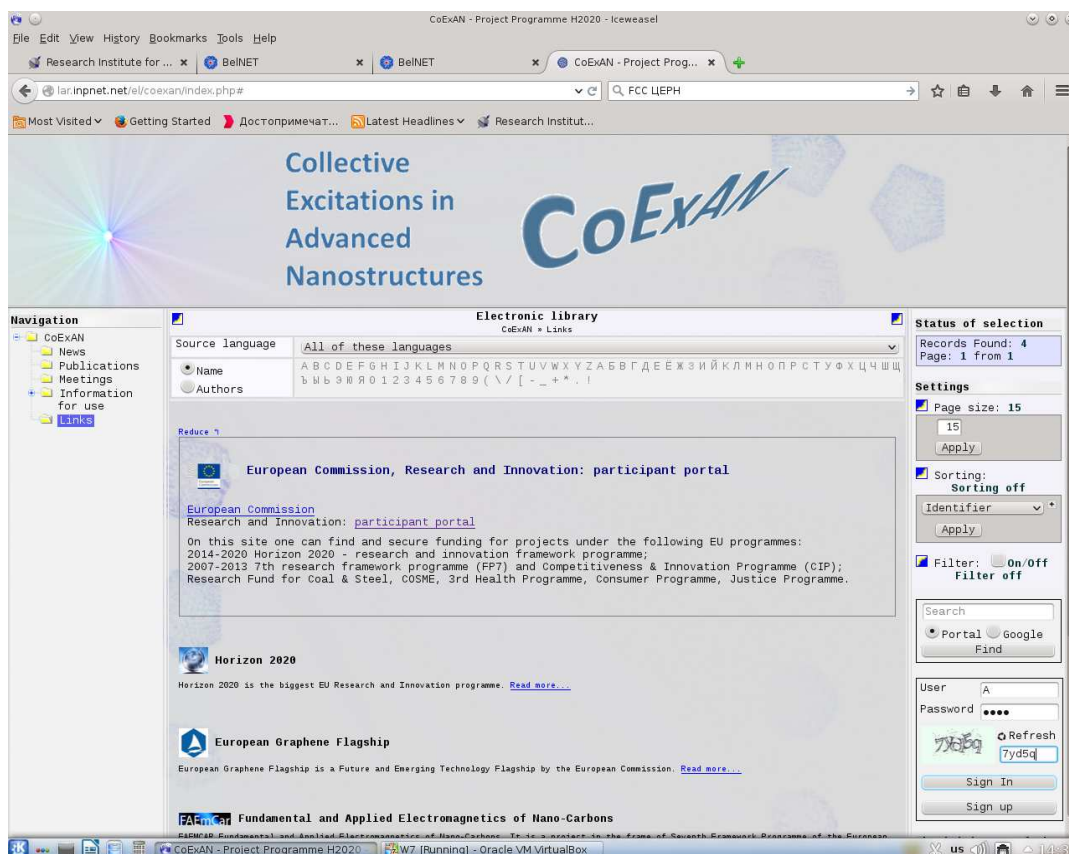


Рисунок 6.37 – Портал CoExAN.

7 КОНТЕНТ ЭЛЕКТРОННОГО ПОРТАЛА ЯДЕРНЫХ ЗНАНИЙ BelNET

Общее количество документов портала BelNET в настоящее время превышает 400.

1. В базу данных внесены 30 международных регулирующих документов (см. рисунок 7.1) в ядерной области, включая файлы данных, описание данных и картинки первых страниц документов.

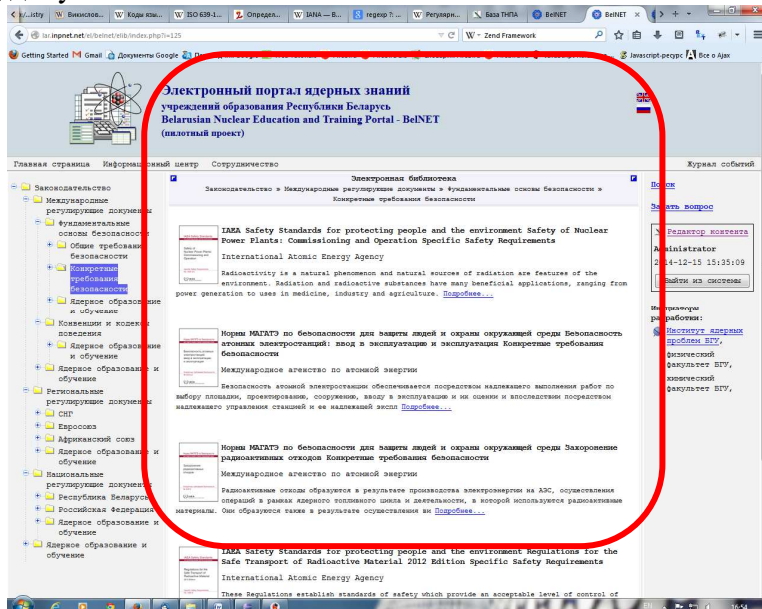


Рисунок 7.1 – Международное законодательство.

2. В базу данных внесены новости портала, представленные на первой пилотной страничке портала. Продемонстрирована правильность предположения, что новости представляют собой такой же блок информации, как и другие документы.

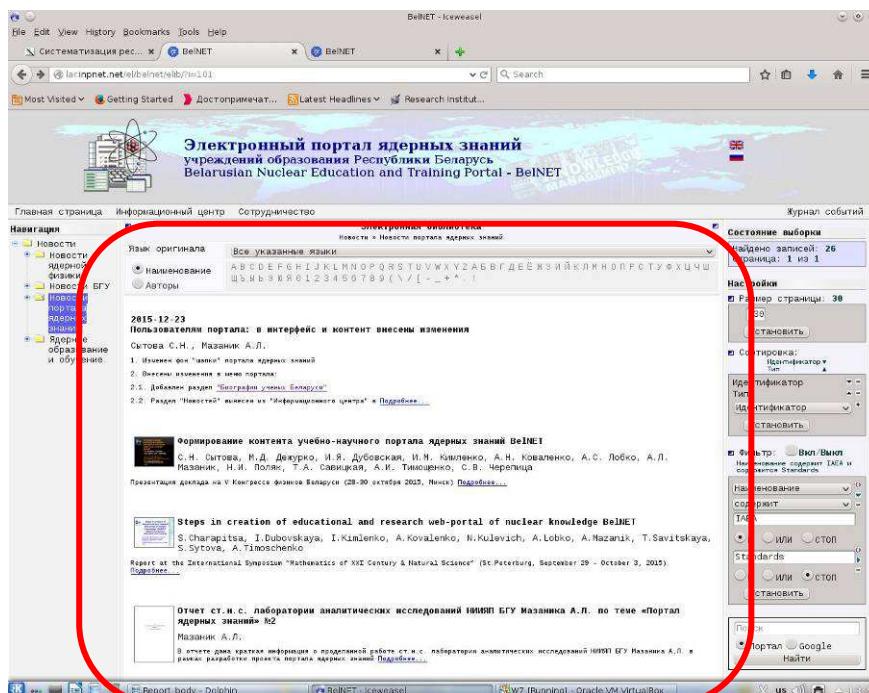


Рисунок 7.2 – Новости портала.

3. В разделы **Наука** и **Практика** внесены материалы трех международных научных конференций:

- 64 международная конференция "ЯДРО-2014" (Фундаментальные проблемы ядерной физики, атомной энергетики и ядерных технологий) 1–4 июля 2014 года;
- 4-я Международная конференция ИСМАРТ 2014 – (Инженерия сцинтилляционных материалов и радиационные технологии – Engineering of Scintillation Materials and Radiation Technologies) 12–16 октября 2014 года.
- Международное рабочее совещание «Современные ядерно-физические методы исследования в физике конденсированных сред» (ЯМКС-2015), 15–16 сентября 2015 г.

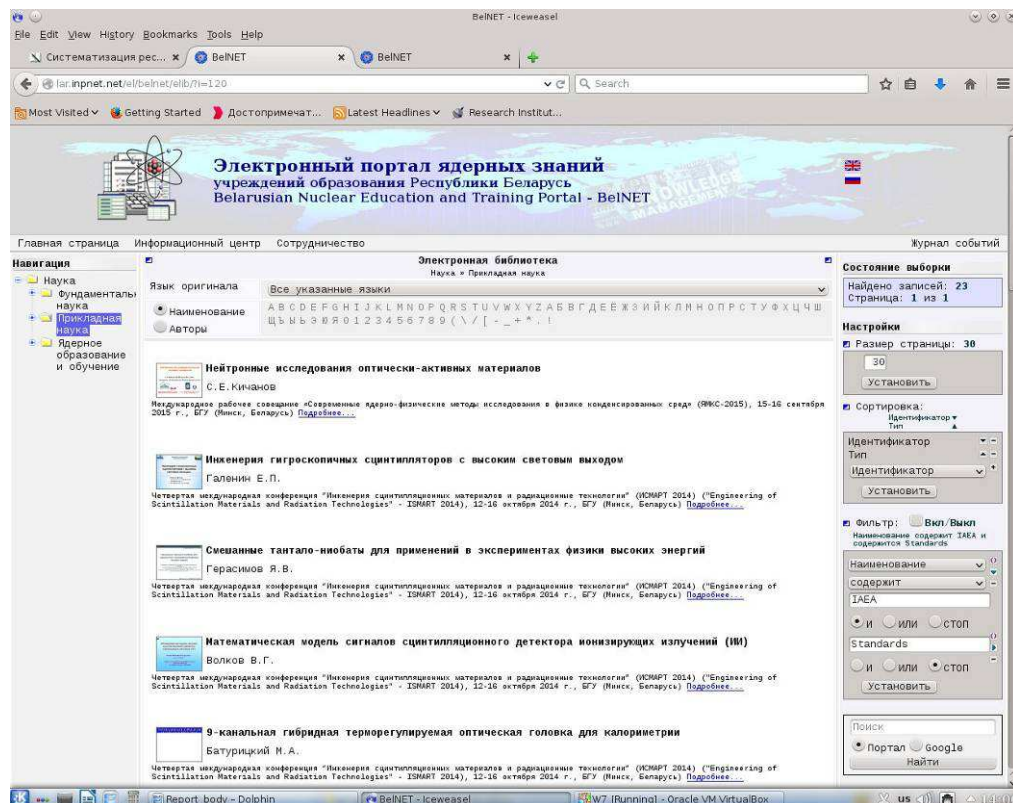


Рисунок 7.3 – Раздел **Наука** -> **Прикладная наука**.

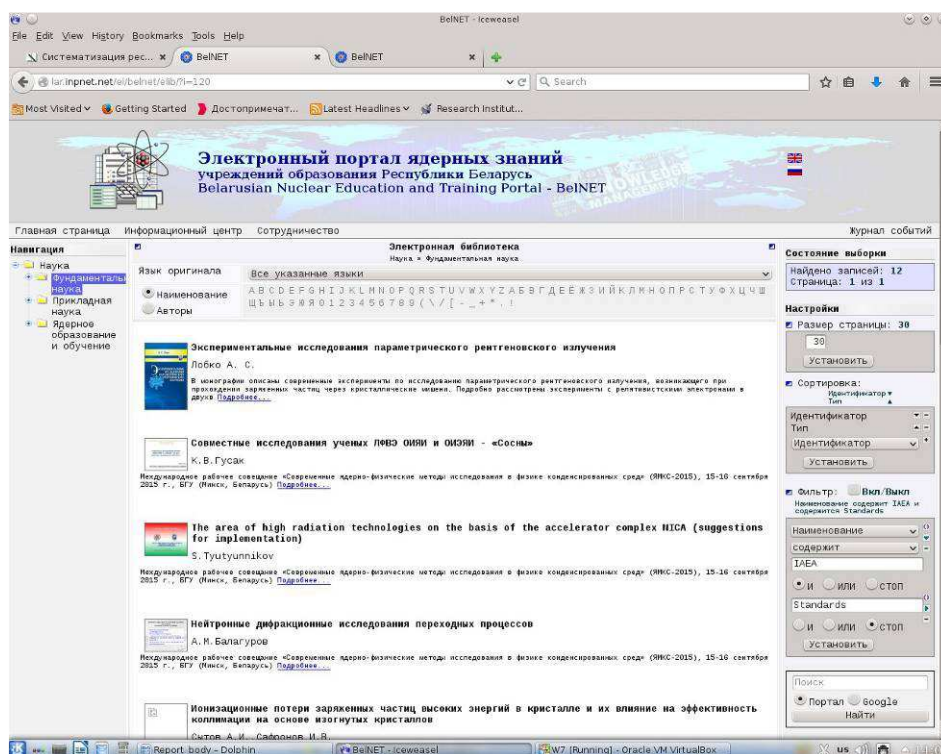


Рисунок 7.4 – Раздел *Наука -> Фундаментальная наука.*

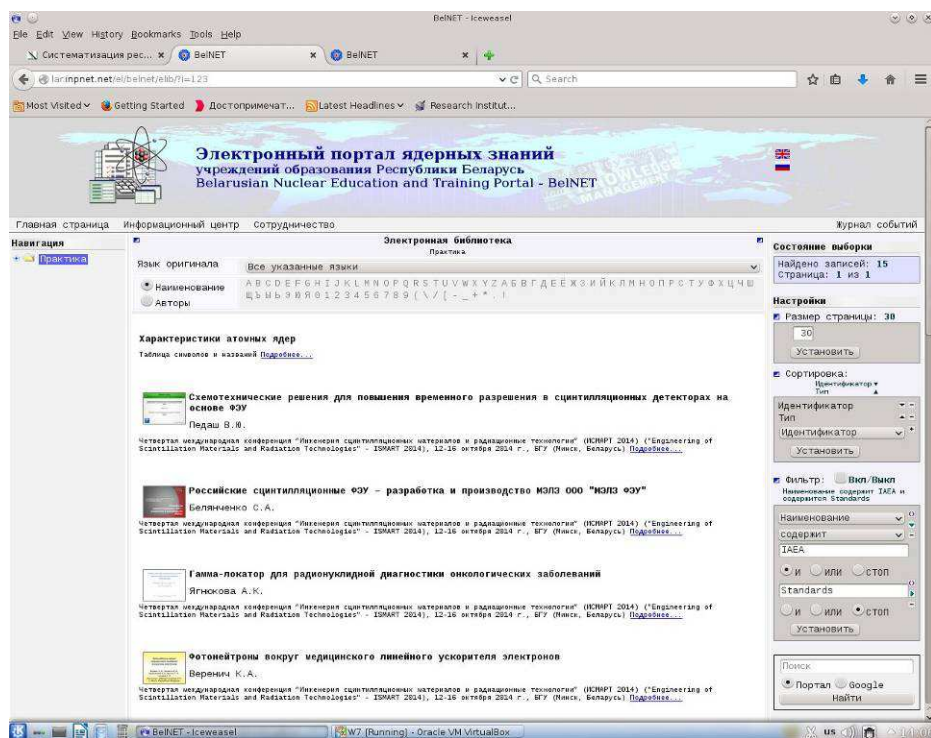


Рисунок 7.5 – Раздел *Практика.*

4. Создан раздел **Биографии ученых**, содержащий в настоящий момент биографии академиков, профессоров, докторов наук кафедры ядерной физики Белорусского государственного университета.

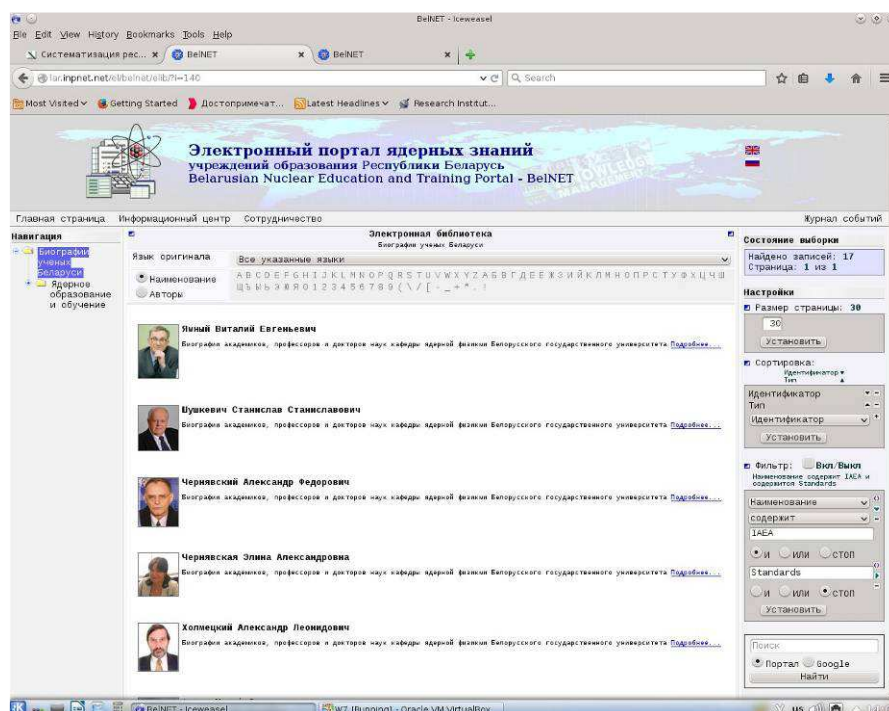


Рисунок 7.6 – Раздел *Биографии ученых*.

5. Разделы *Контакты* и *Группа разработчиков* содержат информацию о членах команды-разработчиков портала BelNET – сотрудниках НИИ ЯП БГУ, физического и химического факультетов БГУ.

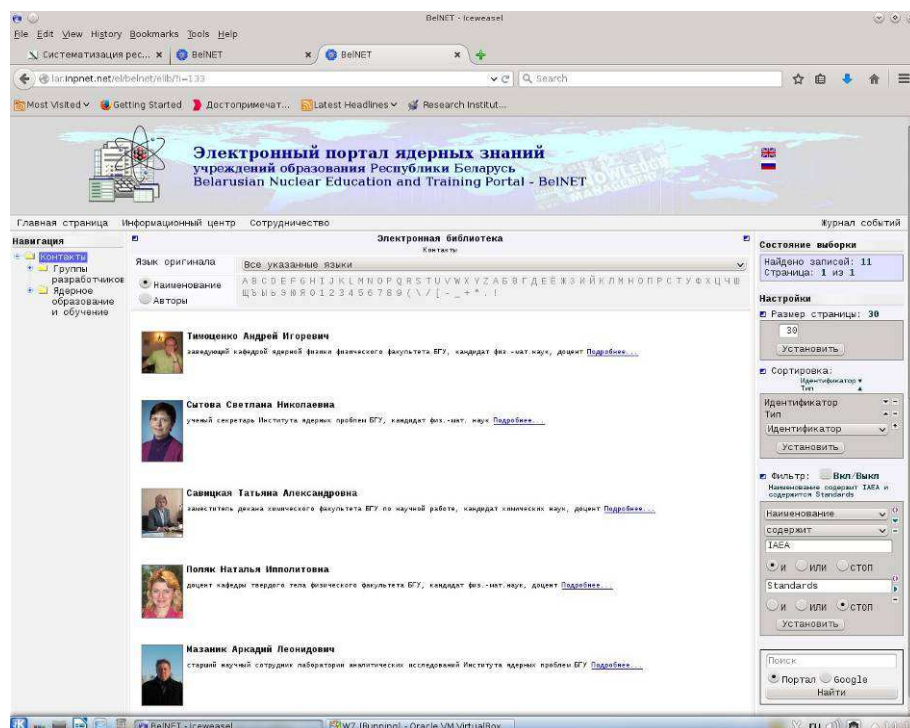


Рисунок 7.7 – Раздел *Группа разработчиков*.

6. Разделы *Полезные ссылки*, *Форумы*, *Ресурсы* содержат информацию и ссылки на международные интернет-ресурсы в области ядерных знаний.

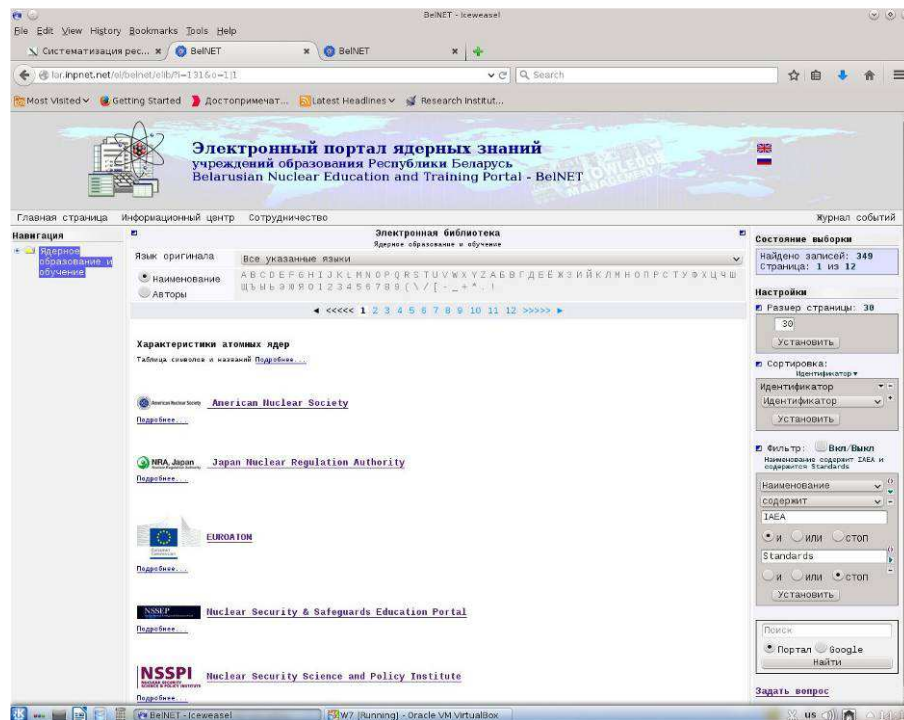


Рисунок 7.8 – Раздел *Ресурсы*.

7. Раздел *О проекте* содержит основополагающую информацию для старта проекта.

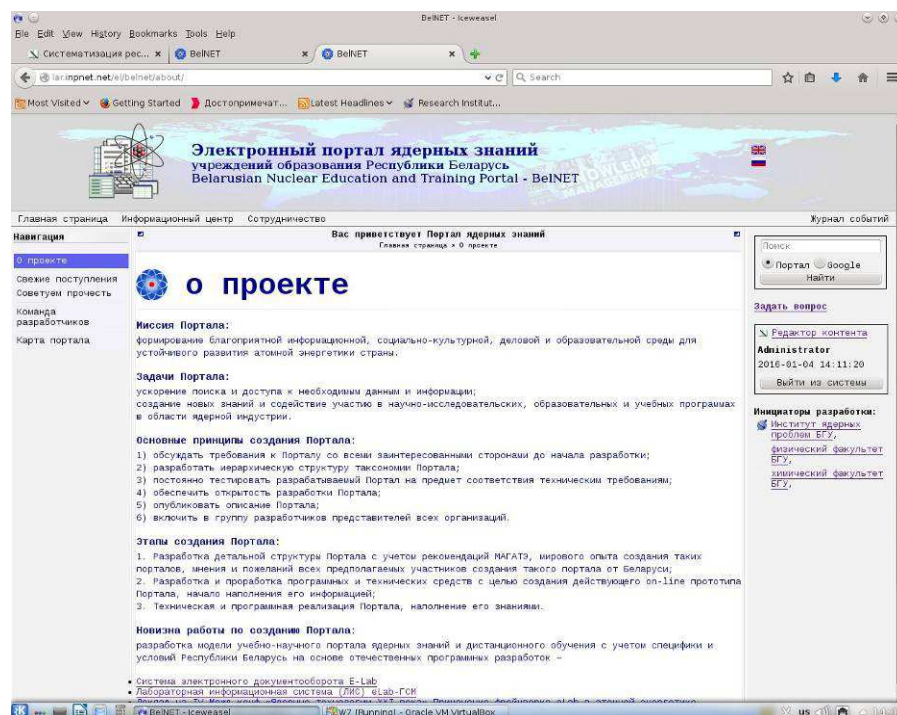


Рисунок 7.9 – Раздел *О проекте*.

8. В раздел *Свежие поступления* попадают ссылки на последние загруженные в портал ресурсы.

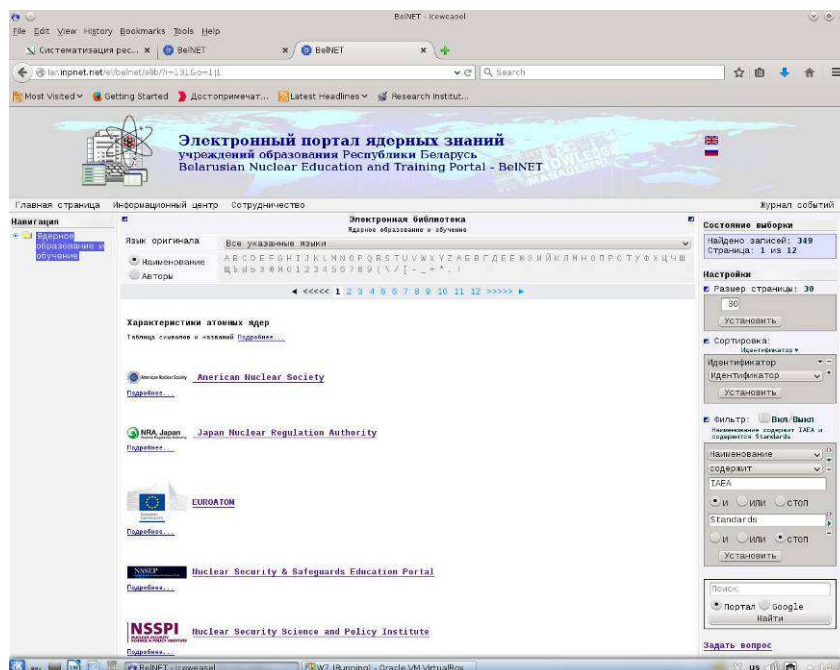


Рисунок 7.10 – Раздел *Свежие поступления*.

9. Раздел *Карта портала* содержит полную информацию о «дереве» портала.

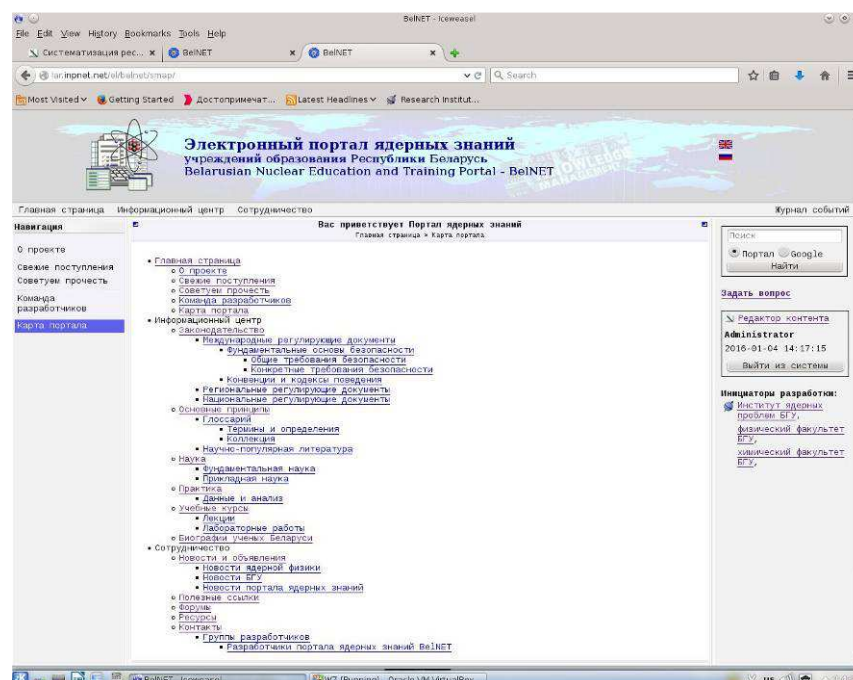


Рисунок 7.11 – Раздел *Карта портала*.

10. Описание разделов *Основные принципы* и *Учебные курсы* дается в Главах 8 и 9.

8 КОНТЕНТ ЭЛЕКТРОННОГО ПОРТАЛА ЯДЕРНЫХ ЗНАНИЙ В ПРЕДМЕТНЫХ ОБЛАСТЯХ: РАДИОХИМИЯ, ВОДНО-ХИМИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ И ВОДОПОДГОТОВКА ДЛЯ АЭС, МЕНЕДЖМЕНТ ЯДЕРНЫХ ЗНАНИЙ

Концепция менеджмента ядерных знаний стала для МАГАТЭ приоритетным направлением в XXI столетии и предполагает создание знания, его идентификацию, передачу, защиту, оценку, хранение и распространение [27].

В результате работы над порталом BelNET создан контент в области менеджмента ядерных знаний, который включает тезаурус, лекции на английском языке, учебные модули «Менеджмент ядерных знаний» и «Ядерная энергетика как фактор стабильного энергетического развития», созданные в технологии подкастинга и включающие лекции в виде аудио- и видеофайлов и тестовые задания к ним.

Организован и проведен 11-ый Семинар по европейскому сотрудничеству в области высшего образования и исследований по ядерной технологии и радиологической защите CHERNE-2015 (1–5 июня 2015 г.). CHERNE (Cooperation in Higher Education for Radiological and Nuclear Engineering) – открытая академическая сеть, деятельность которой направлена на развитие и укрепление сотрудничества университетов и научных центров Европы в области ядерных наук и технологий. В настоящее время в сеть входит 19 университетов и научных центров, включая БГУ [28]. 11-й семинар в Минске был ориентирован на новые потребности и возможности для сети CHERNE с точки зрения менеджмента ядерных знаний. Лекция на английском языке «Nuclear Knowledge Management» и тезаурус представлены в Приложении 1.

Учебное содержание модуля «Менеджмент ядерных знаний» включает информацию о менеджменте ядерных знаний как интегрированном, систематическом подходе к процессу идентификации, получения, преобразования, развития, распространения, использования, передачи и сохранения знаний, значимых для достижения заданных целей. Показаны и разъяснены основные функции менеджмента ядерных знаний, к которым следует отнести управление знаниями и формирование инновационной корпоративной культуры, способствующей обучению сотрудников и производству инноваций. Дана интерпретация понятий данные, информация, знания, компетенции. Показано деление знаний на явные и неявные и проанализированы способы передачи каждого вида знаний. Рассмотрена модель взаимопревращения скрытых и явных знаний, которая получила название «петля или спираль познания». Охарактеризованы причины возрастания роли ядерных знаний в современных условиях и отмечено, что особенностью ядерных знаний является их большой объем, накопленный цивилизацией в области физики, атомной инженерии, металлургии, химии, информационных технологий, а также то, что для их создания и передачи требуются высококвалифицированные преподаватели, современные методические пособия, государственные инвестиции и специальное оборудование, в частности, необходимы исследовательские реакторы, число которых во всем мире, к сожалению, сокращается, а не растет [29].

Использованная технология позволяет при желании сосредоточиться на слайдах, убрав видео и оставив только слайды с комментариями лектора (см. рисунок 8.1).

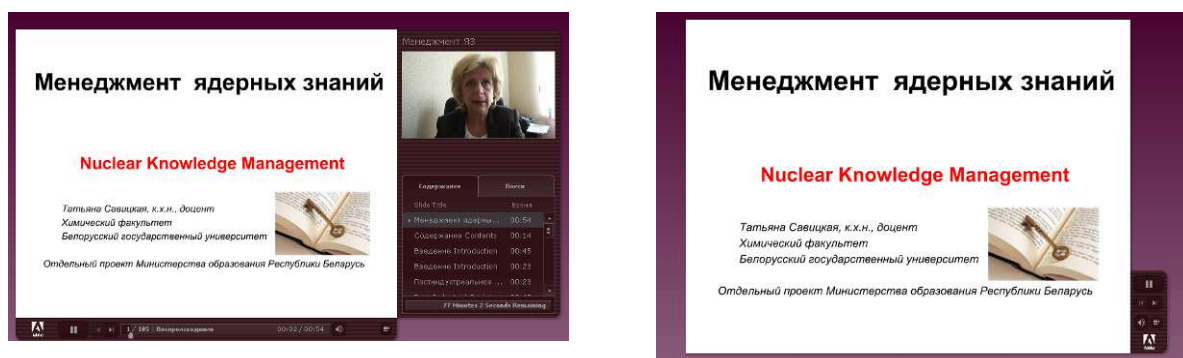


Рисунок 8.1 – Пример учебного модуля.

Следует отметить, что в модуле есть навигация и поиск по словам. В конце каждой лекции присутствует модуль тестирования, что позволяет студентам самостоятельно проверять свои знания и анализировать ошибки (рисунок 8.2). Предложены тестовые задания с множественным выбором.

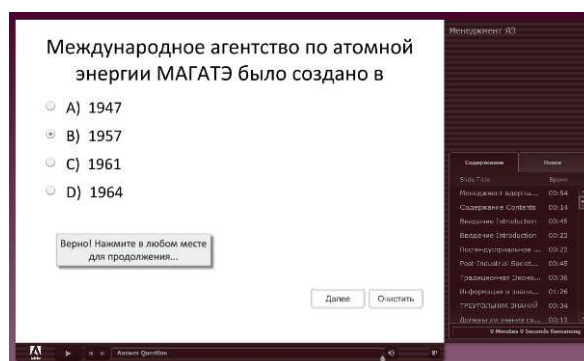


Рисунок 8.2 – Пример теста.

Учебное содержание модуля «Ядерная энергетика как фактор стабильного энергетического развития» включает аналитический обзор современного состояния энергетики в мире, перспективы развития возобновляемых источников энергии и ядерной энергетики, историю развития ядерной энергетики, краткую информацию о Международных Проектах INPRO (МАГАТЭ) и GIF-4, разработанных для решения проблем развития ядерной энергетики, основные противоречия современного этапа развития ядерной энергетики, вопросы ядерной культуры и безопасности. Особое внимание уделено деятельности МАГАТЭ и его роли в осуществлении ядерной безопасности. Показано, что проблемы ядерной энергетики носят системный характер, от их решения зависит не только прогресс человечества, но и сохранение цивилизации. Эти проблемы взаимосвязаны и охватывают многие стороны жизни людей и касаются всех стран мира. Обострение тех или иных аспектов носит динамический характер, в зависимости от социополитического окружения, которое возникает, как объективный фактор развития. В настоящее время стало очевидным, что для своего решения проблемы ядерной энергетики требуют объединения усилий всего человечества. В этой связи в модуле уделяется внимание анализу развития ядерной энергетики в свете глобальных проблем человечества: угрозы терроризма и необратимого загрязнения окружающей среды, необходимости преодоления разрыва в развитии между странами. При этом подчеркивается та значительная роль,

которую играет ядерная наука и техника в жизни человечества, несмотря на то, что многие вопросы, связанные с ядерной энергетикой, до сих пор являются предметом острых дискуссий.

Лекции модулей доступны по ссылке: <http://www.chemistry.bsu.by/index.php/innov-technology/27-innovatsionnye-tehnologii/135-opyt-sozdaniya-lektsij-v-podkastinge> и предназначены для самостоятельного прослушивания при подготовке к семинарам и экзамену.

Химический факультет принимал участие в совместном ИНПРО/МАГАТЭ - НИЯУ МИФИ дистанционном лекционном курсе «Современные методы оценки эффективности и устойчивости систем ядерной энергетики и ядерного топливного цикла» (The IAEA/INPRO section - NRNU MEPHI joint distant learning lecture course “State-of-the-art methods and tools for sustainability assessment of nuclear energy systems”). Слушателями дистанционного курса помимо БГУ являлись Научно-технический центр безопасности ядерных технологий (Казахстан), Республиканское унитарное предприятие «Белорусская атомная электростанция» (Беларусь), Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ (Россия). Материалы курса подготовлены для размещения на портале ядерных знаний. В материалах рассмотрена роль инновационных ядерных технологий в обеспечении устойчивого энергетического развития, представлена информация о Международном проекте МАГАТЭ по инновационным ядерным реакторам и топливным циклам (ИНПРО), сделан обзор инструментальных средств МАГАТЭ моделирования ЯТЦ (MESSAGE, DESAE, NFCSS), рассмотрены требования и критерии оценки ядерно-энергетических систем и ЯТЦ, представлены интерактивные справочно-информационные ресурсы по атомной энергетике и ЯТЦ.

8.1 Контент портала в области радиохимии

Радиохимия относится к той области химической науки, знание которой совершенно необходимо для подготовки специалистов, способных решать вопросы, связанные с обеспечением безопасной работы АЭС и других предприятий ядерного топливного цикла, включая переработку отработанного ядерного топлива и обезвреживания радиоактивных отходов [29–31].

Радиохимия изучает химические свойства и физико-химические закономерности поведения радиоактивных элементов и отдельных радионуклидов, методы их выделения и концентрирования. Включает также промышленную отрасль, связанную с получением высокорadioактивных материалов и регенерацией ядерного горючего, разработку методов применения радионуклидов, а также специальной техники и оборудования для защиты от вредного воздействия ионизирующего излучения. Современную радиохимию можно условно разделить на три раздела: химию радиоактивных элементов, общую и прикладную радиохимию.

Создан контент в области радиохимии, который включает Power Point презентации лекций, комплекс лабораторных работ, лекции на английском языке, учебный модуль «Основы химии ядерного топливного цикла», созданный в технологии подкастинга и включающий лекции в виде аудио- и видеофайлов и тестовые задания к ним. В качестве примера в Приложениях 2–5 представлены:

1. Презентация лекции «Введение в дисциплину»;
2. Презентация лекции «Состояние радионуклидов в различных фазах и методы его изучения»;
3. Презентация лекции «Процессы экстракции в радиохимии»;
4. Лабораторная работа «Проверка стабильности работы радиометрической аппаратуры и выбор оптимального времени счета при радиометрических измерениях»;

5. Лабораторная работа «Определение геометрического счета активности»;
6. Лабораторная работа «Определение водопоглощающей способности материалов-носителей образцовых радионуклидных источников специального назначения»;
7. Лабораторная работа «Исследование естественной радиоактивности атмосферного воздуха»;
8. Lecture “Nuclear and Radiochemistry”;
9. Lecture “Detectors”;
10. Lecture “Actinide and Transactinide Chemistry”.

Учебное содержание модуля «Основы химии ядерного топливного цикла» включает информацию о типах ядерных топливных циклов, их достоинствах и недостатках, промышленной инфраструктуре ЯТЦ в разных странах. Показано, что выбор оптимального варианта ЯТЦ – серьезная проблема для страны и мира в целом. В настоящее время лишь 5 государств имеют предприятия по переработке ОЯТ на своей территории (Франция, Россия, Великобритания, Япония, Индия). В модуле особое внимание уделено наиболее распространенному урановому циклу. Показано мировое распределение запасов природного урана, рассмотрены способы добычи и переработки урановой руды, а также обогащения урана, обсуждается производство ядерного топлива, типы существующих ядерных реакторов, включая реакторы с водой под давлением, реакторы с кипящей водой, быстрые реакторы, реакторы на тяжелой воде, газоохлаждаемые реакторы. Рассмотрены ядерная реакция деления, условия для ее осуществления, коэффициент размножения нейтронов и основные продукты, образующихся в ходе деления. Показано, что среди продуктов деления представлены элементы всех групп периодической системы Менделеева. Рассмотрен завершающий этап ядерного топливного цикла или “back end”, включающий временное хранение отработанного ядерного топлива, его радиохимическую переработку, а также подготовку к окончательному захоронению радиоактивных отходов. Обсуждаются характеристики ОЯТ, которые необходимо учитывать при переработке. Уделено внимание основам радиохимической переработки ОЯТ (рассмотрены висмут-фосфатный метод, пурекс- и редокс-процессы). Отмечено, что полномасштабное развитие ядерной энергетики, способное решить проблему энергетического стабильного развития, возможно только в рамках замкнутого топливного цикла с использованием быстрых реакторов-размножителей. Лекции модуля доступны по ссылке: <http://www.chemistry.bsu.by/index.php/innov-technology/27-innovatsionnye-tekhnologii/135-opyt-sozdaniya-lektsij-v-podkastinge> и предназначены для самостоятельного прослушивания при подготовке к семинарам и экзамену.

8.2 Контент портала в области водно-химических режимов и водоподготовки для АЭС

На атомных электростанциях типа ВВЭР предъявляются особые требования к водно-химическому режиму (ВХР). ВХР представляет собой параметры, определяющие состояние теплоносителя (в данном случае воды) рабочих сред, а также коррозию поверхностей и образование отложений на оборудовании. Основными контролируемыми параметрами ВХР являются катионы (Li^+ , Na^+ , K^+), анионы (Cl^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , NO_3^-), жёсткость, электрическая проводимость, цветность, рН, сухой остаток, щелочность, железо, ХПК и прочее. На данный момент контроль ВХР по различным параметрам осуществляется комплексно с привлечением как классических методов аналитической химии, так и при помощи современных физико-химических методов (одним из которых является ионная хроматография) [31, 32].

Создан контент в области водно-химических режимов и водоподготовки для АЭС, который включает Power Point презентации лекций и комплекс лабораторных работ. В качестве примера в приложении 6 представлены:

1. Вводная лекция «Водно-химические режимы ВВЭР»;
2. Лабораторная работа «Моделирование типовых ситуаций водно-химического режима первого контура АЭС с ВВЭР и их контроль с использованием ионной хроматографии»;
3. Презентации двух лекций лекционного курса «Вода в атомной энергетике».

Следует отметить, что данный лекционный курс включает характеристику роли воды и её функций с акцентом на значение водоподготовки и водно-химических режимов АЭС для обеспечения их безаварийной эксплуатации. Дана характеристика структуры, физических и химических свойств воды. Рассмотрено использование воды как теплоносителя в системе охлаждения первого и второго контуров, водоеме-охладителе. Особое внимание уделено химическому аспекту процессов, протекающих в воде и с участием воды. Дается трактовка водно-химического режима как совокупности мероприятий, регламентирующих соответствующее качество рабочих сред с целью обеспечения надежной и экономичной эксплуатации оборудования, контактирующего с ними. Обсуждаются водно-химические режимы АЭС с реакторами различных типов. Приведено систематическое изложение физико-химических основ внутриконтурных процессов, включающих коррозию конструкционных материалов; преобразование естественных примесей, привносимых в цикл извне; распределение примесей и продуктов коррозии между водой и образующимся из нее насыщенным паром; выпадение твердых соединений на поверхности оборудования; взаимодействие естественных примесей и продуктов коррозии с различными добавками, корректирующими водный режим и др.; специфических процессов радиолитического распада воды. Приведены основные загрязнители природных и сточных вод, методы их контроля. Охарактеризованы процессы очистки воды, включающие осветление фильтрованием, коагуляцией, флокуляцией, теоретические основы и аппаратное оформление мембранных методов (обратный осмос, нанофильтрация, ультрафильтрация, микрофильтрация), ионного обмена и др. Рассмотрены технологии очистки водных жидких радиоактивных отходов, в том числе на примере разработок белорусских ученых. Дана характеристика современных направлений исследования по использованию в реакторах АЭС воды со сверхкритическими параметрами.

9 КОНТЕНТ ЭЛЕКТРОННОГО ПОРТАЛА ЯДЕРНЫХ ЗНАНИЙ В ПРЕДМЕТНЫХ ОБЛАСТЯХ: ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА, МЕНЕДЖМЕНТ ЯДЕРНЫХ ЗНАНИЙ

9.1 Разработка глоссария

Основной задачей, решавшейся на первом этапе создания Глоссария, был сбор терминов и их определений в разделах ядерной физики и энергетики, физики ионизирующих излучений, ядерной и радиационной безопасности, а также ядерных материалов и радиационного материаловедения. Пример страниц Глоссария непосредственно в портале приведен в Приложении 7.

В ходе выполнения данных задач были выполнены следующие виды работ:

- проведён анализ терминов и их определений;
- составлен перечень относящихся к рассматриваемым разделам терминов на русском и английском языках с их определениями, формулируемыми в соответствии с действующими нормативными документами и результатами проведённого в анализа;
- результаты работы подготовлены для их размещения на портале ядерных знаний и частично размещены.

Перечень терминов, предлагаемых для введения в Глоссарий, имеет вид:

А

Абсорбция, Адгезия, Адсорбент, Адсорбция, Азотирование, Активность, Активация, Активационный анализ, Активная зона, Аллотропия, Аллотропические модификации (см. также Аллотропия) железа, плутония, урана, Алюминий, Альфа-распад, Альфа-частица, Альбе́до нейтронов, Альбе́до гамма-квантов, Амплитуда рассеяния, Амбиентная доза, Америций, Антивещество, Античастица, Антинейтрон, Антипротон, Атом, Атомная единица массы, Атомная электростанция (АЭС), Аустенит, остаточный А. Аффи́наж.

Б

Барионное число, Барионы, Бейнит, Бериллий, Бор, Бета-распад, Бета-частица, Бетатрон, Биологическая защита, Бозе-Энштейна статистика, Бозоны, Боросиликатное стекло, Брейра-Вигнера формула.

В

Вайцекера формула, Вакансия, Великое объединение, Вековое уравнение, Вещество, аморфное В., кристаллическое В., поверхностно-активное В., Взаимодействие частиц, Взаимодействие в системе: уран–алюминий, уран–никель, уран–плутоний–азот, уран–фиссиум–коррозионно-стойкая сталь, уран–цирконий, уран–тугоплавкие металлы, Видманштет, Виртуальные частицы, Возбужденные состояния ядер, Волновая функция, Волны де Бройля, Водо-водяной энергетический реактор (ВВЭР), Воспроизводство топлива, Включения неметаллические, Вода легкая, Вода тяжелая, Вращательные состояния ядра, Времени пролета метод, Встречные пучки, Вторичное ядерное топливо, Входной канал ядерной реакции, Выход реакции, Выходной канал ядерной реакции, Выгорание топлива, Выход ядерной реакции, Высокообогащенный уран, Вязкость ударная.

Г

Гамма-излучение, Гамма-распад, Гадолиний, Гаусса распределение, Гамма-активационный анализ, Гамма плотнометрия, Гамма-сплавы в атомной энергетике, Генератор нейтронов, Гексафторид урана, Гигантский дипольный резонанс, Гиперзаряд, Гиперядра, Глюоны, Гравитационное взаимодействие, График Ферми-Кюри, Графит, Г. ядерной чистоты, Графитизация, Гранулированное оксидное топливо.

Д

Дейтрон, Деление ядра, Дефект (избыток) массы, Дельбрукское рассеяние, Делящееся вещество, Делящиеся материалы, Дефект в кристалле, Дефект упаковки, Деформация, Дифракция частиц, Дифракционное рассеяние, Диаграмма состояния, Диоксид урана, Дислокация (винтовая Д., краевая Д), Дисперсность. Диффузия нейтронов, Длина волны частицы, Длина диффузии, Длина поглощения, Длина свободного пробега, Длина замедления, Длина поглощения, Доплера эффект, Доза облучения, Доза поглощенная, Доза экспозиционная, Доза эквивалентная, Доза заambientная, Доза эффективная

Е

Единица измерения

Ж

Жаропрочность, Жаростойкость, Желтый кек, Жесткость механическая.

З

Замедление нейтронов, Запаздывающие нейтроны, Запаздывающие гамма-кванты, Заряд ядра, Замедлитель, Законы сохранения, Зеркальные ядра. Закалка, Закись-окись урана, Зерно, Значимое количество ядерного материала.

И

Избыток (дефект) массы, Изобары, Изотоны, Изотопический спин (изоспин), Изоспиновый мультиплет, Изомерные состояния, Изомерия ядерная, Изотопов разделение, Износ, Износостойкость, Инерциальный УТС (управляемый термоядерный синтез), Изотопов производство, Иодная яма, Ионизация, Ионизационные потери энергии, Интенсивность облучения, Ионная имплантация, Исходный материал, Источник излучения

К

Карбиды, К. урана, Квантовая механика, Квантовые числа, Квант света, Квантовая хромодинамика (КХД), Квантовая электродинамика (КЭД), Кварк-глюонная плазма, Керамическое топливо, Кинематика ядерных реакций, Кинетика реактора, Комптоновская длина волны, Комптоновское рассеяние, Коллайдер, Космические лучи, Конверсия внутренняя, Конфайнмент, Корпускулярно волновой дуализм, Коагуляция, Компонент, Конверсия урана, Коррозия., избирательная К., К. под напряжением, межкристаллитная К, нитевидная К, ножевая К, питтинговая К, послойная К, пятнистая К, равномерная К, точечная К. (см. Питтинговая коррозия), щелевая К, химическая К, электрохимическая К, язвенная К, Коррозионное растрескивание, Коррозионная стойкость, Коэффициент линейного расширения, Коэффициент размножения, Колебательные состояния ядра, Критическая масса, Критический объем, Кривые Шмидта, Критерий Лоусона, Кулоновское возбуждение ядра, Кристалл.

Л

Лептоны, Лептонный заряд, Лоренца преобразование, Лоренца сила, Лоусона критерий.

М

Магические ядра, Масса ядра, Масса частицы, Магнитный дипольный момент ядра, Масс-спектрометр, Массовое число ядра, Мезон, Мезонная теория ядерных сил, Мезоатом, Мезомолекула, Мессбауэра эффект, Мессбауэровские ядра, Механизм ядерных реакций, Меченные атомы, Микротрон, Микроструктура, Микротвердость, Микрошлиф, Многократное рассеяние, Модели атомного ядра, Мощностной коэффициент реактивности, Мощность ядерного реактора (тепловая, электрическая), Модельное ядерное топливо, Монокристалл, МОХ-топливо (смешанное оксидное топливо) (Mixed OXides), Мюон, Мюонный катализ

Н

Напряжение механическое (касательное Н. (тангенциальное), контактное Н., нормальное Н., температурное Н.), Настуран, Нейтрон, Нейтрино, Нейтронная физика, Нейтронное поле, Нейтронная оптика, Нейтронография, Нейтронно-активационный анализ, Нейтронный

спектрометр, Нейтронная бомба, Неопределенностей соотношение, Нейтронный генератор, Низкообогащенный уран, Нимоник, Нихром, Нуклид, Нуклеосинтез, Нуклон.

О

Обменное взаимодействие, Обедненный уран, Обезуглероживание, Облучение, Обогащение урана, Обогащенное ядерное топливо, Оже электроны, Окалиностойкость. (см. Жаростойкость), Окисление, Оксиды (окислы), Оптическая модель ядерных реакций, Орбитальный момент, Ортоводород, Оружейные делящиеся материалы, Отбора правила, Осколки деления, Основное состояние ядра, Осцилляторные состояния ядра, Отравления ядерного реактора, Отражатель, Отпуск, Отжиг. Отжиг (неполный О., полный О., рекристаллизационный О.), Отработавшее ядерное топливо.

П

Пар образование, Партон, Параметрическое излучение, Паровой коэффициент реактивности, Парциальное сечение, Параводород, Параллельные распады, Пара Френкеля, Параметр кристаллической решетки, Период полураспада, Переходное излучение, Период реактора, Первично выбитый атом (ПВА), Перегрев, Пережог, Переохлаждение, Перестройка выделений, Переход фазовый (фазовый П. первого рода, фазовый П. второго рода), Период инкубационный, Перлит, П. зернистый, П. пластинчатый, Пи-мезон (π-мезон), Плавление, Пластичность, Плутоний, Позитрон, Поляризация, Потенциальная яма, Подкритический реактор, Потенциальный барьер, Подбарьерное тунелирование, Позитроний, Последовательные распады, Пороговая энергия реакции, Поглотитель нейтронов, Поглощающий элемент, Ползучесть, Поликристалл, Полиморфизм. (см. также Аллотропия), Полное сечение рассеяния, Полоний, Порог хладноломкости, Пороговая энергия смещения, Порядок (ближний П., дальний П.), Потери энергии ионов, Предел (П. выносливости, П. пропорциональности, П. прочности, П. текучести, П. упругости, П. усталости. (см. П. выносливости), Природный уран, Принцип Паули, Промежуточные бозоны, Пространственная четность, Протон, Правило отбора, Производство топлива, Прокаливаемость, Прочность (длительная П, конструктивная П.), Прямые ядерные реакции, Пуассона распределение.

Р

Распад радиоактивный, Радиоактивность, Радиус ядра, Радиация, Радиоактивные семейства, Радиационные потери энергии, Равновесие, фазовое Р., Радиационная коррозия, Радиационная повреждаемость, Радиационная ползучесть, Радиационная стабильность, Радиационная стойкость, Радиационно-защитный оптический материал, Радиационно-индуцированная сегрегация, Радиационно-оптическая устойчивость, Радиационно-отжиговое упрочнение, Радиационно-пучковые технологии, Радиационно-стимулированное укрупнение выделений, Радиационно-стимулированные процессы, Радиационно-стойкие стекла, Радиационно-термомеханическое упрочнение, Радиационно-усиленная (стимулированная) диффузия, Радиационное дефектообразование, Радиационное материаловедение, Радиационное охрупчивание, Радиационное распухание (разбухание), Радиационное упрочнение, Радиационное формоизменение, Радиационные дефекты, Радиационный отжиг, Радиационный ресурс материалов, Радиационный рост, Радиационная длина, Разделение изотопов, Размножения коэффициент, Радий, Радиоактивные вещества, Радиоактивные отходы, Радон, Разупрочнение, Распад твердого раствора, Растворы твердые (твердые Р. с неограниченной растворимостью, твердые Р. с ограниченной растворимостью), Расширение тепловое, Расщепляющиеся материалы, Реактивность ядерного реактора, Резерфорда опыт, Резонансы (резонансные частицы), Резонансные реакции, Резонансный интеграл, Резонансное излучение, Реактивность ядерного реактора, РБМК, Реликтовое излучения, Резонанс ядерно-магнитный (ЯМР), Резонанс ядерно-квадрупольный (ЯКР), Реактопласты, Реакторные материалы, Резины, Рекристаллизация, Релаксация напряжений, Решетка кристаллическая, Релеевское рассеяние

С

Самодиффузия, Светимость ускорителя, Свариваемость, Сверхпроводимость, Сверхструктура, Свободного пробега длина, Сдвиг, Сечение эффективное, Сетка цементитная, Сечение взаимодействия (деления, поглощения и т. д.), Сечение дефектообразования (образования смещений), Сильное взаимодействие, Синтеза реакция, Синхротрон, Синхротронное излучение, Синхрофазотрон, Синхроциклотрон, Синхронизм фазовый, Система управления и защиты реактора (СУЗ), Скин-эффект, Скорость реакции, Скорость дефектообразования, Слабое взаимодействие, Смешанное оксидное топливо, Смещения на атом (с.н.а.), Составное ядро, Совместимость, Совместимость топлива с материалом оболочки, Соединение, химическое С. в сплавах (интерметаллическое С), Сорбит, Сорбция, Сормайт, Сопротивление, временное С. растяжению. (см. Предел прочности), Составляющие структуры, Спин, Спин-орбитальное взаимодействие, Спиральность, Спонтанное деление ядра, Специальный ядерный материал, Сплав (металлокерамический твердый С., минералокерамический твердый С.), Стабилизация аустенита, Старение, Сталь (дозвлектоидная С., заэвлектоидная С., кипящая С., легированная С., углеродистая С., эвлектоидная С.), Стекло металлическое, Структура, Структурно-фазовые превращения, Стандартная модель, Статистика, Странность, Странные частицы, Стеллатор, Суперсимметрия, Сульфидирование.

Т

Твердение дисперсионное, Твердость, Текстура, кристаллическая Т., Текучесть, Тело (аморфное Т., анизотропное Т., кристаллическое Т., твердое Т.), Температура (Т. Кристаллизации, Т. Критическая, Т. Облучения, Т. Отжига, Т. Отпуска, Т. температура хрупко-вязкого перехода, Т. Плавления), Температуропроводность, Теплоемкость, удельная Т, Теплоноситель, Теплопроводность, Теплостойкость. (см. Красностойкость), Термообработка, Термостойкость, Термоядерная реакция, Термоядерный реактор, Темная материя, Темная энергия, Тепловыделяющий элемент (ТВЭЛ), Тепловыделяющая сборка (ТВС), Температурный коэффициент реактивности, Титанирование, Топливо ядерного реактора, Токомак, Тормозное излучение, Торий, Травлени, Трансурановые элементы, Трансмутация элементов, Тунельный эффект

У

Удельные потери энергии, Управляемый термоядерный синтез (УТС), Упрочнение, Упругость, Уравнение вековое, Уравнение переноса, Уран, У. металлический, У. нормированный, Уранинит, Урановая руда, Урановое оксидное топливо, Урановый концентрат, Усталость, Условие критичности, Ускорители.

Ф

Фазатрон, Фаза, Фазовая нестабильность, Фермионы, Фейнмана диаграммы, Феррит, Физическая защита АЭС, Флюенс, Формфактор, Формула Вайцекера, Формула Мотта, Формула Резерфорда, Формула Брейта-Вигнера, Фотон, Фотоэффект, Фотоядерные реакции, Фосфотирование, Фундаментальное взаимодействие, Фундаментальная длина, Функция Ферми, Функциональные ядерные материалы.

Х

Характеристическое излучение, Хиггса бозон, Хладноломкость, Хрупкость, отпускная Х.

Ц

Цвет, Цепные ядерные реакции, Ценность нейтронов, Цементит, Ц. первичный, Ц. вторичный, Ц. третичный, Цианирование, Цирконий Циклические ускорители, Цикл ядерный топливный (ЯТЦ), Циклотрон.

Ч

Чарм, Четность пространственная, Четность собственная, Черенковское излучение, Черные дыры, Чугун, белый Ч., высокопрочный Ч., ковкий Ч., модифицированный Ч., серый Ч.

Ш

Шлакование реактора, Шредингера уравнение.

Э

Эволюция структуры, Эволюция структурно-фазового состояния, Эвтектика, Экзотермические реакции, Электрический квадрупольный момент ядра, Электромагнитное взаимодействие, Электрослабое взаимодействие, Элементарные частицы, Электрон, Элементарная теория деления ядра, Энергия распада, Энергия реакции, Энергия связи ядра, Энергия активации, Энергия деления, Энергия спаривания, Эндотермические реакции, Эффект Оже, Эффект поглощающего стержня

Я

Ядерная физика, Ядерная энергия, Ядерные модели, Ядерная астрофизика, Ядерная реакция, Ядерная спектроскопия, Ядерный взрыв, Ядерный реактор, Ядерный формфактор, Ядро атомное, Ядерные силы, Ядерный топливный цикл (ЯТЦ), Ядерное топливо, Ядерный магнитный резонанс (ЯМР), Ядерный квадрупольный резонанс (ЯКР), Ядерный гигантский резонанс, Ядерная изомерия.

9.2 Аналитический обзор терминов

Сбор терминов и их определений для размещения их на Портале в области основных и нормируемых дозиметрических величин, а также ионизирующего излучения и его показал имеющуюся несогласованность в определении терминов, встречающихся в литературе и в Интернете, противоречивость между терминами, принятыми в документах МАГАТЭ и использующимися часто в учебной литературе. В связи с этим, Тимощенко А.И. был составлен и размещен в Интернете аналитический обзор терминов по темам «Физика ионизирующего излучения» и «Дозиметрические единицы с учетом большого числа регламентирующих документов и стандартизирующих документов».

В учебно-методическом материале «Дозиметрические величины» представлена классификация дозиметрических величин, приведены их определения, принятые в литературе, в соответствии с публикациями Международной комиссии по радиологическим единицам (МКРЕ) [34] и уточнениями, введенными Международной комиссией по радиологической защите (МКРЗ) [35].

Рассматриваются стохастические и детерминированные дозиметрические величины, оговариваются условия, при которых формулируемые понятия применимы. Обсуждается современная классификация дозиметрических величин, кратко описывается их взаимосвязь между собой.

Далеко не везде в учебной и нормативно-технической литературе ясно формулируется разделение всех дозиметрических величин на микродозиметрические величины, основные дозиметрические величины и эквидозиметрические величины, которые, в свою очередь, подразделяются на фантомные, рабочие и нормируемые дозиметрические величины. Эквидозиметрия – раздел дозиметрии, в котором рассматривается учет стохастических биологических и медицинских эффектов в определении расчетных детерминированных дозиметрических величин применительно к человеку в области уровней облучения, при которых только эти эффекты имеют место. Фантомные и рабочие величины задаются в точке, тогда как нормируемые величины определяются для органа, или ткани, либо же на весь организм в целом

Множество всех современных дозиметрических понятий, относящихся к области эквидозиметрии, последовательно изложены, пожалуй, только в [36], а эта публикация недоступна широкому читателю. Поэтому краткое изложение системы дозиметрических понятий в принятой сегодня иерархии может быть полезным для пользователей Портала.

При введении операционных и фантомных дозиметрических величин используются понятия спрямленного и расширенного полей излучения. В разработанном учебно-методическом материале приводится только формулировка этих понятий и даются краткие разъяснения по области их применения. Ссылки на соответствующую литературу, в которой дается более полное их изложение, должны позволить читателю углубить свои знания по этому вопросу. Полный текст аналитических обзоров приводится в Приложениях 8, 9.

Связь дозиметрических величин с характеристиками поля излучения рассмотрена в отдельном материале (Приложение 10)

Размещение терминов и определений в Портале производилось на основе базового ключевого слова. Например, Термин «Ионизирующее излучение» определен под заголовком «Излучение ионизирующее». В то же время для облегчения поиска терминов приводятся и другие сочетания слов с отсылкой на основное сочетание, принятое в Глоссарии. Например, термин «вторичное ионизирующее излучение» расшифровывается в термине «Излучение ионизирующее вторичное», но ссылка на это определение дана и в разделе терминов под буквой «В»: «Вторичное ионизирующее излучение» см. «Ионизирующее излучение вторичное.»

Предполагается возможность расширения списка терминов с включением терминов по другим темам [37].

9.3 Цикл лабораторных работ

Концепция портала предполагает создание системы дистанционного обучения в области ядерных знаний, поэтому большое внимание было уделено разработке комплекса учебных лабораторных работ, позволяющий познакомить школьников и любого, интересующегося пользователя интернета, с особенностями проведения экспериментов и обработки результатов в области ядерной физики.

В школьной программе ядерная физика традиционно представлена лишь небольшим разделом, в котором не предусматривается выполнение лабораторных работ. Это объясняется тем, что лабораторные работы по ядерной физике требуют применения источников ионизирующих излучений, что для школьников запрещено санитарными нормами. Однако практические навыки, которые можно получить только при выполнении лабораторных работ, позволяют более полно понять особенности прохождения ионизирующего излучения через вещество, а также опасность и принципы защиты, связанные с использованием радиоактивных веществ. В современном мире это очень важно, так как масштабы использования ионизирующих излучений и радионуклидных источников в медицине, технике и других областях растут чрезвычайно быстро. Требования к знаниям основ взаимодействия излучения с веществом и его воздействия на окружающую среду предъявляет и процесс развития атомной энергетики в Республике Беларусь. Насколько необходим хотя бы минимальный уровень знаний в данной области для широких слоев населения, показал опыт и последствия Чернобыльской катастрофы.

В рамках развития контента Портала ядерных знаний BelNET были разработан цикл лабораторных работ по изучению прохождения ионизирующего излучения через вещество, которые можно выполнить, используя общедоступные интернет-ресурсы и которые могут быть выполнены школьниками, студентами младших курсов, а также любым интересующимся интернет-пользователем [37–40]. Общей частью цикла лабораторных работ являются «Краткие сведения из ядерной физики и ядерной спектроскопии», в которых приведены основные закономерности явления радиоактивности, объясняется работа детектора ионизирующего излучения, принципы формирования и интерпретации экспериментального энергетического спектра излучения. Приведены формулы для оценок статистических погрешностей эксперимента. Практический цикл включает в себя пять

лабораторных работ – «Определение активности радиоактивного источника относительным методом», «Поглощение электронов в веществе», «Изучение проникающей способности гамма-квантов различных энергий», «Изучение проникающей способности гамма-квантов в различных веществах» и «Естественные радиоактивные ряды». Каждая лабораторная работа содержит краткое описание изучаемых процессов, что необходимо для понимания выполнения измерительной части работы, а также для анализа полученных в работе результатов. Как отдельный раздел каждой работы описаны условия и проведение экспериментальных измерений. К каждой работе прилагается файл с видео-ресурсом, который позволяет наблюдать на экране компьютера панель спектрометра, как устанавливаются рабочие режимы на спектрометре, время регистрации и сам процесс набора спектра и его запоминания в файл. Объем видео-файла порядка 2,5–2,8 Мб. Использование видео-материала позволяет приблизить интернет-пользователя непосредственно к проведению физического эксперимента по регистрации ионизирующего излучения. Полный набор спектров, необходимых для выполнения работ вложен в папку в виде текстовых файлов.

В отдельном разделе даны методические указания по порядку обработки экспериментальных данных, расчету и анализу конечных величин. Так как экспериментальные спектры приведены в виде текстовых файлов, обработку результатов можно делать с использованием широкого круга стандартных программ, позволяющих вводить текстовые данные, делать простейшие расчеты и рисовать графики. Непосредственно разработанная методика выполнения работ ориентирована на использование стандартной программы MS Excel. Это позволяет выполнять лабораторные работы, имея только компьютер со стандартным набором программ. С помощью электронных таблиц (напр. MS Excel) осуществляется обработка экспериментальных спектров, расчет необходимых величин, представление результатов в графическом виде. К каждой работе разработана тестовая программа, позволяющая оценить правильность полученных результатов, а также уровень понимания пользователем изучаемых процессов и его готовности применить полученные результаты, например, для оценки параметров необходимой защиты от ионизирующего излучения.

Полностью лабораторные работы приведены в Приложении 11.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана концепция, структура и таксономия электронного портала ядерных знаний; проведен анализ требований и условий функционирования портала; разработана техническая спецификация на портал, сформулированы требования к безопасности портала, разработана информационная модель и архитектура портала; разработаны алгоритмы и методы программной реализации. На основе свободного программного обеспечения реализованы и отлажены алгоритмы и методы программной реализации портала ядерных знаний, в результате чего создана оригинальная система управления контентом для создания учебно-научных порталов различных профилей, в которой реализованы все необходимые функции такого портала, включая возможность удаленной правки структуры портала и занесения документов, разнообразной сортировки и фильтрации, два уровня доступа к документам в зависимости от прав пользователей, интерактивную систему дистанционного обучения, а также возможность ввода текста, формул в LaTeX-подобной форме, загрузки ссылок, различных типов файлов, фотографий, картинок и видео. Портал находится в интернете по адресу расположенный в интернете по адресу: <http://lar.inpnet.net/el/belnet/>.

Усовершенствована система электронного документооборота аккредитованной испытательной лаборатории eLab в соответствии с системой менеджмента качества предприятия международного стандарта ИСО/МЭК 17025-2007 «Общие требования к компетенции испытательных и калибровочных лабораторий». С целью ознакомления потенциальных потребителей данной разработки на сайте НИИ ЯП БГУ размещен информационный материал <http://inp.bsu.by/labs/lar/elab.html>, а работающая версия системы eLab находится по адресу: <http://lar.inpnet.net/el/>.

Разработаны оригинальные материалы, вошедшие в контент портала, и начато наполнение портала документами и материалами. Контент в области ядерных знаний включает глоссарий, монографии, учебники, материалы международных конференций, аналитический обзор терминов по темам «Физика ионизирующего излучения» и «Дозиметрические единицы с учетом большого числа регламентирующих документов и стандартизирующих документов, цикл лабораторных работ по изучению прохождения ионизирующего излучения через вещество, которые можно выполнить, используя общедоступные интернет-ресурсы и которые могут быть выполнены школьниками, студентами младших курсов, а также любым интересующимся интернет-пользователем. Контент в области менеджмента ядерных знаний включает тезаурус, лекции на английском языке, учебные модули «Менеджмент ядерных знаний» и «Ядерная энергетика как фактор стабильного энергетического развития», созданные в технологии подкастинга и включающие лекции в виде аудио- и видеофайлов и тестовые задания к ним, лабораторные работы.

Основным результатом исследований является следующее:

Создана оригинальная система управления контентом для создания учебно-научных порталов различных профилей на основе свободного программного обеспечения, на основе которой создан электронный портал ядерных знаний учреждений образования Республики Беларусь BelNET, расположенный в интернете по адресу: <http://lar.inpnet.net/el/belnet/>

Получено свидетельство Национального центра интеллектуальной собственности РБ о регистрации компьютерной программы №843 «Система управления учебно-научным порталом».

Результаты работы доложены на 8 международных научных конференциях и опубликованы в следующих научных публикациях: монографии [29], 3 сборниках научных трудов [25, 26, 28], 1 учебном пособии [40], статьях, трудах и тезисах конференций [37–39], [41–55].

НИР выполнена в соответствии с плановым заданием полностью.

РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ	
	
СВИДЕТЕЛЬСТВО	
О РЕГИСТРАЦИИ КОМПЬЮТЕРНОЙ ПРОГРАММЫ	
№ 843	
Наименование компьютерной программы: «Система управления учебно-научным порталом»	
Правообладатель компьютерной программы: Научно-исследовательское учреждение «Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета	
Год создания компьютерной программы: 2015	
Автор (авторы) компьютерной программы: Коваленко Антон Николаевич Мазаник Аркадий Леонидович Сыгова Светлана Николаевна Черепица Сергей Вячеславович	
Заявка №	С20150110
Дата подачи:	06.11.2015
Дата внесения записи в Реестр зарегистрированных компьютерных программ:	18.12.2015
Генеральный директор Национального центра интеллектуальной собственности	 П.Н.Бровкин
Настоящее свидетельство выдано на основании сведений и материалов, представленных в заявке на регистрацию компьютерной программ	
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ	

Рисунок 10.1 – Свидетельство №843.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Bell, D. The Coming of Post-Industrial Society: A Venture in Social Forecasting / David Bell. – New York: Basic Books, 1973. ISBN 0-465-01281-7.
2. Ковалев, М.М. Будем строить экономику знаний / М.М. Ковалев // Экономика Беларуси. – № 3. – 2010. – С. 62-66.
3. Kosilov, A. Knowledge Management for a new Nuclear Power Infrastructure / A. Kosilov, Y. Yanev, T. Mazour // Int. J. Nuclear Knowledge Management. – 2009. – Vol. 3, N 4. – P. 431-440.
4. Talwar, R. The shape of job to come / R. Talwar, T. Hancock. Fast Future Research, 2010.
5. Status and Trends in Nuclear Education. Nuclear Energy Series No. NG-T-6.1 STI/PUB/1475, ISBN: 978-92-0-109010-2. – Vienna: IAEA, 2011. – 239 p.
6. Comparative Analysis of Methods and Tools for Nuclear Knowledge Preservation. Nuclear Energy Series No. NG-T-6.7 STI/PUB/1494, ISBN 978-92-0-113610-7. Vienna: IAEA, 2011. – 115 p.
7. Knowledge Management for Nuclear Research and Development Organizations. IAEA-TECDOC-1675, ISBN 978-92-0-125510-5. Vienna: IAEA, 2012. – 74 p.
8. Johnson, P. Fundamentals of collection Development and Management / P. Johnson. – Chicago: ALA, 2004. – 205 p.
9. Knutsen, Unni. Changes in the National Bibliographies, 1996-2001 / U. Knutsen // National Libraries Workshop 167 IFLA Council and General Conference. – 2001. – P. 16-25.
10. Линден, И.Л. Формирование коллекций электронных документов в библиотеках мира: ключевые проблемы и современные тенденции / И.Л. Линден, Ф.Ч. Линден // Научные и технические библиотеки. – 2007. – № 11. – С. 5-20.
11. Тихомиров, В.П. Электронное обучение как основа образовательных систем XXI века / В.П. Тихомиров. // Телекоммуникации и информатизация образования. – 2007. – № 1. – С. 25-26.
12. ИНИС в информационной поддержке ядерного образования и организации ядерной индустрии: региональное сотрудничество и сохранение знаний // Новости ОИЯИ. – 2014 г. – N.1. – С. 50-54.
13. Савицкая, Т. А. Современные формы вузовского образования: лекционный подкастинг / Т. А. Савицкая [и др.] // Межд. Интернет-конференция «Информационно-технологическое обеспечение образовательного процесса государств-участников СНГ»: Сб. докладов. – 27–30 ноября 2012. – Минск, 2012. – 7 с. (электронный ресурс).
14. Савицкая, Т. А. Инновационные технологии в ядерном образовании: опыт Белорусского государственного университета / Т. А. Савицкая, И.М. Кимленко, Н.А. Кумачев. // Межд. конф. «Менеджмент знаний и инновации: уроки технологических лидеров: Материалы. – 3-6 декабря 2012. – Москва, 2012. – 5 с. (электронный ресурс).
15. Brittain, S. Podcasting Lectures / S. Brittain, P. Glowacki, J. Van Ittersum, L. Johnson // EDUCAUSE Quarterly. – 2006. – № 3. – P. 24 – 31.
16. Guertin, L. A. Questioning the Student Use of and Desire for Lecture Podcasts / L.A. Guertin, M.J. Bodek, S.E. Zappe, H. Kim // MERLOT Journal of Online Learning and Teaching. – 2007. – V. 3. – № 2. – P. 133 – 141.
17. Scutter, S. How do students use podcasts to support learning? / S. Scutter, E. Stupans, T. Sawyer, S. King // Australasian Journal of Educational Technology. – 2010. – 26(2). – P. 180-191.
18. Сытова, С. Н. Возможность использования системы электронного документооборота E-Lab для создания учебно-научного портала ядерных знаний / С.Н. Сытова, С.В. Черепица, А.С. Лобко // Сборник научных трудов IV Конгресс физиков Беларуси (24-26 апреля 2013 г. Минск). – С. 419-420.

19. Сытова, С. Н. Возможность использования системы электронного документооборота «Е-Lab» для создания учебно-научного портала ядерных знаний / С. Н. Сытова, С.В.Черепица, А. С. Лобко // Труды Международного конгресса по информатике «Информационные системы и технологии – CSIST’2013», 4-7 ноября 2013 г., Минск. – С.254-259
20. Fast reactor knowledge preservation system: taxonomy and basic requirements. –Vienna: International Atomic Energy Agency, 2008. – 79 p.
21. International Atomic Energy Agency. Safety Glossary, Terminology used in Nuclear Safety and radiation Protection, 2007 Edition. – Vienna: IAEA, 2007.– 238 p.
22. Закон Республики Беларусь от 5 января 1998 г. № 122-З «О радиационной безопасности населения» с изменениями и дополнениями от 21 декабря 2005 г. № 72-З // Национальный реестр правовых актов Республики Беларусь. – 2006. – № 2. – 2/1169, и от 6 ноября 2008 г. № 440-З Национальный реестр правовых актов Республики Беларусь. – 2008. – № 266. – 2/1537.
23. Закон Республики Беларусь от 30 июля 2008 г. № 426-З «Об использовании атомной энергии» с изменениями и дополнениями от 9 ноября 2009 г. № 53-З // Национальный реестр правовых актов Республики Беларусь. – 2009. – № 276. – 2/1605, и от 22 декабря 2011 г. № 326-З // Национальный реестр правовых актов Республики Беларусь. – 2012. – № 1. – 2/1878.
24. Варламов, В.В. Атомные ядра. Основные характеристики / В. В. Варламов, Б.С.Ишханов, С.Ю. Комаров. – М.: Университетская книга, 2010. – 334 с.
25. Инженерия сцинтилляционных материалов и радиационные технологии – ИСМАРТ 2014: тезисы четвертой междунар. конф., 12-16 октября 2014 г., Минск, Беларусь. – Минск: Изд. Центр БГУ, 2014. – 151 с.
26. Fundamental problems of nuclear physics, atomic power engineering and nuclear technologies: LXIV international conference "Nucleus 2014", July 1–4, 2014, Minsk, Belarus: Book of abstracts. – Minsk: Publishing center of BSU, 2014. – 276 p.
27. Yanev, Y. Nuclear knowledge management / Y. Yanev// Int. J. Nuclear Knowledge Management. 2009. – Vol. 3, No. 2. – P.115–124.
28. 11-ый семинар по европейскому сотрудничеству в области высшего образования и исследований по ядерной инженерии и радиологической защите = 11th Workshop on European Collaboration for Higher Education and Research in Nuclear Engineering and Radiological Protection / Материалы. — Минск: Изд. центр БГУ, 2015. — 28 с. (Белорус. гос. ун-т).
29. Абламейко, С.В Университет в современном обществе. БГУ в стране и мире/ С.В.Абламейко [Т.А.Савицкая и др.]; под общ. ред. С.В.Абламейко. – Минск: БГУ, 2015 г. – 311 с.
30. Давыдов Ю.П. Основы радиохимии / Ю.П.Давыдов. – Мн., 2014. – 317 с.
31. Friedlander, G. Nuclear and Radiochemistry/ G. Friedlander [et al.]. – 3rd Edition, John Wiley and Sons, 1981. – 704 p. ISBN: 978-0-471-86255-0.
32. Воронов В.Н. Химико-технологические режимы АЭС с ВВЭР/ Воронов В.Н., Ларин Б.М. Сенина В.А. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 390 с.
33. Копылов А.С.Водоподготовка в энергетике: Учебное пособие для вузов. – 2 изд., стереот./ Копылов А.С., Лавыгин В.М., Очков В.Ф. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 309 с.
34. Величины и единицы в дозиметрии защиты от ионизирующих излучений. Доклад МКРЕ № 51 (перевод). – Maeyland: Bethesda, 1993.
35. Рекомендации Международной комиссии по радиационной защите от 2007 года Публикация 103. // Пер с англ./под общей ред. М.Ф.Киселева и Н.К.Шандалы. – М.: Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009.

36. Кутьков, В.А. Величины в радиационной защите и безопасности / В.А. Кутьков. – Препринт РНЦ «Курчатовский институт», 2011.
37. Timoshchenko, A. Distance learning to support the building competence via professional postgraduate education in nuclear and radiation safety and opportunities for co-operation/ A. Timoshchenko [et al.] // 11th Workshop on European Collaboration for Higher Education and Research in Nuclear Engineering and Radiological Protection / Материалы. — Минск: Изд. центр БГУ, 2015. – P.20
38. Charapitsa, S. Implementation of portal of nuclear knowledge BelNET / S.Charapitsa [et al.]// 11th Workshop on European Collaboration for Higher Education and Research in Nuclear Engineering and Radiological Protection / Материалы. — Минск: Изд. центр БГУ, 2015. – P.21
39. Сытова, С.Н. Формирование контента учебно-научного портала ядерных знаний BelNET/ С.Н. Сытова [и др.]. // V Конгресс физиков Беларуси (27-30 октября 2015): Сборник научных трудов. / редкол.: С.Я. Килин (гл.ред.) [и др.]. – Минск : Ковчег, 2015. – С. 255-256.
40. Авданина, Э. А. Практикум по дисциплинам «Взаимодействие ионизирующих излучений с веществом и методы и устройства регистрации излучений» / Э. А. Авданина [и др.]. – Минск: Изд. Центр БГУ, 2014. – 187.
41. Savitskaya, T. Nuclear education at the Faculty of Chemistry of the Belarusian State University: from innovation lecturing to open distance labs / T. Savitskaya, I. Kimlenka, O.Shadyro, D. Sviridov// 11th Workshop on European Collaboration for Higher Education and Research in Nuclear Engineering and Radiological Protection / Материалы. – Минск: Изд. центр БГУ, 2015. – P.18
42. Timoshchenko, A. Distance learning to support the building competence via professional postgraduate education in nuclear and radiation safety and opportunities for co-operation/ A.Timoshchenko, E.Avdanina, I.Dubovskaya [et al.] // 11th Workshop on European Collaboration for Higher Education and Research in Nuclear Engineering and Radiological Protection / Материалы. — Минск: Изд. центр БГУ, 2015. – P.20
43. Дубовская, И.Я. Создание учебно-научного портала ядерных знаний / И.Я.Дубовская, Т.А.Савицкая, А.С. Лобко, С.Н. Сытова, С.В. Черепица // Международная научно-техническая конференция, приуроченная к 50-летию МРТИ–БГУИР (Минск, 18–19 марта 2014 года) : материалы конф. В 2 ч. Ч. 1 / редкол. : А. А. Кураев [и др.]. – Минск : БГУИР, 2014. – С.450-451.
44. Charapitsa, S.V. Structure of Belarusian educational and research web portal of nuclear knowledge / S.V. Charapitsa, I. Ya. Dubovskaya, A.S. Lobko, T.A. Savitskaya, S.N. Sytova // E-Print Archive: 1404.1338v1 [cs.CY] [Электронный ресурс] – Режим доступа : <http://xxx.lanl.gov/abs/1404.1338> – Дата доступа : 04.04.2014.
45. Charapitsa S.V. Steps in creation of educational and research web-portal of nuclear knowledge BelNET. [cs.CY]. / S.V. Charapitsa, I. Ya. Dubovskaya, A.S. Lobko [et al.]/ E-Print Archive: 1512.04313 [cs.CY] [Электронный ресурс] – Режим доступа : <http://xxx.lanl.gov/abs/1512.04313> – Дата доступа : 15.12.2015.
46. Sytova, S. Taxonomy of Belarusian educational and research portal of nuclear knowledge/ S. Sytova, A. Lobko, S. Charapitsa. // Proc. of XII Int. School-Seminar “Actual problems of Microworld Physics”. Dubna, Russia. – 2015. – Vol. 2. – P.212-220.
47. Сытова, С.Н. Применение фреймворка eLab в атомной энергетике / С.Н. Сытова, А.С. Лобко, С.В. Черепица // Доклады IV Межд. Конф. «Ядерные технологии XXI века» (Минск 21-23 октября 2014) / ГНУ «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны НАН Беларуси». – Минск: Право и экономика, 2014. – С. 18-23.
48. Charapitsa, S. Steps in creation of educational and research web-portal of nuclear knowledge BelNET/ S.Charapitsa, I.Dubovskaya, I.Kimlenko [et al.] // “Mathematics of XXI Century &

- Natural Science”. Book of Abstracts: International Symposium (September 29 – October 3, 2015). Edited by D.W.Serow. St.Petersburg: Publishing House of SPbPU. – 2015. – P. 31.
49. Сытова, С. Н. Программное обеспечение портала ядерных знаний BelNET/ С. Н. Сытова, С. В. Черепица, А. Л.Мазаник, Н. В. Кулевич // Веб-программирование и интернет-технологии WebConf 2015 : материалы 3-й Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 12-14 мая 2015 г. – Минск : Изд. центр БГУ, 2015. – С. 107-108.
 50. Tolstik, A.L. Nuclear Education at the Belarusian State University / A.L.Tolstik, T.A.Savitskaya, I.M. Kimlenka // 10th Workshop on European Collaboration for Higher Education and Research in Nuclear Engineering and Radiological Protection: Abstracts. – May 2014, Greece. – P. 4.
 51. Sytova, S.N. Classification and systematization of structure of Belarusian educational and research portal of nuclear knowledge /S.N. Sytova, S.V. Charapitsa, I. Ya. Dubovskaya, A.S. Lobko, T.A. Savitskaya, S.N. Sytova // 64 International Conference "NUCLEUS-2014" (Fundamental problems of nuclear physics, atomic power engineering and nuclear technologies) (Minsk, July 1 – 4, 2014): book of abstracts /Ed. A.K.Vlasnikov. – Minsk: BSU, 2014. – P. 268.
 52. Сытова, С.Н. Применение фреймворка eLab в атомной энергетике / С.Н. Сытова, А.С. Лобко, С.В. Черепица // Тезисы докладов IV Международной конференции «Ядерные технологии XXI века», Республиканский научный семинар, «Атомная энергетика, ядерные и радиационные технологии», г. Минск, 21 – 23 октября 2014 г. – С.42-43.
 53. Tolstik, A.L. Nuclear Education at the Belarusian State University in the European Integration Context / A.L.Tolstik, T.A.Savitskaya, I.M. Kimlenka, J. Rodenas, G. Verdu, M. Zhuravkov // Proc. Int. Conf. “The European Union and Republic of Belarus: Getting Closer for Better Future”. – Minsk: BSU, 2014. – P. 334-338
 54. Савицкая, Т.А. Участие преподавателей и студентов в процессе информатизации образования: опыт химического факультета / Т. А. Савицкая, И. М. Кимленко, Н. А. Кумачев // Труды V Межд. Конф. «Информатизация образования – 2014». – Минск, 2014. – С. 110-115.
 55. Янковская, Д.В. Разработка методического обеспечения для специальности «Химия высоких энергий» / Д.В. Янковская, Е.И. Егина, Н.С. Верховец, М.Ю. Карнакова, Т.А. Савицкая, И.М. Кимленко // Труды 71-ой научной конференции студентов и аспирантов БГУ. – Минск, 2014. – С. 331-335.

ТЕЗАУРУС

ALARA is not simply a phrase, but a work principle, a mindset, a culture of professional excellence. In an ideal world, one could reduce his exposure to hazardous materials to zero. In reality, reducing an exposure to zero is not always possible; certain social, technical, economic, practical or public policy considerations will result in a small but acceptable level of risk. The best way to prevent this risk from increasing is to keep one's exposure ALARA.

ALARA practices apply to virtually any substance, but are mandated for radiation workers. One can never have "zero" radiation exposure because of the naturally occurring radioactivity that surrounds us - cosmic rays, natural isotopes in our body etc. Therefore, the best we can do is to add nothing to this background dose, i.e. we keep our exposure ALARA.

Atom smasher is a colloquial term for a [particle accelerator](#), a device that accelerates elementary particles (protons, electrons). [Physicists](#) have been building particle accelerators since 1931, when a 9-inch [cyclotron](#) atom smasher was built at the Berkeley Radiation Laboratory in Berkeley, California. Particle accelerators are key tools used to probe the structure of space, time and matter. The latest and greatest atom smasher is the 5 billion \$ Large Hadron Collider beneath the Franco-Swiss border near Geneva, Switzerland.

Biological half-life (T_b): In contrast to the radiological (physical) half-life (T_p), the biological half-life (T_b) is a measure of how long it takes to eliminate half of the radioactivity taken into the body by biological processes (e.g., excretion). For example, Cesium-137 (Cs- 137) has a physical half-life of approximately 30 years. Left outside the body, half of the initial radioactivity will decay or disappear in that time frame. Inside the body, however, Cs-137 has a biological half-life of only seventy (70) days. This means that biological processes significantly accelerate the rate of clearance associated with this radionuclide in comparison to the radiological half-life. Half of the radioactivity will be gone after 70 days, another half of the radioactivity in another 70 days, etc.

Bismuth germanate (BGO, chemical formula [Bi₄Ge₃O₁₂](#) or the less common type Bi₁₂GeO₂₀ is an inorganic chemical compound with main use as a [scintillator](#).

Burnout time is the time it takes for half atoms to transform to the heavier isotope.

Brachytherapy: Radiotherapy in which the source of irradiation is placed close to the surface of the body or within a body cavity as for prostate cancer.

Cold neutrons are the neutrons created by deceleration in a substance at a very low temperature (e.g. in liquid heavy hydrogen at – 250 °C).

Decommissioning is a general term for a formal process to remove something from active status.

Derived Air Concentration (DAC): The concentration of a given radionuclide in air which, if breathed by the reference man for a working year of 2,000 hours under conditions of light work (with an inhalation rate of 1.2 cubic meters of air per hour), results in an intake of one annual limit on intake (ALI).

Detector noise is the term given to any perturbation on the detector output that is not related to a sample. It is a fundamental property of the detecting system and determines the ultimate sensitivity or minimum detectable concentration that can be achieved.

Effective half-life (T_e): If radioactivity is taken into the body, decay of the radionuclide will occur by both physical and biological means. The effective half-life (T_e) is a measure of the combined influences of these two distinct half-lives: $1/T_e = 1/T_p + 1/T_b$. In the case of the Cs-137, for example, the radiological and biological half-lives are thirty (30) years and seventy (70) days, respectively. The effective half-life in this instance is slightly less than seventy (70) days. It is important to note that the effective half-life is always lower than either the biological or the physical half-life.

Epithermal (nucleonics) is a neutron having an energy in the range immediately above the thermal range, roughly between 0.02 and 100 electronvolts.

Food and Drug Administration (FDA or USFDA) is an agency of the United States Department of Health and Human Services. The FDA is responsible for protecting and promoting public health through the regulation and supervision of food safety, tobacco products, dietary supplements, prescription and over-the-counter pharmaceutical drugs (medications), vaccines, biopharmaceuticals, blood transfusions, medical devices, electromagnetic radiation emitting devices (ERED), veterinary products, and cosmetics.

Geiger-Nuttal Law or Geiger-Nuttall rule in [nuclear physics](#) relates the [decay constant](#) of a [radioactive isotope](#) with the energy of the [alpha particles](#) emitted. Roughly speaking, it states that short-lived isotopes emit more energetic alpha particles than long-lived ones.

Magnox is a now obsolete type of nuclear power reactor which was designed and is still in use in the United Kingdom, and was exported to other countries, both as a power plant, and, when operated accordingly, as a producer of plutonium for nuclear weapons. The name “magnox” comes from the alloy used to clad the fuel rods inside the reactor.

Neutron reactions are a special class of nuclear reactions involves neutrons. Due to the fact that they have no charge, neutrons are very effective in penetrating the nucleus producing nuclear reactions. Nuclear reactions and so-called “spallation” sources produce very high fluxes of neutrons. The most common neutron reaction is radioactive capture. In this process the excitation energy induced by the emission of gamma photon and the mass number of nucleus increases by one but the charge remains unchanged. Hence the process of radioactive capture produces a new isotope of the target element. This new isotope may be short-lived in which case it will decay to a new chemical element through the emission of an alpha particle, etc. Another important reaction is neutron induced fusion. In this process the excitation energy induced by the neutron causes the nucleus to break up or “fission” to light elements.

Nucleus is the extremely small, positively charged dense center of an atom that contains positively charged protons, neutral neutrons, and it surrounded by empty space through which one or more negatively charged electrons move.

1. a thing or part forming the center around which other things or parts are grouped or collected; core
2. Chem., Physics the central part of an atom, the fundamental particles of which are the proton and neutron, except for hydrogen, which is usually composed of one proton only: it carries a positive charge and constitutes almost all of the mass of the atom
3. Organic Chem. a fundamental, stable arrangement of atoms that may occur in many compounds by atomic substitution without structural change, as the benzene ring.

Positron Emission Tomography (PET) is a [nuclear medicine imaging](#) technique which produces a three-dimensional image or picture of functional processes in the body. The system detects pairs of [gamma rays](#) emitted indirectly by a [positron](#)-emitting [radionuclide](#) (tracer), which is introduced into the body on a biologically active molecule.

PUREX process: PUREX is an acronym standing for **P**lутonium - **U**Ranium **E**Xtraction — *de facto* standard aqueous nuclear reprocessing method for the recovery of uranium and plutonium from used nuclear fuel. It is based on liquid-liquid extraction ion-exchange. The PUREX process was invented by Herbert H. Anderson and Larned B. Asprey at the Metallurgical Laboratory at the University of Chicago, as part of the Manhattan Project under Glenn T. Seaborg; their patent "Solvent Extraction Process for Plutonium" filed in 1947, mentions tributyl phosphate as the major reactant which accomplishes the bulk of the chemical extraction. The Purex process is used for almost all fuel reprocessing today.

Radioactive Equilibrium: The equilibrium reached by a radioactive series in which the rate of decay of each nuclide is equal to its rate of production. It follows that all rates of decay of the different nuclides within the sample are equal when radioactive equilibrium is achieved.

Radiation Therapy that is administered at a distance from the body.

Radioactive Series is series of radioactive nuclides in which each member of the series is formed by the decay of the nuclide before it. The series ends with a stable nuclide. Three radioactive series occur naturally, those headed by thorium-232 (thorium series), uranium-235 (actinium series), and uranium-238 (uranium series). All three series end with an isotope of lead. The neptunium series starts with the artificial isotope plutonium-241, which decays to neptunium-237, and ends with bismuth-209.

SPILL control procedure

STOP...what you are doing

- Do not panic

- Stay in the immediate area

- Collect your thoughts and keep calm

PRESUME...that you are contaminated

- Do not spread the contamination

- Do not make any unnecessary moves

- If feasible, check for skin contamination

INFORM...others in the immediate area of the spill

- Have someone contact Radiation Safety

LOCALIZE...the spilled material

- Estimate the extent of the spill

- Place absorbent material on the spill (wear gloves)

LABEL...the area as contaminated

- Restrict individuals from entering or leaving the area

Spinthrascope is a device for observing individual nuclear disintegrations caused by the interaction of ionizing radiation with a phosphor or scintillator. The spintharoscope was invented by William Crookes in 1903. Upon inspecting the zinc sulfide screen under a microscope, he noticed separate flashes of light created by individual alpha particle collisions with the screen. Crookes named his device after the Greek word 'spintharis', meaning "a spark".

Sputtering is a process whereby atoms are ejected from a solid target material due to bombardment of the target by energetic [particles](#). It is commonly used for [thin-film deposition](#), etching and analytical techniques.

Spallation (nuclear physics) is the process in which a heavy nucleus emits a large number of nucleons as a result of being hit by a high-energy particle, thus greatly reducing its atomic weight.

Thermal neutrons are the neutrons created by deceleration in a substance at room-temperature (20° C).

LECTURE “NUCLEAR KNOWLEDGE MANAGEMENT”

Many have said we are moving from a post-industrial to a knowledge based economy. A great volume of knowledge demands managing. Knowledge management is much older than we thought. One of the oldest forms of managing knowledge is the oral tradition and the use of human memory to store knowledge. The first signs of preserving knowledge through writing dates back to around 3000 B.C. They were the clay tablets with cuneiform, then papyruses. This imperative to preserve knowledge eventually led from the great libraries of Egypt to writing culture of monasteries of Europe and first books. Along with the invention of alphabetic writing came parallel developments in the technologies of recording media and devices. If CD-ROM is the new papyrus, what is groupware and the internet? There is no doubt that before we'll deep into the history of devices a simple definition of knowledge management has to be done. This is: knowledge management (KM) refers to a multi-disciplined approach to achieving organizational objectives by making the best use of knowledge. KM focuses on processes such as acquiring, creating and sharing knowledge and the cultural and technical foundations that support them.

Knowledge Management (KM) comprises a range of strategies and practices used in an organization to identify, create, represent, distribute and enable adoption of [insights](#) and [experiences](#). Such insights and experiences comprise [knowledge](#), either embodied in individuals or embedded in organizational [processes](#) or practice.

KM is the process of gathering, storing, organizing, analyzing and sharing information among colleagues within an organization. It emerged as a scientific discipline in the earlier 1990s.

According to the IAEA (International Atomic Energy Agency) it is critical to establish knowledge management programs to

“maximise the flow of nuclear knowledge from one generation to the next and attract, maintain and further develop a dedicated cadre of highly competent professional staff to sustain nuclear competence.”

Like any highly technical endeavour, the use of nuclear technology relies heavily on the accumulation of knowledge. This includes technical information in the form of scientific research, engineering analysis, design documentation, operational data, maintenance records, regulatory reviews and other documents and data. It also includes knowledge embodied in people — e.g. scientists, engineers and technicians and human resources.

Introduction

Nuclear knowledge has been developed and accumulated over decades of research on and development of nuclear technologies for power and non-power applications. The present generation is the owner and custodian of that body of nuclear knowledge. It can be expected that large parts of this knowledge will be used in the future – most importantly for the continued use of existing nuclear installations, but also for future innovations and socioeconomic development. Unfortunately, the present status of nuclear knowledge and its management still remain in an unsatisfactory condition. Since nuclear knowledge is unique in many ways, managing this knowledge requires specific programmes and needs to achieve specific objectives. Without diligence in managing this knowledge, substantial portions could be lost due to staff retirements, as well as the disuse and discard associated with changing priorities. However, good management of nuclear knowledge can contribute to economics, safety and innovation.

This text is an attempt to summarise the development of nuclear knowledge in the past, its present status and unique characteristics and define a concept of nuclear knowledge management. It then outlines how nuclear knowledge management programmes can contribute to meeting a number of higher-level objectives in the future development and application of nuclear technologies.

Nuclear knowledge definition

There exist many definitions of knowledge. According to one of them, ‘knowledge’ includes everything from codified knowledge on paper or electronic media to the insights, capabilities and skills embodied in people. Knowledge also includes the expertise required to turn raw information into an understanding of relevant issues and provide meaning to the information. ‘Nuclear knowledge’ is knowledge specific or relevant to nuclear-related activities, including (but not limited to) technical engineering knowledge.

Nuclear knowledge is owned today by many different parties at all levels. Wide varieties of stakeholders claim interests in managing, using, applying, developing and sharing nuclear knowledge – each with specific objectives, requirements and limitations.

These stakeholders include:

- governments, including regulators;
- designers, vendors, utilities, operators, suppliers, consultants and support organizations;
- training and academic institutions;

Research and Development (R&D) organizations;

- the public and Nongovernmental Organisations (NGOs);
- international organisations.

Historical development of nuclear knowledge

The first thoughts on nuclear matter were developed some 2500 years ago in ancient Greece and were of a philosophical nature. Progress in science over the past two centuries generated the first scientific or technical insights and true scientific knowledge has been developed and accumulated over the past century. Following initial applications for medical purposes, the first large-scale application of nuclear knowledge was for defense purposes, where high levels of government support were supplied to aid such development. Nuclear knowledge was possessed by relatively small groups of professionals and shrouded in secrecy, yet the initial efforts to restrict its spread were not successful. Subsequently, the immense potential of the application of nuclear knowledge for human development was widely recognised, along with the need to carefully manage nuclear knowledge to harness its benefits and prevent its use for destructive purposes. The establishment of the International Atomic Energy Agency (IAEA) in 1957 constituted the first step by the international community to manage nuclear knowledge.

In the beginning, the development of nuclear knowledge for civilian applications relied predominantly on an empirical approach. Priority was given to experiments and the collected data were applied without the benefit of comprehensive analyses. The need for a systematic and consistent description of that knowledge was recognised, but the level of computer development and information technology was simply insufficient to achieve meaningful databases. Early assumptions about inexpensive and abundant nuclear energy led to the rapid growth of a wide variety of nuclear applications, including nuclear power plants and nonpower applications in industry, medicine and agriculture. This rapid growth created some difficulties, including the need to develop the necessary culture as a prerequisite for using nuclear knowledge for civilian purposes in a safe manner and preventing its misuse.

In the next phase, the nature of nuclear knowledge gradually evolved from being a national and strategic resource to a commercial resource. Some governments began to reduce support for the development, utilisation and management of nuclear knowledge, since it was assumed that market forces would be capable of handling these aspects. National nuclear regulatory regimes evolved to

ensure that nuclear knowledge was used in a safe manner. However, a few serious accidents in nuclear power plants and facilities, along with the failure of the nuclear community to adequately communicate with the public, resulted in a global stagnation of the nuclear industry for over two decades. This stagnation caused a loss of attractiveness of nuclear science and technology to the younger generation, resulting in low enrolments in nuclear engineering programmes and a subsequent widespread concern that the natural processes of transferring nuclear knowledge from one generation to the next could be seriously interrupted.

Another relevant factor potentially impeding the natural flow of nuclear knowledge to subsequent generations has been globalisation, which has led to a greater mobility of nuclear professionals who carry their tacit knowledge with them. Also, nuclear security requirements have resulted in the development of legal controls to prevent the free flow of persons with certain types of knowledge that could be used for military purposes. An additional factor has been the maturation of some segments of the nuclear industry, wherein competition has restricted the free flow of knowledge for proprietary reasons.

Present status of nuclear knowledge

Scientific nuclear knowledge has been accumulated for over a century, with specific operational experience acquired over approximately six decades. At present, nuclear knowledge is at a mature stage and has made significant contributions to a wide variety of applications. For example, in the field of nuclear power, a statistically significant collection of operational data from well over 12 000 reactor years of operational experience were acquired. National databases on operational nuclear facilities have been developed and criteria for assessing and improving the performance of nuclear facilities have been established. Similar progress has been achieved in nonpower applications of nuclear technology in agriculture, industry and medicine.

However, some of the nuclear knowledge developed with government support over the past six or more decades at a considerable cost may have exceeded the current commercial demand for it and some of it faces the danger of being permanently lost. While some parts of nuclear knowledge are being constantly developed and freely shared, other parts are ‘stranded’, restricted or not used. Owing to these inconsistencies, there is often a lack of effective mechanisms to transfer knowledge from one generation to the next.

Since the turn of the century, the nuclear field has experienced a period of unprecedented change. The nature and pace of this change are affected by technological, economic, environmental, political and social factors. In view of these driving forces, the present status of nuclear knowledge and its management remains in an unsatisfactory condition to support the anticipated growth in nuclear power use to meet the future needs of global development. A key reason for this is the number and diversity of nuclear knowledge owners and stakeholders. Nuclear knowledge is perceived differently by these diverse stakeholders and there is a lack of adequate coordination among the owners of these knowledge resources for their effective utilisation. Unfortunately, the public is often confused by inconsistencies in communicating nuclear knowledge, causing negative public attitudes that have often unnecessarily impeded the healthy growth of the nuclear industry.

Within the commercial nuclear industry, the relevant nuclear knowledge necessary to maintain the high performance of the current generation of nuclear reactors is generally adequate. The retention and transfer of this knowledge to the next generation of nuclear professionals is the major challenge to be faced in the coming years. Major gaps and knowledge loss have been recently recognised in the area of new construction, especially when it comes to project and interface management, subcontractors’ competence in specific areas, *etc.* Another common phenomenon is the fairly short-term vision of most commercial nuclear organisations, which expect their governments to fund longer-term development needs. Such governmental support has been inconsistent from country to country, resulting in an irregular appeal to attract students into the

nuclear profession. As a result, some countries have responded by initiating nuclear knowledge management activities in a systematic manner and other initiatives will follow.

One of the documents of IAEA (International Atomic Energy Agency) on **Knowledge**

Management for Nuclear Industry Operating Organizations (IAEA TECDOC Series No.1510) defines knowledge management (KM) to be an integrated, systematic approach to identifying, acquiring, transforming, developing, disseminating, using, sharing, and preserving knowledge, relevant to achieving specified objectives. The use of KM helps an organization to gain insight and understanding from its own experience. Specific activities in knowledge management help the organization to better acquire, store and utilize knowledge. Knowledge management consists of three fundamental components: people, processes and technology.

Knowledge management focuses on people and organizational culture to stimulate and nurture the sharing and use of knowledge; on processes or methods to find, create, capture and share knowledge; and on technology to store and assimilate knowledge and to make it readily accessible in a manner which will allow people to work together even if they are not located together. People are the most important component in a KM system and the creation of new knowledge is one of its most valuable by-products. For a KM system to function properly, the people involved must be willing to share and re-use existing knowledge and to cooperatively generate new knowledge to the advantage of the organization.

we should clearly identify at least four levels of nuclear knowledge.

Basic level: It consists of the nuclear knowledge which is (or should be) part of the general human culture. This should be taught to the larger part of the population.

Intermediate level: This is the nuclear knowledge which should be a part of the general scientific and technical culture. Every engineer and/or scientist (physicist, chemist, biologist, medical doctor, etc) having higher educational diploma (also non-nuclear specialization, even at BSc level) should possess this kind of knowledge.

Non-power nuclear: This is the level we are dealing with now. This competence should be formed at Universities at BSc, MSc and PhD levels for people who aim to work in this field.

Nuclear power: Naturally, this is the highest level of the nuclear competence. The objective is to develop the capacity and means to manage the nuclear knowledge as a resource for the efficient and safe implementation of the current nuclear programmes and socio-economic development in the future.

Future needs for nuclear knowledge

Given the significant impact of nuclear technology on our daily life over the past century, there is a widespread consensus that the need for nuclear knowledge will only increase in the future. The four primary areas of need are:

- the continued successful and safe operation of existing nuclear facilities
- the short- and long-term issues associated with decommissioning and waste management
- the design and construction of new nuclear facilities
- increasing the contribution of nuclear applications to medicine, agriculture and industry, particularly in developing countries.

1. Continuing operation and decommissioning of existing installations

Irrespective of the future growth or decline of nuclear power, the existing nuclear installations will continue to be operated as long as they remain commercially viable and their safety is justified. Nuclear power plants were originally expected to have a service life of about 30 years, but operational experience has demonstrated that most well-managed plants can continue to operate and are likely to have an economic service life of 60 years or more. Thus, knowledge of the design and construction aspects of the plant and operational experience has to be managed effectively and made available to successive generations of employees of utilities, regulators and other associated

organisations. The overall life cycle of many nuclear power plants from cradle to grave is likely to be in excess of 100 years, with the decommissioning and waste management phases lasting a number of decades afterwards. This makes the availability of appropriate nuclear knowledge imperative to be able to successfully manage the facility through all its phases to its green field end state.

2. Facilitating the growth of nuclear power

Concerns regarding global climate change and the availability of economically exploitable fossil fuels are driving many countries to reconsider the use of nuclear energy in a significant way. If nuclear power is to become a major long-term source of energy compatible with environmental stewardship, the international scale-up in developing new nuclear power plants could be substantial. The innovations, required to design and construct new plants compatible with national needs and constraints, must be built upon a strong foundation of well-sustained nuclear knowledge. A nuclear renaissance would be unthinkable without innovation. This requires an effective system of managing nuclear knowledge that facilitates appropriate sharing of knowledge, both in its current application and in the creation of new knowledge.

3. Sustaining nuclear knowledge for nonpower nuclear applications

The application of nuclear technology in areas such as medicine, agriculture and a wide variety of industrial applications has resulted in an immense array of humanitarian benefits in many nations – sometimes resulting in economic impacts even larger than that of nuclear power. Such applications tend to be less controversial than nuclear power and generally enjoy positive public perception. Knowledge in these areas is broadly disseminated and, in most cases, freely shared. Given the huge potential for a much wider global impact, it is essential that a good knowledge management system is in place for developing newer and more widely used applications.

The unique characteristics of nuclear knowledge

Nuclear knowledge is unique in many ways – different from the knowledge developed and used in other industrial domains. It is complex and involves very high development costs often requiring significant governmental support. Nuclear knowledge must be developed and retained over long time frames to service operational nuclear facilities and over even longer time frames to enable global sustainable growth. Special constraints exist due to the dual (peaceful and nonpeaceful) nature of nuclear technology and these characteristics have often led to serious public concerns. As further elucidated below, these unique characteristics make the efforts to effectively manage nuclear knowledge most desirable or even mandatory.

1. Complexity

The effective use of nuclear power and other nuclear applications for the benefit of humanity at large requires highly complex and multifaceted knowledge of several disciplines, including many branches of basic science and engineering, law, economics, finance, commerce, management and public communication. The acquisition of considerable nuclear knowledge is a necessary prerequisite for any country aspiring to harness the benefits of nuclear science and engineering. The uniqueness of this technology, especially the strict requirements for proper control, necessitates an intensive knowledge base with considerably more breadth and depth than for other technologies.

Owing to this complexity and in contrast to other resource types, the nuclear knowledge base is finite – both at the national and international levels. Whereas it may be possible to inject huge financial resources into some endeavours to greatly accelerate progress, such as building low-income or temporary housing to provide accommodation in the aftermath of a natural disaster, there is simply no way to short-circuit the time necessary to create or recreate nuclear knowledge. Once a crucial piece of it is lost, the time necessary to recreate such unique knowledge is very substantial and the price is high.

2. High costs

Largely due to its complexity, the development of nuclear knowledge is quite costly. Nuclear facilities, including many experimental facilities, are large and incorporate highly sophisticated components. Highly specialised multidisciplinary problem-solving skills are required of nuclear professionals. The development and retention of the necessary human resources required for success are inherently expensive. Due to this cost, a high level of government support and close monitoring of activities is essential during the development, application and transfer of nuclear knowledge.

3. Long-term development and utilisation

The time scales involved in generating nuclear knowledge are relatively long due to the long gestation periods of nuclear facilities for research and industrial applications. The knowledge developed in each application area is required to be preserved over several decades and effectively transferred to successive generations of professionals due to the very long life cycles of many nuclear facilities.

4. Importance of international cooperation

Nuclear knowledge has been used successfully in the past by many countries as a catalyst for socioeconomic development. It is becoming increasingly clear that a wide range of benefits can be obtained from the appropriate use of nuclear power and other nuclear applications. However, 'appropriate' use presupposes a certain level of maturity in the industrial and societal contexts, especially in terms of accountability and decision-making systems and a general awareness and understanding of nuclear issues beyond mere technological aspects. Hence, it is not surprising that international cooperation has played a crucial role in the development of nuclear knowledge right from the very beginning of its application for civilian purposes. Indeed, the importance of international cooperation to any country embarking on a nuclear programme today is a unique characteristic of nuclear science and technology.

5. Balance between sharing and protection

The inherently dual nature of nuclear technology necessitates constraints on the sharing of nuclear knowledge. In contrast to knowledge in other scientific domains, the sharing and use of nuclear knowledge are restricted due to concerns about nuclear proliferation. On the other hand, ensuring safety requires the ready availability of high quality, well-documented experience and knowledge. The risk to nuclear safety from the loss of or lack of access to nuclear knowledge could be very high. Thus, an appropriate balance between nuclear safety and safeguard requirements needs to be established in managing nuclear knowledge.

6. Government involvement

Owing to the long-term return on investment compared with other industries, as well as safety, security and nonproliferation issues, a high level of government involvement and close monitoring of activities is essential during the development, application and transfer of nuclear knowledge. This involvement is necessary not only to underwrite a large portion of the development cost, but also to manage nuclear liability (including its transboundary nature), nuclear safety concerns and the prevention of nuclear knowledge misuse under all circumstances.

To facilitate progress towards the development of the necessary infrastructure for a country which is considering the introduction of nuclear power as part of its national energy strategy, the IAEA has produced a guidance document, 'Milestones in the Development of a National Infrastructure for Nuclear Power' (IAEA, 2007), describing three distinct phases in the Development of a National Infrastructure for Nuclear Power. These are:

Phase 1. Considerations before a decision to launch a nuclear power programme is taken

Phase 2. Preparatory work for the construction of a Nuclear Power Plant (NPP) after a policy decision has been taken

Phase 3. Activities to implement a first (NPP).

The achievement of the infrastructure conditions for each of these phases is marked by a specific milestone at which the progress and success of the development effort can be assessed and a decision made to move on to the next phase. These milestones are:

Milestone 1. Ready to make a knowledgeable commitment to a nuclear programme

Milestone 2. Ready to invite bids for the first NPP

Milestone 3. Ready to commission and operate the first NPP.

Reference (IAEA, 2007) identifies 19 infrastructure issues that need to be considered in a holistic manner when initiating a nuclear power programme. These are:

1. National position
2. Nuclear safety
3. Management
4. Funding and financing
5. Legislative framework
6. Safeguards
7. Regulatory framework
8. Radiation protection
9. Electrical grid
10. Stakeholder involvement
11. Site and supporting facilities
12. Environmental protection
13. Emergency planning
14. Security and physical protection
15. Nuclear fuel cycle
16. Radioactive waste
17. Industrial involvement
18. Procurement
19. Human resource development.

The phases and issues of knowledge management

The scope of KM can be at different levels: applied to a whole organisation or broader, or simply a small office or workgroup, depending on organisational needs or resources. Examples of KM applications include developing an organisation-wide knowledge strategy linked to human resource development; incorporating KM into existing projects and processes, like NPP personnel training; and implementing projects with a specific knowledge goal.

For different KM applications or initiatives, three phases of implementation can be identified:

1. Understanding the context for KM and establishing a special purpose for the initiative, which may include promoting knowledge sharing, improving the management of explicit knowledge, fostering innovation and knowledge creation, and developing a strategic plan for KM for the organisation. The aim of this phase is to develop an understanding of the internal and external environment of the organisation by considering its strategy, capability, culture, and drivers.
2. Defining knowledge gaps. This phase encourages more investigation of the ‘desired’ knowledge environment. This desired situation should reflect the organisational strategy and the context of the organisation, and give a vision of the knowledge environment as it could be. A useful framework for analysis of the knowledge environment is in terms of four knowledge elements – people, process, technology and content. The analysis of knowledge gaps may reveal a number of gaps or weaknesses. Examples may include barriers to knowledge sharing, problems with the management of explicit knowledge, lack of awareness of tacit knowledge, *etc.*
3. Facilitating knowledge in action. The aim of this phase is to select and implement approaches, methods and tools to address the identified knowledge gaps. Examples of KM techniques related to

human resource development in nuclear organisations can be found in IAEA. KM does not end with the implementation of an initiative. It is necessary to review and monitor the initiative, the environment and the organisational strategy and continue working towards further improvement and refinement. An effective KM should become part of the initiative itself. Explicit and tacit knowledge developed during the course of the initiative should be captured, managed and shared.

Explicit and tacit knowledge

Explicit knowledge is easier to manage than tacit knowledge through the capture of all important information, in electronic form or hard copy, to create manuals, databases, project design documents, maintenance manuals, project variation orders and so on. The identification of documentation requirements and associated procedures for the creation, maintenance and updating of documents needs to be addressed as an upfront project requirement during the design phase itself and should not be added on later as an afterthought.

Tacit knowledge primarily makes up the core competence within an organisation and is more difficult to preserve and transfer to successors. Where the transfer of tacit knowledge has not been incorporated into the organisational learning process, an organisational memory loss occurs when key persons leave, which has often been the main reason for a project's failure. Organisational memory shapes an organisation's culture, its management approach, its decision-making process, its communication strategies and, last but not least, the definition of its operating boundaries that is captured in its job descriptions. Tacit knowledge, by its very nature, is an elusive concept and cannot be captured easily by conventional means. Standards and codes are being made by the national bureaus of standards of various countries as well as professional societies and these also help in knowledge preservation. The nuclear industry has to submit detailed documentation for clearance to national regulatory bodies and this requirement has helped in documenting nuclear and radiation safety information in detail.

The real challenge facing KM is the capture of this vital component of organisational continuity, particularly within rapidly changing organisations undergoing the turmoil of downsizing or reengineering processes. New techniques and tools for knowledge preservation such as *learning audits* and the establishment of *oral histories* have now been added to the traditional technique of *exit interviews*.

Tools to facilitate the capture of tacit knowledge have been developed and are being continuously improved. The experience in building these tools and the lessons learnt through their use include the following key insights:

- planning for KM, implementation and evaluation;
- fostering a knowledge-sharing culture;
- establishing communities of practice;
- upgrading information management.
- **Allegory of iceberg (A.Polanyi)**



EXPLICIT KNOWLEDGE (20%)

Documents
Information
Records
Files

TACIT KNOWLEDGE (80%)

Experience
Thinking
Competence
Commitments
Deed

Developing and maintaining nuclear competencies in the nuclear industry and nuclear regulatory authorities will be one of the most critical challenges in the near future, both for countries with existing nuclear power programmes and for countries considering the introduction of nuclear power. There is a risk for the loss of a substantial amount of critical nuclear knowledge and corporate memory which have been accumulated over the years or will be developed in future. The loss of such knowledgeable employees poses a danger to the continued development or operation of nuclear power facilities. In addition, the loss of this knowledge and expertise could impact future plans for the construction of new, advanced-design nuclear units. IAEA (2006) has developed practical guidance on knowledge loss risk management. The guidance is based upon actual experiences of IAEA MS operating organisations and is intended to increase awareness of the need to develop an integrated and strategic approach to capture critical knowledge before it is lost. Specific objectives of such guidance are to enable nuclear organisations to:

- conduct knowledge loss risk assessments to identify specific knowledge loss threats
- evaluate the consequences of the loss of critical knowledge and skills
- develop action plans to retain this knowledge
- utilise this knowledge to improve the skill and competence of new and existing workers.

It is important that the tools and processes of a knowledge loss risk management methodology not be standalone initiatives but should be a part of an overall KM system.

Conclusions

In developing peaceful uses of nuclear technology, we have to realise that nuclear knowledge management is very robust and strong and has to be sustained. Complacency is the enemy of a robust knowledge system. All those involved in nuclear activities have to be forever diligent to sustain the knowledge systems put into place. Nothing ever works on its own. It always has to be managed.

МАТЕРИАЛЫ ПО РАЗДЕЛУ «РАДИОХИМИЯ»

Белорусский государственный университет
Химический факультет

РАДИОХИМИЯ

ВВЕДЕНИЕ В ДИСЦИПЛИНУ

доц. Кимленко Ирина Михайловна



РАБОЧИЙ ПЛАН

Лекции – 30 часов

Семинары – 14 часов

КСР – 6 часов

ВСЕГО: 50 часов

Литература

КЛАССИЧЕСКИЕ УЧЕБНИКИ

- * Вдовенко В.Н. Современная радиохимия. - М.: Атомиздат, 1969.
- * Несмеянов А.Н. Радиохимия. - М.: Химия, 1978.
- * Нефедов В.Д., Текстер Е.Н., Торопова М.А. Радиохимия. Уч. пособие. - М.: Высшая школа, 1987.
- * Старик И.Е. Основы радиохимии. - Л.: Наука, 1969.
- * К. Келлер. Радиохимия: пер. с нем. - М.: Атомиздат, 1978.
- * Химия актиноидов: В 3-х т. Т.2. Пер. с англ./ Под ред. Дж.Каша, Г.Сиборга, П.Морсса. - М.: Мир, 1997.
- * Вассонов В.А. Основы радиохимии. ОГУАЗ, Обнинск, 2004 г.
- * Давыдов Ю.П. Основы радиохимии. Мн., 2014 г.

ЖУРНАЛЫ

- * Радиохимия
- * Безопасность окружающей среды
- * Ядерная и радиационная безопасность

Радиохимия – это...

Раздел химии, имеющий дело с радиоактивными веществами. Включает получение радионуклидов и их соединений путем обработки облученных материалов или природных радиоактивных веществ, применение химических методов к ядерным исследованиям и применение радиоактивности к исследованиям химических, биохимических или биомедицинских проблем.

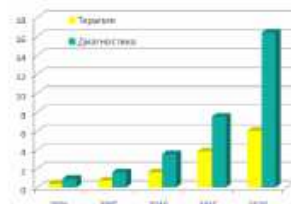
«Номенклатурные правила ИЮПАК по химии», 2001г.



Актуальные направления современной радиохимии

Разработка и производство новых радиофармпрепаратов для диагностики заболеваний

Прогноз объемов потребления радиофармпрепаратов (РФП) в мире, млрд.5/год



По прогнозам аналитиков доходы рынка РФП в США к 2020 г. могут возрасти в 20 раз по сравнению с 2000 г. и составить более 20 млрд. долл. к 2020 г.

Мировое производство и потребление РФП растет ежегодно на 10-15 %.

Актуальные направления современной радиохимии

Решение проблем ЯТЦ

Создание новых методов переработки ОЯТ и обеспечение безопасности этого процесса



Становление радиохимии как науки



Конрад Рентген

1895 г. - открытие неизвестного излучения, способного беспрепятственно проникать через различные вещества.

При прохождении тока высокого напряжения через газоразрядную трубку начинал светиться лежащий на столе экран, покрытый тонким слоем платино-цианистого бария.

Возникшее излучение названо X-лучами (рентгеновскими).

Историческое открытие сделано в лаборатории Вюрцбургского университета.

1901 г. - В. К. Рентген стал первым лауреатом Нобелевской премии по физике.



Рентгеновский снимок руки Анны фон Келлера, сделанный Рентгеном 22 января 1896 г.



Анри Беккерель

- 1896 г. - Предположение любое фосфоресцентное свечение сопровождается испусканием рентгеновского излучения.
- Проверка: поместил различные фосфоресцирующие вещества на завернутые в черную бумагу фотопластины.
- Неожиданный результат: засвеченной оказалась единственная пластинка, с которой соприкасался кристалл соли урана $UO_2SO_4 \cdot K_2SO_4 \cdot 2H_2O$.
- Многочисленные контрольные опыты показали, что причиной засветки явилась не фосфоресценция, а именно уран, в каком бы химическом соединении он ни находился.



Image of Becquerel's photographic plate. The shadow of a metal Maltese Cross placed between the plate and the uranium salt is clearly visible.

Мария и Пьер Кюри



- Источником лучей Беккереля может быть не только уран, но и торий.
- Практически одновременно обнаружено немецким физиком Герхардтом Шмидтом.
- Свойство испускать такие лучи есть более широкое явление, чем первоначально предполагалось.
- Свойство излучения вызывать ионизацию воздуха - использование наряду с фотографическим методом регистрации элктрического.

Мария Склодовская-Кюри

- 1901 г. - Новый термин «радиоактивность» как самопроизвольные превращения атомов химического элемента с испусканием излучения.
- 1903 г. - Мария и Пьер Кюри получили **Нобелевскую премию по физике** «за выдающиеся заслуги в совместных исследованиях явлений радиации».
- 1911 г. - **Нобелевская премия по химии** «за выдающиеся заслуги в развитии химии: открытие элементов радия и полония, выделение радия и изучение природы и соединений этого замечательного элемента».

Открытие радия

- Радиоактивность урановых соединений пропорциональна числу содержащихся в них атомов урана.
- Нарушение закономерности: урановая смоляная руда (уранинит), в четыре раза активнее, чем соответствующее количество чистого урана.
- Предположение: в уранините содержится неизвестный высокоактивный элемент.
- Переработка нескольких тонн урановой руды, использование в качестве носителей бария и висмута.
- Получения двух очень радиоактивных осадков: сернокислый барий и гидроксид висмута.
- В сернокислом барии найден новый химический элемент - аналог щелочноземельных металлов, названный М. Кюри **радием**.



Уранинит - минерал с идеализированной формулой UO_2 (на самом деле превращается между UO_2 и U_2O_5 и может достигать U_3O_8).



Радий - серебристый металл

Открытие полония

- В гидроксиде висмута обнаружен ранее неизвестный элемент, названный в честь родины Марии Кюри **полонием**.
- Разработан новый **радиохимический метод носителей**: соосаждение микроколичеств элементов с весовым количеством носителей.
- В поисках радиоактивных элементов, содержащихся в урановой руде, зародились первые методы радиохимии, зародился новый раздел химии - **радиохимия**.



Полоний - серебристо-серый металл

Первый этап развития радиохимии

- 1898-1913 гг.
- Исследования М. Кюри и П. Кюри.
- Обнаружение изотопов радона (Э. Резерфорд, 1899 - торон, т.е. радон-220; Дорн, 1900 - основной изотоп радона, радон-222; А. Дебьерн, 1904 - актинон, т.е. радон-219).
- Исследование состава радиоактивных лучей - альфа- и бета-лучи (Э. Резерфорд, М. и П. Кюри, П. Виллар (1898-1900)).
- Открытие гамма-лучей (П. Виллар, 1900).
- Открыто свыше 40 естественных радиоактивных элементов, в том числе полоний, радий, радон, актиний, протактиний.
- Установление правила сдвига Содди-Фаянса.
- Установление закономерности изменения химической природы элементов в результате радиоактивного распада.
- Опубликованы первые работы по влиянию температуры на эманирование твердых тел (А.С. Колосват-Червинский, 1906).
- Термин «**радиохимия**» введен в науку в 1910 году А. Камероном в его книге «Радиохимия» как наука, изучающей природу и свойства радиоактивных элементов и продуктов их распада.
- Аналогичное определение дано в 1911 г. Ф. Содди в его книге «Химия радиоактивных элементов».

Второй этап развития радиохимии

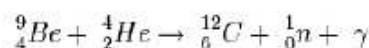
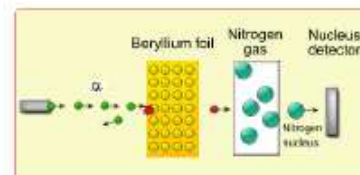
- 1913-1934 гг.
- 1913 г. - Исследования К. Фаянса и Ф. Панета, посвященные изучению общих закономерностей поведения ничтожно малых количеств естественных радиоактивных элементов и их изотопов в процессах соосаждения.
- Правила соосаждения адсорбции Фаянса-Панета, и О. Хана.
- Закон сокристаллизации В.Г. Хлопина (1924).
- Термодинамическая теория изоморфной сокристаллизации и адсорбции радиоактивных нуклидов (А.П. Ратнер, 1933).
- Метод радиоактивных индикаторов (Г. Хевеши и Ф. Панет)
- Первые работы по электрохимии радиоактивных элементов.

Третий этап развития радиохимии

- С 1933 совпадает с открытием нейтрона (Дж. Чедвик, 1932) и искусственной радиоактивности (И. Кюри и Ф. Жолио-Кюри, 1934).



Сэр Джеймс Чедвик - английский физик, лауреат Нобелевской премии по физике (1935 г.)



Третий этап развития радиохимии

- Устанавливается возможность искусственного получения радиоактивных изотопов почти всех известных стабильных элементов, открываются ядерные реакции, имеющие исключительно важное значение для получения радиоактивных изотопов и синтеза новых элементов.
- 1934 г. - Л. Сциллард и Т. Чалмерс обнаруживают своеобразные химические эффекты при процессах захвата атомными ядрами медленных нейтронов.
- 1939 г. - О. Хан, Ф. Штрассман и Л. Майтнер открывают процесс деления ядер урана.
- Проведена идентификация элементов (Г. Сиборг, А. Гиорсо, Г.Н. Флеров).
- Создание новых направлений в радиохимии (химия «горячих» атомов).
- Создание ядерной химии.
- Возникновение ядерной индустрии, включающей ядерное материаловедение, производство компонентов ядерного оружия и топлива для АЭС.

Радиохимия в лицах



В.Г. Хлопин

- Основные закономерности процессов соосаждения, сорбции и экстракции радиоактивных элементов
- Создание радиовой промышленности в СССР (радиовый завод в селе Бондюги, Татарстан)

Радиохимия в лицах



Ирен и Фредерик Жолио-Кюри

Открытие искусственной радиоактивности
Процесс деления урана
Открытие трансурановых элементов



Отто Ган



Фриц Штрассман



Г.Н. Флеров



Гленн Сиборг

Радиохимия в лицах



Б.П. Никольский

- Учение об ионном обмене
- Становление и совершенствование технологии производства плутония и других радиоэлементов на радиохимических предприятиях России.

Радиохимия в лицах



Б.Ф. Мясоедов

- Фундаментальные достижения по изучению поведения радионуклидов в окружающей среде.
- Современные технологии переработки ОЯТ
- Председатель Межведомственного научного совета по радиохимии при Президиуме РАН и ГК «Росатом».

Определения радиохимии

- Радиохимия – область науки, изучающая химическую природу и свойства радиоэлементов, а также продуктов их распада (Первое определение, Камерон, 1910).
- Радиохимия – область науки, занимающаяся преимущественно свойствами продуктов радиоактивных превращений, их разделением и идентификацией (Ф. Содди, «Химия радиоэлементов», 1911).
- Радиохимия – область химии, в которой изучаются химические и физико-химические свойства радиоактивных изотопов (И.Е. Старики, «Основы радиохимии», 1969).
- Радиохимия – область химии, изучающая химию радиоактивных изотопов, элементов и веществ, законы их физико-химического поведения, химию ядерных превращений и сопутствующих им физико-химических процессов (А.Н. Несмеянов, 1978).
- Радиохимия – область химии, объектами исследования которой являются радиоактивные элементы, а также продукты ядерных превращений на изотопном, элементном и молекулярных уровнях (В.А. Нефедов, 1987).



Определения радиохимии

- Радиохимия изучает химические свойства и физико-химические закономерности поведения радиоактивных элементов и отдельных радионуклидов, методы их выделения и концентрирования. Включает также промышленную отрасль, связанную с получением высокорadioактивных материалов и регенерацией ядерного горючего, разработку методов применения радионуклидов, а также специальной техники и оборудования для защиты от вредного воздействия радиоактивного излучения (Энцикл. словарь, 2000).

Основные разделы радиохимии

- Общая радиохимия
- Химия радиоактивных элементов
- Прикладная радиохимия

I. ОБЩАЯ РАДИОХИМИЯ

Изучает физико-химические закономерности поведения радиоактивных изотопов и элементов.

- **Общехимические свойства изотопных частиц.** Причины идентичности общехимических свойств изотопов.
- **Термодинамическое поведение изотопных частиц.** Критерии идентичности термодинамического поведения изотопов.
- **Кинетическое поведение изотопных частиц.** Критерии идентичности кинетического поведения изотопов.
- **Процессы изотопного обмена.** Классификация реакций изотопного обмена. Особенности и причины протекания реакций изотопного обмена. Основные кинетические характеристики реакций изотопного обмена.
- **Состояние радиоактивных элементов в растворах.** Ионнодисперсное, молекулярное и коллоидное состояние. Истинные коллоиды и псевдоколлоиды. Факторы, влияющие на процесс образования радиоколлоидов. Методы обнаружения и изучения радиоколлоидов: методы адсорбции и десорбции, диализа, ультрафильтрации, центрифугирования, диффузии, электрофореза, радиографии, экстракции, ионного обмена.

I. ОБЩАЯ РАДИОХИМИЯ

- **Распределение микроколичества радиоактивных изотопов между твердой и жидкой фазами.** Значение процессов распределения для радиохимии. Поведение веществ в состоянии крайнего разведения и процессы соосаждения.
- **Закон соосаждения Хана.** Соосаждение при отсутствии изоморфизма. Объединенное правило Фаниса-Хана.
- **Процессы изоморфной и изодиморфной сокристаллизации.** Определение изоморфизма по Гальшамиду. Гомогенное распределение микрокомпонента между твердой и жидкой фазами. Закон Бертро-Нерста. Доказательство возможности истинного термодинамического равновесия между кристаллами и раствором.
- **Закон Хлопина.** Факторы, влияющие на распределение компонентов между твердой и жидкой фазами. Гетерогенное (неравновесное) распределение микрокомпонента между твердой и жидкой фазами. Связь характера распределения с постоянной кристаллизации k . Распределение микрокомпонента между твердой фазой и расплавом.
- **Методы разграничения различных видов сокристаллизации.** Примеры использования процессов изоморфной сокристаллизации при радиохимических исследованиях.

I. ОБЩАЯ РАДИОХИМИЯ

- **Адсорбция радиоактивных элементов.** Правила адсорбции и систематика адсорбционных явлений. Первичная и вторичная адсорбция. Классификация адсорбционных процессов по Ратнеру. Механизм адсорбции, влияние различных факторов на процесс адсорбции. Первичная потенциалобразующая адсорбция. Первичная обменная адсорбция. Вторичная обменная адсорбция. Влияние на адсорбционные процессы различных факторов. Внутренняя адсорбция. Особенности процессов распределения веществ в результате внутренней адсорбции. Методы разграничения отдельных видов адсорбции. Использование адсорбционных процессов в радиохимии.
- **Электрохимия радиоактивных изотопов.** Особенности электрохимии радиоактивных элементов. Электрохимическое выделение изотопов с применением внешней ЭДС. Методы определения критического потенциала осаждения радиоактивных элементов: метод Хевеши-Панета, метод Ф. Жолио-Кюри, метод Зева, Синичиной, объединенный метод. О применимости уравнения Нерста к случаю электрохимического осаждения микроколичества вещества. Влияние природы электрода на величину критического потенциала осаждения радиоактивных элементов. Применение электрохимических методов для исследования химических и физико-химических свойств радиоактивных изотопов. Электрохимические методы выделения и разделения радиоактивных элементов. Бестоковое осаждение. Электролиз.

I. ОБЩАЯ РАДИОХИМИЯ

- **Ионообменные методы в радиохимии.** Физико-химические основы метода. Требования к ионообменным смолам и их основные свойства. Общие закономерности ионообменных разделений. Изучение состояния радиоактивных изотопов методом ионного обмена. Практические вопросы разделения и выделения изотопов с помощью ионного обмена.
- **Экстракционные методы.** Общие представления и основные закономерности. Факторы, влияющие на процесс экстракции. Экстракция эфирами и кетонами.

II. ХИМИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Химия технеция, прометия, астата, урана, тория и продуктов их распада – полония, радона, франция, радия, актиния и протактиния, трансурановых элементов, а также мезоатомов и водородоподобных атомов – мюония, позитрония.

Мюон (от греческой буквы μ) в стандартной модели физики элементарных частиц — неустойчивая элементарная частица с отрицательным электрическим зарядом и спином 1/2.



II. ХИМИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

- **Радиоактивные элементы и радиоактивные изотопы в природе.** Важнейшие свойства и характеристики радиоактивных элементов: технеций, прометий, полоний, радон, франций, радий.
- **Актиний и актиниды.** Возникновение актинидной гипотезы (Бор, Сиборг). Общая характеристика гипотезы. Характеристика электронных структур элементов. Химические и физические доказательства актинидного характера элементов с порядковыми номерами 90-104 (изменение устойчивости валентных состояний, кристаллографические данные об актиноидном сжатии, спектры поглощения растворов, магнитная восприимчивость и др.). Особенности первых членов ряда (торий, уран). "Уранидная" и "торидная" гипотезы (Гайсинский, Захаризен). Современные данные о состоянии окисления актинидных элементов. Трансактиниды (104-109). Их место в периодической таблице элементов. Электронные конфигурации. Экспериментально доказанные (для 104 и 105 элементов) и предсказанные (для 106-109 элементов) химические свойства трансактинидов. О границах периодической системы.

II. ХИМИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

- **Химия урана и трансурановых элементов.** Ядерные свойства. Разделение изотопов, выделение изотопов, образующихся при радиоактивном распаде. Простые и сложные соединения: гидриды, карбиды, силициды, халькогениды, галогениды. Химия растворов. Состояния окисления. Термодинамические параметры. Электродные потенциалы. Распространенность в природе: минералы, экономически рентабельные месторождения, низкосортные месторождения. Получение и очистка. Предварительное концентрирование. Извлечение из руд. Переработка урановой руды в ядерное топливо.

III. ПРИКЛАДНАЯ РАДИОХИМИЯ

Применение радиоактивных изотопов в науке и промышленности

- **Химия ядерного топливного цикла.** Место радиохимии в технологии производства и переработки ядерных материалов. Химия ядерного горючего. Основы ядерного топливного цикла. Преимущества и недостатки различных ЯТЦ. Химия продуктов деления. Отработанное ядерное топливо. Радиохимическая переработка облученного ядерного топлива. Технологии обезвреживания радиоактивных отходов: сбор, транспортировка, очистка, переработка, хранение. Радиохимия АЭС. Роль радиохимии в поддержании водно-химического режима теплоносителя на АЭС. Контроль и очистка от радиоактивных загрязнений теплоносителя на АЭС. Радиоактивные продукты коррозии и проблемы дезактивации. Белорусская АЭС. Особенности проекта.

III. ПРИКЛАДНАЯ РАДИОХИМИЯ

- Применение радиоактивных индикаторов в аналитической химии. Основные направления использования радионуклидов для анализа веществ. Преимущества использования радионуклидов в химическом анализе. Определение малого содержания веществ по известной удельной активности, метод изотопного разбавления, анализ, основанный на использовании избытка осадителя, радиометрическое титрование. Активационный анализ.
- Применение радиоактивных индикаторов в неорганической и физической химии. Определение растворимости малорастворимых веществ. Определение давлений насыщенных паров. Определение коэффициентов диффузии в твердых телах (метод снятия слоев) и в жидкостях (капиллярный метод). Определение состава и констант образования комплексных ионов. Использование радиоактивных индикаторов в химической кинетике (определение констант скоростей обратимых реакций при равновесии, кинетический изотопный метод М.Б. Неймана). Использование радионуклидов в электрохимии (изучение адсорбции на электроде, определение чисел переноса).
- Применение радиоактивных индикаторов в органической химии. Синтез меченых органических соединений (прямой химический синтез, специфические радиохимические методы, биосинтез). Особенности номенклатуры меченых органических соединений. Основные типы задач, решаемых с помощью радиоактивных индикаторов в органической химии. Изучение с использованием радионуклидов механизмов органических реакций; идентификация места разрыва или образования химических связей.

III. ПРИКЛАДНАЯ РАДИОХИМИЯ

Радиохимия окружающей среды. Примеры использования идей и методов радиохимии в области охраны окружающей среды. Радиэкологические последствия эксплуатации радиационно-опасных объектов. Радиэкологические проблемы, обусловленные естественными радионуклидами в неядерных областях. Исследование форм нахождения, миграционного поведения техногенных радионуклидов в окружающей среде. Радиационный мониторинг. Особенности объектов исследования. Отбор и первичная обработка проб. Учет потерь летучих веществ. Растворение анализируемых проб. Выделение и радиохимическая очистка исследуемых элементов.

Химия и радиохимия

Химия

1. Химические свойства элементов.
2. Наименьшая масса природного химического элемента в ходе исследования.
3. Ошибка рассчитанных параметров связана с ошибкой эксперимента.

Радиохимия

1. Сколько отделяют радиоактивных изотопов
2. Элементарный и изотопный состав систем, содержащих радиоактивные вещества, является функцией времени (фактор времени, экстремальные методы анализа)
3. Энергетические эффекты на 6 - 8 порядков превосходят соответствующие изменения в химических реакциях
4. Ультрамалые концентрации (радиохимия часто рассматривает как химическое ультрамалое состояние)
5. Высокая чувствительность радиометрических методов
6. Радионуклиды обычно не способны образовывать собственные фазы, поэтому существуют в виде включений, псевдоколлоидов и т.п.

Основное положение радиохимии

- Изучает состояние и законы поведения ультрамалых количеств вещества
- Сохранение индивидуальных химических свойств элемента при любых ничтожно малых концентрациях

Ядерная химия и радиохимия

- **WordNet: Nuclear Chemistry** is the chemistry of radioactive substances. **Synonym:** radiochemistry.
- **McGraw-Hill Science and Technology Encyclopedia:**
NC is an interdisciplinary field that, in general, encompasses the application of chemical techniques to the solution of problems in nuclear physics. The discoveries of the naturally occurring radioactive elements and of nuclear fission are classical examples of the work of nuclear chemists.
Although chemical techniques that are employed in nuclear chemistry are essentially the same as those in radiochemistry, these fields may be distinguished on the basis of the aims of the investigation.

Ядерная химия и радиохимия

- Обе науки базируются на факте взаимного влияния структуры электронных оболочек атомов (или молекул) и различных превращений атомных ядер (или элементарных частиц).
- **Ядерная химия** изучает ядерные реакции и сопутствующие им физико-химические процессы, устанавливает взаимосвязь между физико-химическими и ядерными свойствами вещества. Важнейшая задача ЯХ — выделение и идентификация радиохимическими методами продуктов ядерных реакций.

Отто Ган



A German chemist and Nobel laureate. He is regarded as "the father of nuclear chemistry" and the "founder of the atomic age". He served as the last President of the Kaiser Wilhelm Society (KWG) in 1946 and as the founding President of the Max Planck Society (MPG) from 1948 to 1960. Considered by many to be a model for scholarly excellence and personal integrity, he became one of the most influential citizens of the Federal Republic of Germany.

Радиационная химия и радиохимия

Радиационная химия – раздел химии, имеющий дело с химическими эффектами ионизирующих излучений.

Основные задачи:

- исследование влияния ионизирующих излучений на состав и свойства различных материалов;
- разработка способов их защиты от разрушения;
- использование ионизирующих излучений в химической технологии для радиационно-химического синтеза материалов.

Радиохимикам все время приходится учитывать тип распада и его последствия.



Состояние радионуклидов в различных фазах и методы его изучения

доц. Кимленко Ирина Михайловна

Состояние радионуклида

- Вся совокупность форм нахождения элемента в данной фазе.
- Определяется степенью окисления, степенью дисперсности, химической формой существования, положением атомов в кристаллической решетке.
- Определяет физико-химическое поведение элемента.

Растворы



- 1912 г. : исследования Ф. Панета, диализ растворов нитратов Pb-210, Bi-210, Po-210.
- В нейтральной среде только Pb-210 проникает через полупроницаемую мембрану.
- В слабощелочной не проходит Pb-210.
- Образование коллоидов в нейтральной среде Bi-210 и Po-210, в слабощелочной - Pb-210.
- Панет: радиоактивные изотопы в результате гидролиза ионов после достижения ПР гидрооксидов образуют коллоидные растворы.
- Опыты Годлевского, электрофорез.
- Bi-210 выделяется на обоих электродах одновременно - образование коллоидных частиц с различными по знаку зарядами.

Растворы



- В ряде случаев образование коллоидов радиоактивных элементов наблюдается при концентрациях, при которых ПР не достигнуто.
- Образование коллоидных частиц Bi-210 наблюдается в растворе Bi³⁺ при [Bi] = 10⁻¹⁰ М.
- М. Кюри и Р. Зигмонди: гипотеза образования псевдокolloидов.
- Псевдокolloиды – в результате адсорбции на крупнодисперсных или коллоидных частицах загрязнений.
- В специально очищенной воде доля радиоактивного изотопа, отделяемая центрифугированием или ультрафильтрацией, резко падает.

Панетом добавлялось время по мере в 1920 году для установления истинной природы коллоидных растворов и их разделения в этой среде. Метод, который фундаментальным образом в современной коллоидной химии, так как все предположения относительно природы и механизма образования коллоидов в настоящее время основаны на его результатах.

Растворы

Процессы гидролиза и комплексобразования.

Радионуклиды могут находиться в ионном состоянии, образовывать истинные коллоиды или псевдокolloиды.

Изотопы щелочных и щелочноземельных элементов образуют истинные растворы.

Истинные коллоиды: обычные коллоидные системы с твердыми частичками (дисперсной фазой), состоящими из молекул, содержащих радионуклиды. Необходимое условие – достижение ПР соединения, образующего дисперсную фазу. Более надежный критерий – пороговая концентрация элемента, при которой возможно образование полиядерных продуктов гидролиза.

Псевдокolloиды: сорбция радионуклидов на частицах посторонних загрязнений, обычно присутствующих в растворе.

Состояние радионуклидов

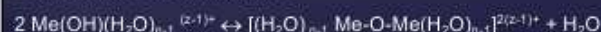
Образование моноядерных гидроксокомплексов

$$\text{Me}(\text{H}_2\text{O})_n^{z+} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Me}(\text{OH})(\text{H}_2\text{O})_{n-1}^{(z-1)+} + \text{H}_3\text{O}^+$$

Образование полиядерных гидроксокомплексов

$$p\text{Me}(\text{H}_2\text{O})_n^{z+} + q\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Me}_p(\text{OH})_q(\text{H}_2\text{O})_{pn-q}^{pz-q} + q\text{H}_3\text{O}^+$$

Образование оксокомплексов



Растворы

Влияние pH: в сильноокислой среде большинство радионуклидов образует истинные растворы.

Увеличение pH – образование коллоидных частиц.

Для элементов III группы коллоиды образуются при pH 7, IV и VI группы – pH 3,5 - 5.

Влияние других веществ:

Ионы, образующие с радионуклидом малорастворимые соединения, - образование истинных коллоидов.

Вещества, способные к образованию растворимых комплексных соединений с радионуклидом, - уменьшение радиокolloидов.



Растворы

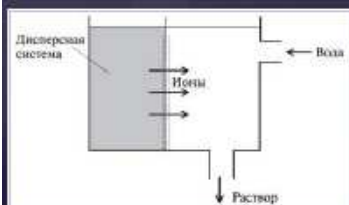
Присутствие электролитов в растворе – перезарядка коллоидных частиц и изменение соотношения форм радионуклида.

Влияние растворителя: изучено на примере водных растворов, другие растворители изучены мало.

Влияние времени: с течением времени происходит увеличение размера коллоидных частиц.

Диализ

Основан на диффузии и прохождении ионов и молекул через полупроницаемые мембраны. Мембраны пропускают молекулы и ионы, но задерживают частицы дисперсной фазы.

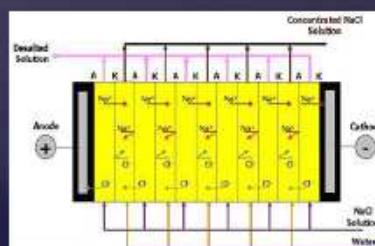


Перегородки из коллодия, пленок целлофана, пленок животного происхождения и т.п.

Коллодий — 4 % раствор нитроцеллюлозы в смеси этанола и диэтилового эфира в соотношении 1/7.

Электродиализ

Основан на электролитической диссоциации и переносе образовавшихся ионов через мембрану под действием разности потенциалов, создаваемой в растворе по обе стороны мембраны.



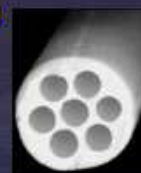
Ионобменные мембраны: высокая электропроводность, проницаемость для ионов, селективность, умеренная степень набухания и достаточная механическая прочность.

Ультрафильтрация

- Баромембранный процесс: жидкость под давлением «продавливается» через полупроницаемую перегородку.
- Размер пор ультрафильтрационных мембран: от 5 нм до 0,1 мкм.
- Подавляющее большинство всех задерживаемых веществ накапливается на поверхности мембраны, образуя дополнительный фильтрующий слой осадка.
- Метод прост и удобен
- Возможность оценки размеров коллоидных частиц путем подбора фильтров с соответствующим диаметром пор.

Ультрафильтрация

- Материал для изготовления ультрафильтрационных мембран - полимерные вещества (ацетат целлюлозы, полисульфон, полиамид, полиимид, полиакрилонитрил и их производные).
- Большинство ультрафильтрационных мембран состоят из тонкого селективного слоя толщиной несколько десятков мкм и менее и пористой подложки, которая обеспечивает механическую прочность.
- Полимерным мембранам при их изготовлении могут придаваться разнообразные свойства, что позволяет управлять их селективными характеристиками и устойчивостью к загрязнению различными веществами.



Другие методы

- Центрифугирование
- Ультрацентрифугирование
- Адсорбция
- Десорбция



Состояние радионуклидов Th(IV)

- Th(IV) при концентрации $1 \cdot 10^{-6}$ моль/л не осаждается при центрифугировании растворов и не задерживается целлофановой мембраной в опытах по диализу при pH < 4,0.
- Th(IV) в интервале pH 1 – 4 находится в растворе в виде моноядерных форм.
- При pH > 4,0 торий задерживается целлофановой мембраной и начинает оседать при центрифугировании уже после одного часа выдерживания раствора. Образование неионных (коллоидных) форм в растворах данного состава.
- При концентрациях $< 1 \cdot 10^{-8}$ моль/л для тория характерно псевдоколлоидное состояние за счет адсорбции моноядерных комплексов на коллоидных частицах кремниевой кислоты, присутствующих в растворах.

Технология очистки сточных вод спецпрачечной

- При дезактивации спецодежды стиркой на 1 кг сухого белья - 100 г моющих средств и около 30 кг воды, из них 12 кг – на стирку и 18 кг – на полоскание.
- При смешении двух потоков – воды стирки и воды полоскания – образуются жидкие низкоактивные сточные воды прачечной со следующим усредненным составом:
сухой остаток – 3,5 г/л, в том числе органические вещества и моющие средства;
удельная активность – $1 \cdot 10^{-2} - 1 \cdot 10^{-8}$ Ки /л.

Традиционная технологическая схема глубокой очистки воды

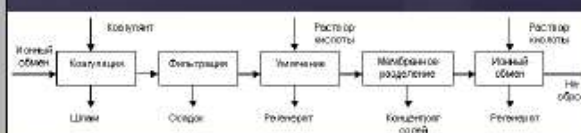
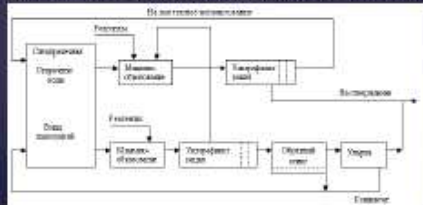


Схема переработки ЖРО спецпрачечной

- ЗАО "Медивна-фильтр", ООО НПФ "ГЭЛЛА-ТЭКО", ВНИИ АЭС
- Выбор реагентов определяется изотопным составом жидких радиоактивных сточных вод.
- Два потока отходов – вода стирки и вода полоскания – проходят свои технологические цепочки, на отверждение поступают только концентрат ультрафильтрации воды стирки и остаток после упаривания концентрата обратного осмоса воды полоскания.



Газовая среда

- Молекулярно-дисперсное состояние и аэрозоли.
- 1906 г.: опыты М. Кюри, радиоактивные изотопы, образующиеся при распаде радона в воздухе, входят в состав агрегатов (аэрозолей), способных оседать под действием силы тяжести.
- Естественные и искусственные радиоактивные аэрозоли

Газовая среда

- Естественные:**
В результате радиоактивного распада изотопов радона. При взаимодействии частиц космического излучения с ядрами атомов химических элементов, входящих в состав воздуха. Образующиеся радиоактивные атомы создают на частицах нерадиоактивной атмосферной пыли.
С поверхности почвы в атмосферу попадает пыль, содержащая радиоактивные изотопы.
- Искусственные:** ядерные испытания, технологические или аварийные выбросы на предприятиях ЯТЦ.
- Аэрозоли более интенсивно образуются в среде лоярных газов и паров (паров воды, хлороводорода).
- Среди радиоактивных аэрозольных частиц ($< 5 \cdot 10^{-4}$ Бк) могут присутствовать «горячие» частицы, активность которых может достигать 10^6 Бк.

Радиоактивные аэрозоли

- Диспергирование веществ**, содержащих радиоактивные продукты
Работы по разгерметизации загрязненного оборудования, шлифовка облученных деталей и сварочные работы.
- Конденсация и десублимация** паров радиоактивных веществ

Конденсационный метод образования аэрозолей при выбросах в Черном море из реактора (температура внутри 2500 °С) носители радиоактивных веществ попадали в относительно холодный воздух.
Одновременно с конденсацией может происходить десублимация, т. е. переход пара в твердое состояние.

Радиоактивные аэрозоли

- Адсорбция** радионуклидов на атмосферных аэрозольных частицах
Интенсивность адсорбции радионуклидов определяется удельной поверхностью неактивных аэрозолей.
- Наведенная активность**
- Распад инертных газов с последующей их конденсацией**
При радиоактивном распаде из газообразного ксенона образуются твердые аэрозольные частицы радионуклидов цезия, из криптона — изотопы рубидия, конденсирующиеся в высокодисперсные аэрозоли с диаметром 0.13-0.16 мкм.

Стекловолоконные аэрозольные фильтры



ФАК-3500-Д

Эффективность очистки по частицам ($d=0,3$ мкм) - 99,95%



Фильтр ФАП-200 – для использования на радиохимических предприятиях

Фильтры ФВКП-3250, ФВКТ-3650, ФВКТ-1640, ФВКВЭ-3650 для очистки воздуха в зданиях АЭС.

Фильтры ФВУ - применительно к передвижным фильтровентиляционным установкам для локальной очистки воздуха и поверхностей оборудования от токсичных и радиоактивных аэрозолей.

Установки фильтровальные комбинированные (УФК)



Для комплексной очистки на АЭС газовых сред от радиоактивных аэрозолей и радиойода в молекулярной и органической формах, производительность 3500, 7000, 10500 и 14000 м³/ч.

Йодный фильтр-сорбер с выемной секцией

Для очистки воздуха АЭС от летучих соединений радиойода фильтр-сорбер АУИ-1500 ВМ с выемным сорбционным модулем.

Позволяет существенно снизить эксплуатационные расходы, связанные с заменой отработавшего оборудования на новое после выработки ресурса.

В отработавшем фильтре-сорбере АУИ-1500 ВМ дорогостоящий металлический корпус не подлежит захоронению вместе с сорбентом, а выполняет свои функции на весь период эксплуатации АЭС.



Пассивная система фильтрации

- Для очистки воздуха от радиотоксичных летучих соединений радиоiodа применительно к работе реактора при заправочных авариях с полной потерей источников энергоснабжения.

- АЭС "Куданкулам" (Индия) с реакторной установкой ВВЭР-1000

- ПСФ включает фильтровальную установку и 12 теплообменников в виде труб. Фильтровальная установка состоит из шести одинаковых фильтровальных секций, которые имеют две модульные ступени очистки: аэрозольную (2 модуля) и сорбционную (4 модуля).



Действующий полигон для испытаний фильтрационного оборудования в натуральных условиях на базе первой в мире АЭС



Испытания различных модификаций аэрозольных фильтров и йодных сорбентов с обеспечением подачи радиоактивного воздуха в широком диапазоне входных параметров по радиоактивности и составу, моделирующих как режимы нормальной эксплуатации на АЭС, так и аварийные режимы.

Твердая фаза

- Минералы и горные породы
- Почвы
- U, Th – в узлах кристаллической решетки, дочерние изотопы – в междоузлиях кристаллическом пространстве, легко вымываются и мигрируют.



Почвы

Формы нахождения элементов в почвах по их подвижности и участия в питании растений можно подразделить на 3 основные группы:

- Элементы, адсорбированные поверхностью твердой фазы почвы**, способные при нарушении равновесия в системе «твердая фаза – почвенный раствор» переходить в почвенный раствор. Эта группа характеризует запас подвижных форм элементов почвы, обеспечивающий длительное снабжение растений элементами питания.
- Элементы почвенного раствора**. Предполагается, что эта группа элементов почвы интенсивно используется растениями в начальный период их роста и развития. Концентрация химических элементов в почвенных растворах характеризует их реальную биологическую доступность растениям.
- Элементы минерального скелета почвы**, входящие в состав структуры первичных и вторичных почвенных минералов, а также элементы, связанные с практически нерастворимыми органическими компонентами. Эта фракция элементов малоподвижна и не играет заметной роли в питании растений.

Метод выщелачивания

- Избирательное растворение индивидуальных соединений или близких по свойствам групп соединений в результате обработки почвы различными экстрагентами.
- В определенной степени используемые реагенты имитируют действие на почвенные частицы природных вод и растительных выделений (экссудатов).
- Запас подвижных форм химических элементов определяют обычно экстракцией растворами солей, разбавленными растворами кислот и щелочей, комплексообразователей.

Метод выщелачивания

- Использование растворов кислот различной концентрации в качестве экстрагентов для извлечения подвижных соединений элементов, связано с тем, что растения, поглощая элементы питания преимущественно в катионной форме, выделяют в раствор H^+ , что может приводить к понижению pH в ризосфере по сравнению с почвенной средой.
- Использование водных вытяжек с добавлением ионов. Ионы не оказывают практически никакого химического воздействия на почву: существенно не изменяют pH и не влияют на ионный состав равновесного почвенного раствора. Механизм взаимодействия элементов почвы с ионами напоминает процессы, происходящие на границе почва – корневая система растений.

Радиографические методы

- Основаны на преобразовании изображения контролируемого объекта в радиографический снимок или запись этого изображения на запоминающем устройстве с последующим преобразованием в световое изображение.
- В зависимости от используемых детекторов различают:
 - плёночную радиографию
 - ксенорадиографию.

В первом случае детектор скрытого изображения и регистратор статического видимого изображения – фоточувствительная плёнка.

Во втором – пластина, электрические свойства которой изменяются в соответствии с энергией излучения.

Мёссбауэровская спектроскопия



Эффект Мёссбауэра или ядерный гамма-резонанс открыт в 1958 г. Рудольфом Мёссбауэром в Институте им. М. Планка (ФРГ).

Эффект Мёссбауэра — это резонансное испускание и поглощение гамма-лучей без отдачи.





Эффект Мёссбауэра имеет квантовую природу и используется при изучении кристаллических, аморфных и порошковых образцов, содержащих один из 87 изотопов 48 элементов.

Элементы, имеющие мессбауэровские изотопы, но фактически не применяющиеся на практике: K, Mn, Ge, Kr, Tc, Ag, Xe, Cs, Ba, La, Hf, Re, Os, Pt, Hg, Pr, Nd, Pm, Sm, Tb, Dy, Ho, Lu, Th, Pa, U, Pu, Am

Резонансный максимум поглощения гамма-излучения получается при некоторой определенной скорости движения источника по отношению к протителю, в спектре Мессбауэра наблюдается минимум.

При различии температуры источника и поглотителя к химическому сдвигу добавляется дополнительный сдвиг мерсбауэровской линии.



Процессы экстракции в радиохимии

доц. Кимленко Ирина Михайловна

ПЛАН ЛЕКЦИИ

1. Закономерности экстракционных процессов
2. Применение экстракции
 - Исследование физико-химического состояния радионуклидов
 - Выделение, разделение и концентрирование
 - Аффинаж урана
 - Традиционные схемы переработки ОЯТ
 - Зеленые технологии переработки ОЯТ

Первый опыт

Экстракционная очистка урана от примесей: в 1840-х годах

Э. Пелиго: растворимость уранилнитрата в диэтиловом эфире.

«Победил» и лидирует трибутилфосфат.



Экстракционные процессы основаны на распределении веществ между двумя несмешивающимися растворителями с последующим разделением фаз.

Достоинства:

- 1) универсальность, избирательность и относительно высокая полнота выделения;
- 2) возможность получения препаратов радионуклидов без носителя;
- 3) большая скорость процесса и простота аппаратного оформления, позволяющая реализовать эти процессы в технологических схемах с дистанционным управлением.

Закон Бертло — Нернста

- Процесс равновесного распределения вещества между двумя несмешивающимися растворителями
- Частный случай закона распределения вещества между двумя фазами:

$$\frac{\bar{a}}{a} = P_T$$

$\bar{a}$ и a — термодинамические активности распределяющегося вещества в органической и водной фазах;
 P_T — термодинамическая константа распределения (константа Бертло — Нернста).

Закон Бертло — Нернста

Условия применимости:

- наличие термодинамического равновесия
- постоянство состава фаз
- одинаковая химическая форма распределяющегося вещества в обеих фазах
- отсутствие ассоциации, диссоциации

Распределение йода между водной фазой и алифатическими углеводородами.

Закон Бертло — Нернста

Состав органической и водной фаз сохраняется неизменным при изменении концентрации распределяющегося нуклида.

Постоянство коэффициентов активности распределяющегося вещества.

$$P = \frac{C_1}{C_2}$$

C_1 и C_2 — концентрации распределяющегося вещества в органической и водной фазах.

Распределяющееся вещество находится в органической фазе в виде ассоциатов со степенью ассоциации n :

$$P = \frac{C_1^n}{C_2}$$

или диссоциировано в водной фазе на v ионов:

$$P = \frac{C_1}{C_2^v}$$

Основные характеристики процесса экстракции

- Коэффициент распределения D** - отношение общих аналитических концентраций распределяющегося элемента независимо от его химической формы:

$$D = [M]_{\text{орг}} / [M]_{\text{вод}}$$

- Степень экстракции** — отношение количества вещества в органической фазе к его общему количеству в обеих фазах при данных условиях.

$$\% \text{ extraction} = \frac{100D}{D + \left(\frac{V_{\text{орг}}}{V_{\text{вод}}}\right)}$$

Основные характеристики процесса экстракции

Извлекаемая доля E

m – количество распределяющегося вещества,
 m_1 – количество вещества, перешедшее в органическую фазу

$$D = \frac{m_1 / V_1}{(m - m_1) / V_2}$$

После первого извлечения:

$$m_1 = m \frac{DV_1}{DV_1 + V_2}$$

ε – коэффициент экстракции (DV_1 / V_2)

$$E = \frac{\varepsilon}{\varepsilon + 1}$$

Основные характеристики процесса экстракции

Неизвлекаемая доля φ

$$\varphi = 1 - E = \frac{1}{\varepsilon + 1}$$

За n ступеней

$$1 - E_n = 1 - E^n = \left(\frac{1}{\varepsilon + 1} \right)^n$$

Общее количество вещества, извлекаемого после n экстракций

$$E_n = \frac{(\varepsilon + 1)^n - 1}{(\varepsilon + 1)^n}$$

Многочисленное извлечение малыми объемами экстрагента дает большую полноту извлечения, чем однократное тем же объемом экстрагента.

Основные характеристики процесса экстракции

В растворе – 2 экстрагируемых вещества,
коэффициент разделения

$$\alpha = \frac{D_1}{D_2}$$

Синергетный коэффициент S_k :

$$S_k = \lg \frac{D}{D_1 + D_2} > 0$$

D – коэффициент распределения при экстракции смесью экстрагентов;
 D_1, D_2 – коэффициенты распределения при экстракции каждым из экстрагентов в отдельности.

Синергетический эффект: образование в органической фазе смешанных аддуктов (сольватов).

Экстракционные процессы

Физическое распределение вещества между двумя фазами

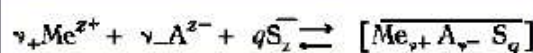
Взаимодействие за счет сил Ван-дер-Ваальса (или слабого донорно-акцепторного взаимодействия).



- Нейтральные неполярные органические растворители (бензол, октан, тетрахлорид углерода и др.)
- Слабо гидратированные, практически недиссоциирующие в водной фазе соединения
- Йод (в форме молекулярного йода), рутений и осмий (в форме тетраоксидов) и др.

Экстракционные процессы

Химическое взаимодействие экстрагируемого соединения с экстрагентом



$\bar{S}$ – экстрагент; q – сольватное число (число молекул экстрагента, входящих в состав экстрагируемого соединения).

Константа экстракции

Три подгруппы: экстракция нейтральными, кислыми и основными экстрагентами.

Нейтральные экстрагенты

Кислородсодержащие реагенты (простые и сложные эфиры, спирты, фосфорорганические соединения)

Высокая сольватирующая способность по отношению к неорганическим веществам

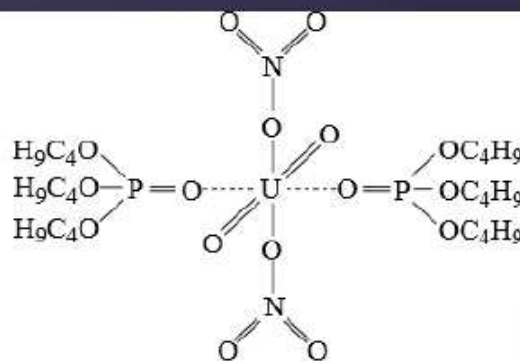
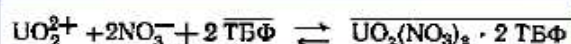
$\Delta G_f < \Delta G_{вз}$ – координационный (сольватационный) механизм

$\Delta G_f > \Delta G_{вз}$ – гидратно-сольватный механизм

Нейтральные экстрагенты

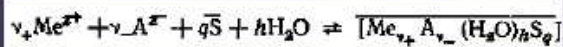
Координационный механизм

- Образование координационной связи непосредственно между функциональной группой экстрагента и ионом экстрагируемого металла.
- Образующиеся соединения (аддукты) – сольваты.
- Экстракция нитратов U(VI), Th(IV), Th(IV) и PЗЭ нейтральными фосфорорганическими соединениями.



Нейтральные экстрагенты

Гидратно-сольватный механизм



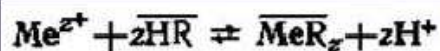
h, q — гидратное и сольватное числа

- Присоединение экстрагента через координационно связанную воду.

Экстракция спиртами актиноидных элементов, полония и др.

Кислые экстрагенты

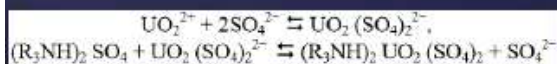
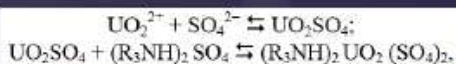
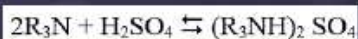
- Органические кислоты (карбоновые, нафтенные кислоты, фенолы).



- Двухосновные органические кислоты: образование внутримолекулярных соединений (хелатов).
- Экстракция актиноидных элементов 8-оксихинолином.

Основные экстрагенты

- Органические основания и их соли.
- Амины и соли четвертичных аммониевых оснований.



Кинетика экстракции

- Разность химических потенциалов распределяющегося вещества в органической и водной фазах.
- Химические реакции:
 - в объеме фаз,
 - в слоях, непосредственно прилегающих к границе раздела, на границе раздела фаз.

3 режима

- Диффузионный
- Кинетический с химической реакцией в объеме фаз
- Кинетический с химической реакцией на поверхности раздела фаз

Кинетика экстракции

- Зависимость скорости экстракции (dc/dt) от:
 - интенсивности перемешивания (1),
 - величины поверхности раздела фаз (2),
 - концентраций компонентов системы (3).

Режим процесса	Критерии установления режима
Диффузионный	$\frac{dc}{dt} = f(1,2); \quad \frac{dc}{dt} \neq f(3)$
Кинетический с химической реакцией в объеме фаз	$\frac{dc}{dt} = f(3); \quad \frac{dc}{dt} \neq f(1,2)$
Кинетический с химической реакцией на поверхности раздела фаз	$\frac{dc}{dt} = f(2,3); \quad \frac{dc}{dt} \neq f(1)$

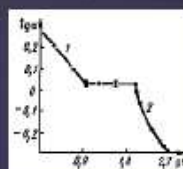
Кинетика экстракции

- Скорость процесса определяет необходимое время контакта фаз на стадии их смешения и разделения.
- В радиохимической технологии сокращение времени контакта особенно важно:
 - увеличение производительности процесса,
 - уменьшение единовременной загрузки радиоактивного материала,
 - понижение радиационного воздействия на экстрагент.

Применение экстракции

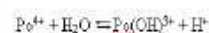
- Изучение физико-химического состояния радиоактивных элементов (гидролиз и комплексообразование).
- Зависимость коэффициента распределения от pH, концентрации лиганда в водной фазе, концентрации экстрагента в органической фазе.

Применение экстракции

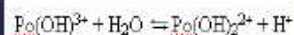


Распределение полония при экстракции раствором ТБФ в октане от pH

Первая ступень гидролиза:



при значениях pH, близких к 0 (участок кривой 1).
Гидроксокомплекс состава $\text{Po}(\text{OH})_2^{2+}$:



при pH > 1.8 (участок 2).
Константы гидролиза $K_1 = 0.33$ и $K_2 = 2 \times 10^{-3}$.

Применение экстракции

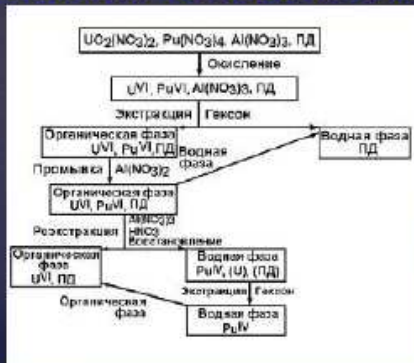
Разделение, выделение и концентрирование радионуклидов

- Аффинаж урана
- Переработка ОЯТ

Требования, предъявляемые к экстрагентам

- Высокая эффективность экстракции
- Химическая и радиационная стойкость
- Возможность проведения экстракции без предварительной обработки сильноокислых радиоактивных растворов
- Простота реэкстракции
- Доступность
- Дешевизна

Переработка ОЯТ: РЕДОКС-процесс



Нейтральные фосфоорганические соединения (НФОС)

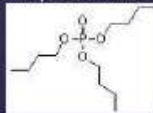
По типу координации с экстрагируемым веществом:

- Монодентатные
- Бидентатные
- Полидентатные

Монодентатные ФОС

Преимущества трибутилфосфата

- Малая растворимость в воде
- Высокая точка кипения
- Устойчивость к радиации и химическим реагентам
- Легкая регенерируемость



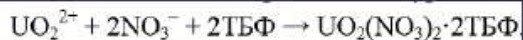
Недостатки трибутилфосфата:

- Высокая вязкость и плотность
- Образование дибутилфосфорной кислоты, монобутилфосфорной кислоты и фосфорной кислоты.

Аффинаж урана

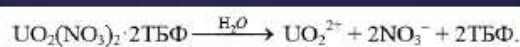
- Крупные предприятия в России, Канаде, Франции, Великобритании
- Завод Мальвези (Франция): ТБФ в додекане, колонные пульсационные экстракторы
- Фирма British Nuclear Fuel Ltd. (Великобритания): 20% ТБФ в углеводородном разбавителе (Exsol 80), экстракторы смесительно-отстойного типа
- Россия: 30% ТБФ в керосине, центробежные экстракторы

ТБФ



$$K = \frac{[\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{ТБФ}]}{[\text{UO}_2^{2+}] \cdot [\text{NO}_3^-]^2 \cdot [\text{ТБФ}]^2}$$

$$D = \frac{[\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{ТБФ}]}{[\text{UO}_2^{2+}]} \quad D = K \cdot [\text{NO}_3^-]^2 \cdot [\text{ТБФ}]^2$$

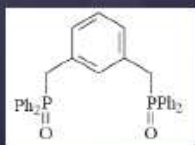


Переработка ОЯТ: ПУРЕКС-процесс

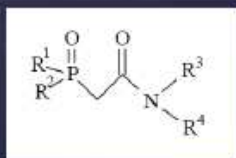


Бидентантные ФОС

- Два центра координации с ионами металлов
- Первая группа – всегда P=O



Диоксиды дифосфинов



Карбамоилалкилфосфиноксиды (КМФО)

Новые экстракционные технологии



UNEX-процесс

- Радиовый институт совместно с Айдакской национальной лабораторией
- Синергетная экстракционная смесь
- Испытания UNEX-процесса:

ВАО, образующиеся на заводах INEEL (США) и ГХК (Россия). Извлечено 99,6% Cs, 99,99% Sr, 99,96% актиноидов и лантаноидов, что позволило за один цикл получить рафинат, являющийся низкоактивным отходом.



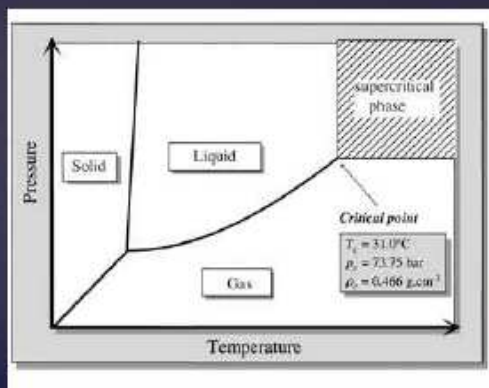
Твердофазные экстрагенты

- Нанокристаллический материал Таунит и полимеры (дифенил (дибутил-карбамоилметил) фосфиноксид (КМФО) и три-н-октилфосфиноксид (ТОФО).
- Извлечение актиноидов из сильноокислых сред
- Таунит-КМФО практически полностью извлекает Pu(IV), U(VI) и Am (III)
- Таунит-ТОФО: Pu(IV), U(VI)

Флюидная экстракция

Сверхкритическое состояние – это форма агрегатного состояния вещества, в которую способны переходить многие органические и неорганические вещества в условиях повышенного давления и температуры.

Вещество в сверхкритическом состоянии представлено: свободными молекулами и многочисленными слабо связанными кластерами (от англ. cluster – покл, скопление) молекул.



Сверхкритический оксид углерода (IV) (scCO₂)

Преимущества

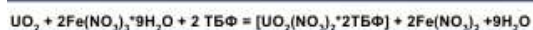
- Не токсичен, не взрывоопасен
- Инертен (возможна обратимая реакция с нуклеофилами (амины))
- Летуч, отсутствие отходов
- Высокая проникающая способность
- Незначительные количества вторичных жидких радиоактивных отходов
- Возможность разделения радиоактивных и токсичных отходов

Сверхкритический оксид углерода (IV) (scCO₂)

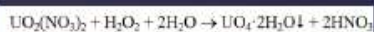
- Дезактивация защитной одежды и обуви, средств индивидуальной защиты, мелкого инструмента и др.
- Раствор гексафторацетилацетона и пиридина в СК-СО₂: удаление актиноидных элементов с поверхности тканей и металлов с коэффициентом 100-1000.
- По сравнению с традиционными методами при той же эффективности дезактивации объем вторичных жидких радиоактивных отходов при использовании СО₂ меньше в 20-200 раз.
- Смесь β-дикетонов и ТБФ в сверхкритическом СО₂: для растворения оксидов урана.

Сверхкритический оксид углерода (IV) (scCO₂)

Выделение урана из растворов нитрата Fe(III) в присутствии ТБФ



- В основной соли Fe (III) - более 96% Zr, Mo, Tc, Ru
- В растворе нитрата Fe (III) – Cs, Sr, Ba, Y, La, Ce, Nd
- В экстракте - ПД (~10%), после рекстракции урана остаются в растворе



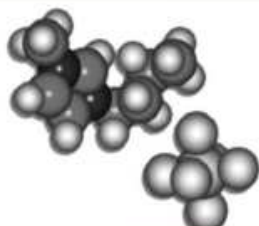
Ионные жидкости

- Вязкие жидкости, содержащие только ионы.
- В широком смысле - любые расплавленные соли, как правило, органические соли.
- Температура плавления от 233 К, в некоторых случаях от 183 К до 343 К.
- Соли, которые плавятся при комнатной температуре, называются «Room-Temperature Ionic Liquids» (гексафторфосфаты метилалкилимидазолия).

Расплавленные соли и ионные жидкости



Хлорид натрия
(температура плавления 806 °C)

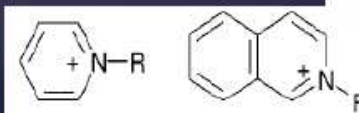


**1-бутил-3-метилимидазолий
гексафторфосфат**
(температура плавления 100 °C)

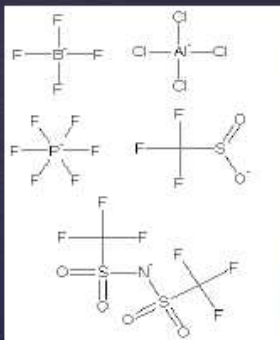
Катионы

Три основных вида органических ИЖ:

- Имидазолиевые (1,3-алкилимидазолий)
- Пиридиниевые
- Фосфониевые

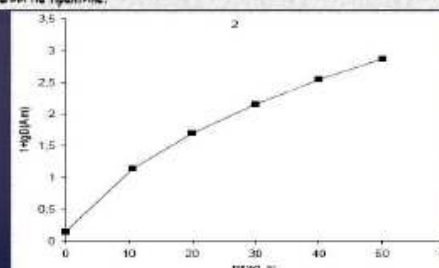


Анионы



Изучена экстракция U(VI), Pu(IV), Am(III), Ph₃Bu₃ в присутствии имидазолевых ([bmim]⁺PF₆⁻, [bmim]⁺BF₄⁻) и фосфониевых (P⁺PF₆⁻, P⁺Cl⁻) ИЖ из 3МНН₂O₂.

Показано, что добавки ИЖ приводят к росту D U(VI), Pu(IV) и Am(III) до 10⁴ раз, что позволяет существенно снизить концентрацию используемого реагента в случае его использования на практике.



Карбэкс-процесс

Экстракционные системы на основе карбоната метилтриалкиламмония



Эффективная экстракционная схема извлечения Sr и Cs с применением краун-эфиров на БГУП «ПТО «Маяк»

Состав отходов

[HNO₃] = 1.9М
⁹⁰Sr = 4 · 10⁴ Бк/л
¹³⁷Cs = 5 · 10⁴ Бк/л
¹³⁷Cs = 8 · 10⁴ Бк/л
¹³⁴Cs = 7 · 10⁴ Бк/л
ΣD = 1 · 10⁴ Бк/л
Na = 10 г/л
Fe = 5 г/л
Ni = 2 г/л
Al = 7 г/л
Mn = 1.5 г/л

- Экстракционная система 0.08 М дициклогексил-18-краун- 6 0.05 М дибензо-21-краун-7 во фторированном спирте
- Переработано более 90 м³ ВАО
- Степень извлечения Sr и Cs – 98 и 90%
- Простота рекстракции Sr действием воды

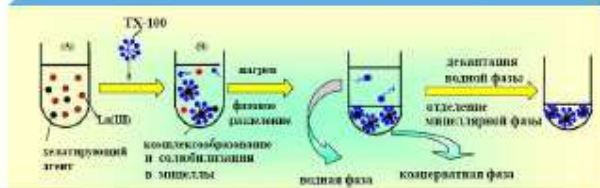
Экстракция в системах с двумя несмешивающимися водными фазами

- ❑ Гетерогенность: водорастворимый полимер (полиэтиленилгликоль (ПЭГ), поливиниловый спирт, поливинилпирролидон и др.) + неорганическая соль – фазообразователь (Na_2CO_3 , Na_2SO_4 , NaCl , KCl).
- ❑ Верхний слой – насыщенный водный раствор полимера, нижний слой – фазообразователь.

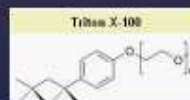
Преимущества:

- ✘ Полимеры легко разлагаются биологическими микроорганизмами;
- ✘ Не требуется добавления органического растворителя;
- ✘ Незначительное влияние гидратации на перенос экстрагируемого вещества из одной фазы в другую.

Схема мицеллярной экстракции с температурно-индуцированным разделением псевдофаз



Titanium X-100



ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

Проверка стабильности работы радиометрической аппаратуры и выбор оптимального времени счета при радиометрических измерениях

А. Проверка стабильности работы радиометрической аппаратуры

Краткие теоретические сведения

В электрических цепях радиометрической и дозиметрической аппаратуры вследствие неисправностей или воздействия различных факторов (повышение или снижение питающего напряжения больше допустимых пределов, изменение температуры при перегреве или чрезмерном охлаждении прибора и т.д.) могут возникать помехи, нарушающие стабильность работы измерительных приборов. При длительной работе аппаратуры, регистрирующей ионизирующее излучение, стабильность показаний обычно снижается. Поэтому периодически, с интервалом в несколько часов, ее необходимо проверять.

При стабильной работе счетной аппаратуры число регистрируемых прибором импульсов должно подчиняться тому же закону распределения, что и число ионизирующих частиц, попадающих в детектор. Радиоактивный распад имеет статистический характер, описывается распределением Пуассона, предельным случаем которого при достаточно большом числе измерений является нормальное распределение – распределение Гаусса. Поэтому оценивать работу счетной аппаратуры, регистрирующей ионизирующее излучение, можно путем сравнения распределения зарегистрированного числа импульсов с распределением Гаусса. Практически такое сравнение осуществляют с помощью методов, рассмотренных ниже.

Мерой отклонения распределения зарегистрированных радиометром числа импульсов от распределения Гаусса – показателем стабильности работы прибора, является критерий χ^2 , вычисляемый по формуле:

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (N_i - N_{cp})^2}{N_{cp}} \quad (1)$$

где N_i – число импульсов, зарегистрированных при i -м измерении за время t , N_{cp} – среднее число импульсов, зарегистрированных за время t , n – число измерений.

Распределение χ^2 , соответствующее нормальному закону в табл. 1 (P , % - вероятность найти экспериментально значение χ^2 большее, чем указано в таблице; n - число измерений).

Если значение критерия χ^2 , рассчитанное по формуле (1) из экспериментальных данных, превышает значение χ^2 , указанное в таблице 1 для вероятности $P=5\%$ - критическое значение, радиометрическая аппаратура работает нестабильно и не может быть использована для измерений. Чем меньше рассчитано из опыта значение χ^2 , тем более надежно работает аппаратура.

Стабильность работы радиометрической аппаратуры – отклонение числа импульсов от нормального закона, можно оценить также с помощью величины K_p

$$K_p = \frac{|v_1 - v_2|}{\sigma_{v_1-v_2}} = \frac{|v_1 - v_2|}{\sqrt{(v_1/t_1) + (v_2/t_2)}} \quad (2)$$

где v_1 и v_2 – значения скорости счета импульсов, определенные в результате двух отдельных измерений; t_1 и t_2 – время измерения, $\sigma_{v_1-v_2}$ – стандартная ошибка разности двух значений скорости счета импульсов.

Если радиометрическая аппаратура работает стабильно, вычисленное по формуле (2) из опытных данных значение $K_p \leq 2$. При этом, чем меньше полученное значение K_p , тем более надежно работает радиометр.

Проведение измерений и обработка результатов

1. Включите прибор. Измерьте число импульсов N , регистрируемых от радиоактивного источника. Режим измерений: $t=200$ с, число измерений $n=20$. Рассчитайте $N_{\text{ср}}$.
2. Используя полученные значения N_i и $N_{\text{ср}}$, рассчитайте критерий стабильности χ^2 по формуле (1). Сделайте вывод о работоспособности прибора.
3. Проведите два измерения числа импульсов N_1 и N_2 при $t=1000$ с от источника. Найдите скорости счета импульсов $v_1 = N_1/t$ и $v_2 = N_2/t$. Рассчитайте $\sigma_{v_1 - v_2}$ – среднюю квадратичную ошибку разности двух значений скорости счета импульсов.
4. Рассчитайте, исходя из полученных значений, параметр стабильности K_p по формуле (2). Сделайте вывод о работоспособности прибора.

Б. Выбор оптимального времени счета при радиометрических измерениях

Краткие теоретические сведения

При измерении интенсивности ионизирующего излучения и дозиметрии существуют случайные ошибки, обусловленные как статистическим характером ядерных процессов, так и целым рядом случайных внешних воздействий на измеряемую величину, включая нестабильность работы регистрирующей аппаратуры. Поэтому число импульсов, регистрируемых счетчиком от источника излучения, является случайной величиной.

Стандартная ошибка определения скорости счета импульсов от источников излучения при наличии радиационного фона

$$\sigma_v = \sqrt{v_{\epsilon} / t_{\epsilon} + v_{\phi} / t_{\phi}} \quad (3)$$

а относительная

$$\varepsilon_v = \frac{\sigma_v}{v_{\epsilon} - v_{\phi}} \quad (4)$$

Чем больше время измерения, тем больше число зарегистрированных частиц и, следовательно, меньше относительная ошибка определения скорости счета. Но время измерения, очевидно, не может быть безграничным. К тому же увеличению длительности эксперимента снижает производительность работы, что особенно важно при проведении массовых исследований. Кроме того, при продолжительном пребывании регистрирующей аппаратуры под напряжением, как правило, снижается стабильность ее показаний, и эффект снижения ошибки измерения за счет растягивания эксперимента во времени может быть сведен на нет этим фактором.

Ошибка определения скорости счета импульсов v от радиоактивного источника при наличии радиационного фона зависит не только от времени измерения t , но и от соотношения между временем, затраченным на измерение фона, и временем измерения скорости счета импульсов от источника излучения вместе с фоном. Если общее время измерения фиксировано, то, как следует из теории, ошибка измерения скорости счета от источника излучения $v = v_{\epsilon} - v_{\phi}$ будет минимальной, когда

$$\tau_{\epsilon} / \tau_{\phi} = \sqrt{v_{\epsilon} / v_{\phi}} \quad (5)$$

где τ_{ϵ} – оптимальное время измерения v_{ϵ} , τ_{ϕ} – оптимальное время измерения фона.

При заданной стандартной относительной ошибке измерения ε_v , оптимальные минимальные значения τ_{ϵ} и τ_{ϕ} можно найти по формулам:

$$\tau_{\phi} = (v_{\phi} + \sqrt{v_{\phi} v_{\epsilon}}) / [\varepsilon_v^2 (v_{\phi} - v_{\epsilon})^2] \quad (6)$$

$$\tau_{\epsilon} = (v_{\epsilon} + \sqrt{v_{\phi} v_{\epsilon}}) / [\varepsilon_v^2 (v_{\phi} - v_{\epsilon})^2] \quad (7)$$

Для практического выбора оптимального минимального времени измерения скорости счета импульсов от источника излучения необходимо провести измерение числа фоновых импульсов N_{ϕ} и числа импульсов от источника вместе с фоном N_{ϵ} в течение $\tau = 100 \dots 200$ с и определить приближенные значения скорости счета $v_{\phi} = N_{\phi}/\tau$ и $v_{\epsilon} = N_{\epsilon}/\tau$. Затем, задав требуемое значение ϵ_v , определить соответствующие минимальные оптимальные величины τ_{ϕ} и τ_{ϵ} по формулам (6) и (7).

Если скорость счета импульсов v от источника излучения значительно больше фоновой скорости счета, последней можно пренебречь.

Соотношение между v и v_{ϕ} , при котором скорость счета от фона можно не учитывать, зависит от требуемой точности результата. Так, при измерении с относительной ошибкой $\epsilon_v = 10\%$ фоновой скоростью счета v_{ϕ} можно пренебречь, если отношение $v_{\epsilon}/v_{\phi} \geq 2$; при $\epsilon_v = 3\%$ v_{ϕ} можно пренебречь, если $v_{\epsilon}/v_{\phi} \geq 5$.

Оптимальное время измерения скорости счета импульсов v от исследуемого источника можно выбирать также с помощью таблицы Белла.

Проведение измерений и обработка результатов

1. Проведите однократное измерение числа фоновых импульсов N_{ϕ} , регистрируемых радиометром, и число импульсов N_{ϵ} , регистрируемых счетчиком от пробы вместе с фоном. Время измерения $\tau = 100$ с.
2. Вычислите приближенное значение скорости счета импульсов $v_{\phi} = N_{\phi}/\tau$ и $v_{\epsilon} = N_{\epsilon}/\tau$.
3. Рассчитайте по формулам (6) и (7) оптимальные минимальные значения τ_{ϕ} и τ_{ϵ} , при которых относительная стандартная ошибка измерения скорости счета импульсов от радиоактивной пробы составляет 1% и 5%.
4. Задайте относительную стандартную ошибку ϵ_v , измерьте фоновое число импульсов и число импульсов от пробы вместе с фоном при $t = \tau_{\phi}$ и $t = \tau_{\epsilon}$ соответственно. Найдите скорость счета импульсов от исследуемой пробы.
5. Используя экспериментальные значения N_{ϕ} и N_{ϵ} , рассчитайте стандартные относительные ошибки измерения скорости счета импульсов от фона и от исследуемой пробы вместе с фоном по формуле:

$$\epsilon_v = \frac{1}{\sqrt{N}} \cdot 100\%$$

6. По формуле (4) рассчитайте также относительную стандартную ошибку скорости счета импульсов от исследуемой пробы и сравните полученное значение с величиной заданной ошибки ϵ_v .
7. На основании измеренных значений N_{ϕ} и N_{ϵ} рассчитайте коэффициент $K = N_{\epsilon}/N_{\phi}$ и определите с помощью таблицы Белла оптимальное время измерения фона и источника с фоном, при которых относительная ошибка ϵ_v соответствует заданному.
8. Сравните значения τ_{ϕ} и τ_{ϵ} , рассчитанные по формулам (6) и (7) с соответствующими значениями, полученными с помощью таблицы Белла. Проанализируйте результаты проведенного сравнения.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как оценивают работу счетной аппаратуры, регистрирующей ионизирующее излучение?
2. Что такое критерий χ^2 и величина K_p ?
3. Обоснуйте необходимость определения оптимального минимального времени измерения?
4. Как рассчитывается и как определяется на практике оптимальное время измерения?

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Савастенко В.А. Практикум по ядерной физике и радиационной безопасности. – Мн.: Дизайн ПРО, 1998. – 192 с.
2. Руководство к практическим занятиям по радиохимии / под ред. А.Н. Несмеянова. – М., 1971.
3. Практикум «Основы радиохимии и радиоэкологии», 2-ое изд. перераб. и доп. – М.: МГУ, 2012. – 97 с.

Распределение χ^2

Таблица 1

n	P, %													
	99	98	95	90	80	70	50	30	20	10	5	2	1	0,1
4	0,3	0,4	0,7	1,1	1,6	2,2	3,4	4,9	6,0	7,8	9,5	11,7	13,3	18,5
5	0,6	0,8	1,1	1,6	2,3	3,0	4,4	6,1	7,3	9,2	11,1	13,4	15,1	20,5
6	0,9	1,1	1,6	2,2	3,1	3,8	5,3	7,2	8,6	10,6	12,6	15,0	16,8	22,5
7	1,2	1,6	2,2	2,8	3,8	4,7	6,3	8,4	9,8	12,0	14,1	16,6	18,5	24,3
8	1,6	2,0	2,7	3,5	4,6	5,5	7,3	9,5	11,0	13,4	15,5	18,2	20,1	26,1
9	2,1	2,5	3,3	4,2	5,4	6,4	8,3	10,7	12,2	14,7	16,9	19,7	21,7	27,9
10	2,6	3,1	3,9	4,9	6,2	7,3	9,3	11,8	13,4	16,0	18,3	21,2	23,2	29,6
11	3,1	3,6	4,6	5,6	7,0	8,1	10,3	12,9	14,6	17,3	19,7	22,6	24,7	31,3
12	3,6	4,2	5,2	6,3	7,8	9,0	11,3	14,0	15,8	18,5	21,0	24,1	26,2	32,9
13	4,1	4,8	5,9	7,0	8,6	9,9	12,3	15,1	17,0	19,8	22,4	25,5	27,7	34,5
14	4,7	5,4	6,6	7,8	9,5	10,8	13,3	16,2	18,1	21,1	23,7	26,9	29,1	36,1
15	5,2	6,0	7,3	8,5	10,3	11,7	14,3	17,3	19,3	22,3	25,0	28,3	30,6	37,7
16	5,8	6,6	8,0	9,3	11,1	12,6	15,3	18,4	20,5	23,5	26,3	29,6	32,0	39,2
17	6,4	7,3	8,7	10,1	12,0	13,5	16,3	19,5	21,6	24,8	27,6	31,0	33,4	40,8
18	7,0	7,9	9,4	10,9	12,9	14,4	17,3	20,6	22,8	26,0	28,9	32,3	34,8	42,3
19	7,6	8,6	10,1	11,6	13,7	15,4	18,3	21,7	23,9	27,2	30,1	33,7	36,2	43,8
20	8,3	9,2	10,8	12,4	14,6	16,3	19,3	22,8	25,0	28,4	31,4	35,0	37,6	45,3
21	8,9	9,9	11,6	13,2	15,4	17,2	20,3	23,9	26,2	29,6	32,7	36,3	38,9	46,8
22	9,5	10,6	12,3	14,0	16,3	18,1	21,3	24,9	27,3	30,8	33,9	37,7	40,3	48,3
23	10,2	11,3	13,1	14,8	17,2	19,0	22,3	26,0	28,4	32,0	35,2	39,0	41,6	49,7
24	10,9	12,0	13,8	15,7	18,1	19,9	23,3	27,1	29,6	33,2	36,4	40,3	43,0	51,2
25	11,5	12,7	14,6	16,5	18,9	20,9	24,3	28,2	30,7	34,4	37,7	41,6	44,3	52,6
26	12,2	13,4	15,4	17,3	19,8	21,8	25,3	29,2	31,8	35,6	38,9	42,9	45,6	54,0
27	12,9	14,1	16,1	18,1	20,7	22,7	26,3	30,3	32,9	36,7	40,1	44,1	47,0	55,5
28	13,6	14,8	16,9	18,9	21,6	23,6	27,3	31,4	34,0	37,9	41,3	45,4	48,3	56,9
29	14,3	15,6	17,7	19,8	22,5	24,6	28,3	32,5	35,1	39,1	42,6	46,7	49,6	58,3
30	15,0	16,3	18,5	20,6	23,4	25,5	29,3	33,5	36,2	40,3	43,8	48,0	50,9	59,7

Таблица Белла

$\frac{\tilde{N}_\Sigma}{\tilde{N}_\Phi}$	$\varepsilon_v = 1\%$		$\varepsilon_v = 2\%$		$\varepsilon_v = 3\%$		$\varepsilon_v = 5\%$		$\varepsilon_v = 10\%$	
	N'_Φ	N'_Σ	N'_Φ	N'_Σ	N'_Φ	N'_Σ	N'_Φ	N'_Σ	N'_Φ	N'_Σ
1,3	240000	350000	60000	90000	27000	40000	9500	14000	2400	3500
1,5	89000	163500	22000	41000	10000	18000	3600	6500	900	1600
1,7	47000	105000	12000	26000	5000	12000	2000	4000	470	1000
2,0	24000	68000	6000	17000	3700	7600	1000	2700	240	710
3,0	11500	46000	3000	11000	1300	5100	450	1800	115	450
5,0	2000	23000	500	5700	200	2680	80	900	20	230
10,0	500	16000	130	4000	60	1800	20	650	5	160
20,0	150	13000	40	3700	20	1500	6	540	1,5	130
50,5	34	11900	9	3000	4	1300	1,3	480	0,34	120
100,0	11	11200	3	2800	–	1200	0,4	450	–	112
	–	10000	–	2500	–	1100	–	400	–	100

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

Определение геометрического коэффициента счета активности

ЦЕЛЬ: определение геометрического коэффициента η_s для препарата радиусом s , расположенного на различных расстояниях от окна счетчика.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

При абсолютных измерениях радиоактивности необходимо учитывать потери излучения, обусловленные взаимным расположением детектора излучения и измеряемого образца. Эти потери учитываются геометрической поправкой, называемой геометрическим коэффициентом, или поправкой на телесный угол.

Геометрический коэффициент η равен отношению телесного угла α , под которым детектор облучается источником излучения, к полному телесному углу 4π :

$$\eta = \frac{\alpha}{4\pi} \quad (1)$$

Геометрический коэффициент показывает, какая доля от общего числа A частиц или квантов, испускаемых препаратом, попадает на поверхность детектора излучения. При условии изотропности излучения геометрический коэффициент равен:

$$\eta = \frac{J_s}{A} \quad (2)$$

J_η - число частиц или квантов, падающих на поверхность детектора.

Задача определения геометрического коэффициента сводится либо к чисто математическому расчету, либо к экспериментальному определению абсолютной активности некоторого препарата и числа частиц или квантов, которые при регистрации этого препарата достигают поверхности детектора.

Для препаратов, радиус которых s меньше радиуса окна счетной трубки ($s/r \leq 1$), применима формула:

$$\eta_s = \frac{1}{\pi} \frac{1}{s^2} \left[1 - \frac{h}{R_r} - \frac{3}{8} \frac{h^2 r^2}{R_r^3} - \frac{5}{64} \frac{h^2 r^4}{R_r^5} \left(3 - 7 \frac{h^2}{R_r^2} \right) \right] \quad (3)$$

где $R_r = \sqrt{r^2 + h^2}$

Когда радиус препарата больше радиуса входного окна детектора излучений ($s/r \geq 1$), выражение для расчета геометрического коэффициента принимает вид:

$$\eta_s = \frac{1}{\pi} \frac{1}{r^2} \left[1 - \frac{h}{R_s} - \frac{3}{8} \frac{h s^2}{R_s^3} - \frac{5}{64} \frac{h s^4}{R_s^5} \left(3 - 7 \frac{h^2}{R_s^2} \right) \right] \quad (4)$$

где $R_s = \sqrt{s^2 + h^2}$

При $s/r=1$ выражения (3) и (4) совпадают.

Формулы (3) и (4) определяют долю излучения, попадающего на счетчик от источника, если излучение не рассеивается промежуточной средой (воздухом), а также если нет отражения излучения от стенок измерительного устройства (домика или кассеты). Влияние этих факторов может существенно изменить долю падающих на счетчик частиц.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

1. Рассчитывают значения геометрического коэффициента η_s для препарата радиусом s , расположенного на различных расстояниях h (0,5; 1; 2; 2,5; 3 и 3,5 см) от окна счетчика.
2. Строят график зависимости вычисленных значений η_s от величины h/r .

3. Производят 6-7 измерений скорости счета препарата радиусом s на различных расстояниях от окна счетчика в интервале от 0,5 до 3,5 см. Относительное статистическое отклонение скорости счета препарата за вычетом фона не должно превышать 3%.
4. Строят график зависимости скорости счета препарата без фона от величины h/r .
5. Находят отношения полученных скоростей счета к значениям геометрического коэффициента для соответствующих величин h/r и выражают графически зависимость $J/\eta_s = f(h/r)$. Объясняют причины отклонения полученного графика от прямой.
6. Результаты измерений и расчетов представляют в виде таблицы.

№	Расстояние от препарата до окна счетчика		Продолжительность измерения препарата с фоном t_c , мин	Число отсчетов прибора при измерении препарата с фоном N_c , мин	Регистрируемая скорость счета $J_c = N_c/t_c$, имп.мин	Продолжительность измерения фона t_ϕ , мин	Число отсчетов прибора при измерении фона N_ϕ , мин	Скорость счета фона $J_\phi = N_\phi/t_\phi$, имп.мин	Скорость счета без фона $J = J_c - J_\phi$, имп.мин	Геометрический коэффициент η	J/η
	h , см	h/r									

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое геометрический коэффициент счета?
2. Как определяется коэффициент η_s ?
3. Какие факторы оказывают влияние на долю падающих на счетчик частиц?

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

4. Савастенко В.А. Практикум по ядерной физике и радиационной безопасности. – Мн.: Дизайн ПРО, 1998. – 192 с.
5. Руководство к практическим занятиям по радиохимии / под ред. А.Н. Несмеянова. – М., 1971.
6. Практикум «Основы радиохимии и радиоэкологии», 2-ое изд. перераб. и доп. – М.: МГУ, 2012. – 97 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

Определение водопоглощающей способности материалов-носителей образцовых радионуклидных источников специального назначения

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: определение влажности, поглощающей способности и реакции водной вытяжки.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Под эталонными (образцовыми) радионуклидными источниками специального назначения подразумевают источники и растворы узкоцелевого назначения, отличающиеся от серийных образцовых мер и растворов видом, формой, диапазоном активности или удельной активности и позволяющие создавать метрологическое обеспечение для уникальных, единичных или мелкосерийных средств измерений на современном уровне или использовать серийные приборы в новом качестве - для измерения активности радионуклидов в различных средах.

Образцовые радионуклидные источники специального назначения (ОИСН) – это радионуклидные источники, изготовленные на основе сыпучих материалов (кварцевого песка $\rho \sim 1,7$ г/см³, древесных опилок $\rho \sim 0,2$ г/см³, пшеницы, пшени и ионообменной смолы),

в известной массе которых равномерно распределена также известная масса образцового раствора необходимого радионуклида.

Основными достоинствами ОИСН являются универсальность их применения, высокая точность аттестации ($\pm 5\%$) независимо от значения удельной активности, низкая стоимость, возможность массового изготовления в обычных лабораторных условиях. ОИСН выпускают в полиэтиленовых пакетах или в сосудах Маринелли с массой от 0,2 до 3 кг. Большой выбор радионуклидов и материалов разной плотности позволяет проводить с их помощью все необходимые градуировки и поверки радиометрической, дозиметрической и спектрометрической аппаратуры, применяемой для контроля радиоактивной загрязненности продуктов питания, растительности, воды, почвы.

В настоящее время изготавливают и применяют ОИСН из радионуклидов ^{137}Cs и $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ с номинальными значениями удельной активности радионуклидов от $1\cdot 10^3$ до $1\cdot 10^5$ Бк/кг (от $2,7\cdot 10^{-8}$ до $2,7\cdot 10^{-6}$ Ки/кг).

Методика приготовления ОИСН на основе образцовых растворов радионуклидов одновременно является и методикой аттестации этих источников в качестве образцовых мер удельной активности радионуклидов. Задача заключается во внесении точной массы образцового раствора данного нуклида в сыпучий инертный материал без его потерь и получении однородной смеси материала и радионуклида.

Сыпучие материалы должны быть предварительно тщательно промыты (за исключением опилок) проточной водой, высушены до нормальной влажности и подготовлены в виде порций с необходимой точно известной массой. Экспериментально на неактивном материале должна быть подобрана масса воды для полного смачивания материала, но без какого-либо ее излишка, при этом реакция водной вытяжки материала-носителя должна быть нейтральной.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Определение фактической влажности материала.

Для определения влажности материалов берут три навески массой по 5 г каждая, взвешенных с погрешностью 0,0001 помещают их во взвешенные бюксы и высушивают в сушильном шкафу при температуре 105°C . Первое взвешивание делают через 1 час. Бюксы с материалом, предварительно закрытые крышками, переносят в эксикатор и охлаждают их до комнатной температуры. Охлажденные стаканчики взвешивают и снова ставят в шкаф и дальше повторяют процедуру до достижения постоянной массы с погрешностью не более 0,004 г.

Фактическую влажность в процентах определяют по формуле:

$$W_{\text{ф}} = (1 - Z_2/Z_1) \times 100$$

где Z_1 - масса материала до высушивания;

Z_2 - масса материала после высушивания.

За результат принимается среднее арифметическое результатов, полученных для каждого стаканчика.

Определение поглощающей способности

После определения влажности берут три навески, равномерно распределяя материал на дне воронок, закрытых снизу пробками и закрепленных на штативах, заливают образцы дистиллированной водой. Через 10 минут пробки вынимают и, после того как вода стечет (2-3 мин), образцы переворачивают на другую сторону, чтобы дать возможность не связанной воде стечь на протяжении 10 минут. Потом образцы переносят в предварительно высушенные и взвешенные стаканчики, вес каждого не должен превышать 50 г и после взвешивания находят массу поглощенной воды каждым образцом.

$$K = (n \times 100) / m (100 - W_{\text{ф}})$$

где n - масса поглощенной воды образцом, г;
 m - масса образца, г;
 W_f - фактическая влажность, материала %.
 K - поглощающая способность материала, г/г

За результат принимают среднее арифметическое результатов, полученных для трех образцов.

Определение реакции водной вытяжки

От общей пробы отбирают образец массой в 10 г, кладут в фарфоровую чашку, заливают 200-250 мл дистиллированной водой и кипятят на протяжении 15 мин. Образец отжимают, воду фильтруют, выпаривают до объема 100 мл и охлаждают. Определяют pH водной вытяжки.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение эталонным (образцовым) радионуклидным источникам специального назначения.
2. Какие радионуклиды и материалы-носители используют для приготовления ОИСН?
3. Опишите методику приготовления ОИСН.
4. Перечислите преимущества ОИСН.
5. Обоснуйте необходимость определения водопоглощающей способности материалов-носителей ОИСН.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

Исследование естественной радиоактивности атмосферного воздуха

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: изучение закономерностей распада независимых и генетически связанных радионуклидов; исследование радиоактивности естественных аэрозолей свинца-214 и висмута-214.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Естественная радиоактивность атмосферного воздуха.

В атмосферном воздухе содержится естественные радионуклиды космогенного и земного происхождения. Космогенные радионуклиды (^3_1H , ^7_4Be , $^{14}_6\text{C}$ и др.) дают незначительный вклад в естественную радиоактивность воздуха. В основном естественная радиоактивность воздуха обусловлена радиоактивными изотопами радона-220, 219, 222, поступающими в атмосферу из верхних слоев земной поверхности. Изотопы радона являются членами соответствующих радиоактивных семейств $^{235}_{92}\text{U}$, $^{238}_{92}\text{U}$, и $^{232}_{90}\text{Th}$. При этом наибольший интерес представляет ^{222}Rn , поскольку период полураспада ^{220}Rn равен всего 54,5 с, а ^{219}Rn – 3,9 с, в то время как период полураспада ^{222}Rn составляет 3,82 суток. К тому же распространенность в земной коре $^{238}_{92}\text{U}$, продуктам распада которого является ^{222}Rn (см. таблицу 1) значительно больше, чем у $^{235}_{92}\text{U}$ и $^{232}_{90}\text{Th}$. Содержание ^{220}Rn в атмосферном воздухе в 10-100 раз меньше, чем ^{222}Rn . Доля ^{219}Rn в воздухе еще меньше.

Ряд урана-радия

Таблица 1

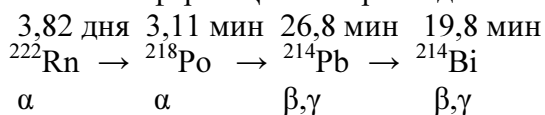
Изотоп	Вид распада	Период полураспада
Уран (92) – 238	Альфа	4,5·10 ⁹ лет
Торий (90) – 234	Бета	24 суток
Протактиний (91) – 234	Бета	1,17 мин
Уран (92) – 234	Альфа	245 000 лет
Торий (90) – 230	Альфа	8 000 лет
Радий (88) – 226	Альфа	1 620 лет
Радон (86) – 222	Альфа	3,825 суток
Полоний (84) – 218	Альфа	3 мин
Свинец (82) – 214	Бета	26,8 мин
Висмут (83) – 214	Бета	19,7 мин
Полоний (84) – 214	Альфа	0,000 16 с
Свинец (82) – 212	Бета	22,3 лет
Висмут (83) – 212	Бета	5 суток
Полоний (84) – 212	Альфа	138 суток
Свинец (82) – 208		Стабильный

Радон, тяжелый инертный газ, образуется в результате распада радия (см. табл. 1), который присутствует в почве и строительных материалах. Радон диффундирует из почвы и строительных материалов, чему способствует его относительно большой период полураспада. На содержание радона в наружном воздухе и внутри помещения влияют многие факторы, поэтому его концентрация подвержена очень большим вариациям. Концентрация радона внутри зданий в 2,5-200 раз выше, чем вне их.

Находящийся в воздухе радон распадается, образуя короткоживущие дочерние продукты от полония-218 до полония-214. За несколько часов радон приходит в состояние векового равновесия со своими короткоживущими дочерними продуктами. Дочерние атомы, не являясь газами, при столкновении с мелкими пылинками (аэрозолями) прилипают к ним. Эти радиоактивные пылинки и радон создают практически всю естественную радиоактивность воздуха. Бета-активность воздуха обусловлена преимущественно генетическими связанными изотопами свинца-214 и висмута-214, альфа-активность – изотопами радона и полония.

²¹⁴Pb и ²¹⁴Bi в атмосфере

Изучению поведения изотопов ²¹⁴Pb и ²¹⁴Bi уделяется значительное внимание в ряде регионов земного шара. Они вносят основной вклад в естественную радиоактивность приземной атмосферы. Цепочка распадов этих изотопов имеет следующий вид:



В этой цепочке лишь ²²²Rn находится в газообразном состоянии, остальные радионуклиды связаны с аэрозольными частицами. Наибольший интерес по ряду причин представляют ²¹⁴Pb (RaB) и ²¹⁴Bi (RaC). Они играют определяющую роль в ионизации атмосферы, обусловленной излучением от радиоактивных изотопов. В значительной части опубликованных работ полагают, что ²²²Rn находится в атмосфере в равновесии с короткоживущими продуктами распада и, измеряя концентрацию одного из изотопов, что значительно проще, чем измерение самого ²²²Rn, можно рассчитать его концентрацию; однако, в некоторых случаях имеют место отклонения от равновесия между ²¹⁴Pb и ²¹⁴Bi и это обстоятельство необходимо учитывать при расчете концентрации ²²²Rn по ²¹⁴Pb или ²¹⁴Bi. Эти изотопы широко используются для исследования различных атмосферных

процессов и определения характеристик состояния атмосферы: определения происхождения атмосферных аэрозолей по отношению концентраций ^{214}Pb и ^{214}Bi , определения границ внутритропической зоны конвергенции, определения концентрации радикала $\text{HO}\cdot$ в атмосфере, оценке состава аэрозолей, определения скорости обмена газами между океаном и атмосферой и т.д.

Поведение этих изотопов носит региональный характер, т.е. метеопараметры и другие факторы могут оказывать существенное влияние на абсолютные концентрации, отношение концентраций, взаимодействие с аэрозольными частицами и т.д.

По данным UNSCEAR 2000, которые были получены в результате обобщения большого количества данных, концентрации этих изотопов изменяются от 0,02 до 100 Бк/м³. Многочисленными исследованиями установлено, что отношение активностей этих радионуклидов подвержено значительным колебаниям в зависимости от природы воздушной массы. В ряде измерений, проведенных на побережье океанов, обнаружен так называемый аномальный сдвиг равновесия между RaB и RaC , т.е. наблюдается превышение активности ^{214}Bi по отношению к ^{214}Pb . Эти результаты указывают на возможность использования отношения этих изотопов для характеристики воздушных масс и состава аэрозольных частиц. Отношение $^{214}\text{Pb}/^{214}\text{Bi} > 1$ характерно, в основном, для аэрозолей континентального происхождения, а $^{214}\text{Pb}/^{214}\text{Bi} < 1$ – морского.

В настоящее время при исследованиях поведения короткоживущих продуктов распада радона-222 в атмосфере полагается, что удаление этих изотопов происходит только за счет распада, а ролью сухих и влажных выпадений обычно пренебрегают. Процесс их нейтрализации в воздухе на 90% происходит на пылинках размером менее 5 мкм. Причем основная часть образующихся радиоизотопов сорбируется частицами, линейный размер которых 0,001-0,4 мкм.

Влияние метеопараметров на концентрацию ^{214}Pb и ^{214}Bi

Концентрация ^{222}Rn в приземном слое атмосферы в наибольшей степени зависит от двух параметров – скорости эксхалации ^{222}Rn и скорости вертикального турбулентного обмена. Теоретически эксхалация имеет обратную зависимость от давления. Практически же такой однозначной связи не существует. Объясняется это тем, что высокое и низкое давление связаны с определенным комплексом различных метеорологических элементов. При низком давлении обычно имеет место сильная конвекция, что приводит к уменьшению концентрации ^{222}Rn и продуктов его распада. Низкое давление часто сопровождается выпадением осадков, а это также уменьшает концентрацию радиоактивных веществ. С другой стороны, низкое давление приводит к увеличению эксхалации ^{222}Rn , т.е. к увеличению концентрации продуктов распада радона. При высоком давлении обычно имеет место сухая, спокойная, безветренная и ясная погода, что приводит к высыханию почвы и увеличению возможности эксхалации. Однако повышение атмосферного давления препятствует этому процессу. Все выше изложенное не позволяет установить однозначной связи между давлением и величиной концентрации ^{214}Pb и ^{214}Bi . С ростом температуры некоторые почвы интенсивно высыхают, при этом в их капиллярах улучшаются условия для эксхалации ^{222}Rn , а, следовательно, повышается концентрация продуктов распада в приземной атмосфере. В литературе нет единого мнения о влиянии температуры воздуха на концентрацию ^{214}Pb и ^{214}Bi .

Еще одним фактором, который может оказывать влияние на концентрации рассматриваемых радионуклидов, является относительная влажность. Здесь, так же как и с температурой, результаты не однозначны, но в большинстве работ наблюдалась прямая пропорциональная зависимость между концентрацией и влажностью. С увеличением влажности уменьшается вертикальный обмен воздушных масс, а это приводит к повышению концентрации ^{222}Rn у земной поверхности.

Последний метеопараметр, который может оказывать влияние на концентрацию, это ветер. Скорость ветра тесно связана с турбулентностью. Рост скорости ветра приводит к увеличению вертикального обмена, а, следовательно, к уменьшению содержания ^{222}Rn . Направление ветра может значительно изменять концентрацию. Воздушные массы, проходя районы с высоким содержанием ^{222}Rn , обогащаются им и приходят в исследуемый район с высоким содержанием ^{214}Pb и ^{214}Bi . Обычно воздушные потоки, которые приходят с моря, обеднены радиоактивными изотопами.

Закон радиоактивного распада

Число радиоактивных ядер одного типа в источнике уменьшается с течением времени по экспоненциальному закону:

$$N = N_0 \exp(-\lambda t), \quad (1)$$

где N – число ядер, не распавшихся к моменту времени t ; N_0 – первоначальное число радиоактивных ядер; λ – постоянная распада;

$$\lambda = \ln 2 / T_{1/2}, \quad (2)$$

где $T_{1/2}$ – период полураспада – время, за которое распадается половина первоначального числа радиоактивных ядер.

Периоды полураспада известных радионуклидов имеют значения, лежащие в очень широком диапазоне: от 10^{-12} с до $1,4 \cdot 10^{17}$ лет.

Число радиоактивных распадов, происходящих в источнике за единицу времени, называют его активностью. Активность источника

$$A = -dN/dt. \quad (3)$$

Подставляя в формулу (3) выражение для N из закона радиоактивного распада (1), получим:

$$A = - \frac{d}{dt} [N_0 \exp(-\lambda t)] = \lambda N_0 \exp(-\lambda t) = \lambda N. \quad (4)$$

Из последнего выражения следует, что активность источника, в котором содержатся радиоактивные ядра одного вида, уменьшаются во времени по экспоненциальному закону:

$$A = A_0 \exp(-\lambda t), \quad (4a)$$

где $A_0 = \lambda N_0$ – активность источника в начальный момент времени.

Если источник содержит различные генетические несвязанные радионуклиды, изменение его активности A во времени описывается формулой:

$$A = A_{01} \exp(-\lambda_1 t) + A_{02} \exp(-\lambda_2 t) + \dots A_{0n} \exp(-\lambda_n t). \quad (5)$$

Источник, в котором радиоактивные ядра двух типов связаны генетически (радиоактивные ядра типа II образуются из ядер типа I), имеет активность

$$A = \lambda_1 N_1 + \lambda_2 N_2, \quad (6)$$

где N_1 и λ_1 – число и постоянная распада материнских ядер типа I; N_2 и λ_2 – число постоянная распада дочерних ядер типа II.

Число материнских ядер типа I изменяется в источнике только вследствие их распада:

$$N_1 = N_{01} \exp(-\lambda_1 t). \quad (7)$$

Число радиоактивных ядер типа II

$$N_2 = N_{02} \exp(-\lambda_2 t) + \frac{\lambda_1 N_{01}}{\lambda_2 - \lambda_1} [\exp(-\lambda_1 t) - \exp(-\lambda_2 t)] \quad (8)$$

изменяется в результате их распада (первое слагаемое) и за счет их образования из материнских ядер типа I (второе слагаемое). Подставив последнее выражение для N_1 и N_2 в формулу (6), получим закон изменения во времени активности источника, в составе которого имеются генетически связанные радионуклиды двух типов:

$$A = \lambda_1 N_{01} \exp(-\lambda_1 t) + \lambda_2 N_{02} \exp(-\lambda_2 t) + \frac{\lambda_2 \lambda_1 N_{01}}{\lambda_2 - \lambda_1} [\exp(-\lambda_1 t) - \exp(-\lambda_2 t)], \quad (9)$$

или

$$A = A_{01}\exp(-\lambda_1 t) + A_{02}\exp(-\lambda_2 t) + \frac{\lambda_2 A_{01}}{\lambda_2 - \lambda_1} [\exp(-\lambda_1 t) - \exp(-\lambda_2 t)]. \quad (10)$$

Если материнские ядра распадаются заметно быстрее дочерних ($T_1 < T_2$ и $\lambda_1 > \lambda_2$), то по истечении времени $t \approx 4 - 5T_{1/2}$ (I) суммарная активность источника изменяется по закону распада дочерних ядер, так как за это время практически все ядра типа I распадаются. Если $\lambda_1 \ll \lambda_2$, ядра обоих типов существуют в источнике вместе и с течением времени между ними устанавливается соотношение $N_1/N_2 = \lambda_2/\lambda_1$, которое называется вековым равновесием. Активность генетически связанных радионуклидов двух типов, находящихся в вековом равновесии, одинакова: $\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2$.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В настоящей работе исследуется распад естественных генетически связанных радионуклидов $^{214}_{82}\text{Pb}$ и $^{214}_{83}\text{Bi}$, которые содержатся в атмосферном воздухе.

Радиоактивные аэрозоли концентрируются с помощью пылесоса, к входному отверстию которого прикреплен ватный фильтр. При прокачивании воздуха на фильтре частично оседают радон и продукты его распада. Бета-активность ватного фильтра обусловлена преимущественно радионуклидами свинца и висмута. Снижение бета-активности фильтра в первые 1,5-2,0 часа происходит в основном за счет распада генетически связанных свинца-214 и висмута-214, периоды полураспада которых равны соответственно 26,8 и 19,7 минут.

Бета-излучение от фильтра регистрируется с помощью радиометра БЕТА.

Проведение измерений и обработка результатов

1. Прикрепите к входному отверстию пылесоса с расходом воздуха 50 л/с ватный фильтр и включите пылесос на 10-15 минут.
2. За время работы пылесоса включите радиометр, выждав 2-3 минуты, проверьте правильность функционирования блока индикации. Убедившись в работоспособности прибора, измерьте (за 100 с) фоновое число импульсов N_{ϕ} от пустой кюветы в свинцовом домике.
3. Снимите ватный фильтр с пылесоса, перенесите его в кювету, отметьте по лабораторным часам T_0 ($t=0$) – момент нажатия кнопки ПУСК радиометра и измерьте число импульсов $N_{\Sigma 0}$, регистрируемых от фильтра вместе с фоном. Найдите число импульсов N_0 , регистрируемых от фильтра за 100 с: $N_0 = N_{\Sigma 0} - N_{\phi}$.
4. Через $t = 7 \dots 10$ мин после начала первого измерения снова измерьте число импульсов $N_{\Sigma 1}$ от фильтра вместе с фоном и найдите $N_1 = N_{\Sigma 1} - N_{\phi}$. Промежуток времени $t_1 = T_1 - T_0$ между началом первого и проводимого измерений определите с помощью лабораторных часов (T_1 – момент нажатия кнопки ПУСК при измерении).
5. В течение последующих 60-70 минут еще 5-6 раз измерьте число импульсов N от ватного фильтра.
6. На основании полученных данных постройте график зависимости $N = f(t)$ и определите по нему время $\tau_{1/2}$, за которое число импульсов, регистрируемых от ватного фильтра, уменьшается в двое по отношению к первоначальному: $N = N_0 / 2$.

Бета-активность фильтра прямо пропорциональна числу импульсов, регистрируемых от него радиометром, зафиксированное время $\tau_{1/2}$ – это время, в течение которого вдвое снижается бета-активность фильтра по отношению к ее начальному назначению A_0 . Учитывая это, определите из графика зависимости $\tau_{1/2} = f(A_{01}/A_0)$ (рис. 1) начальную активность A_{01}/A_0 свинца-214 в относительных единицах. Рассчитайте начальную активность A_{01}/A_0 висмута-214: $A_{02}/A_0 = 1 - A_{01}/A_0$.

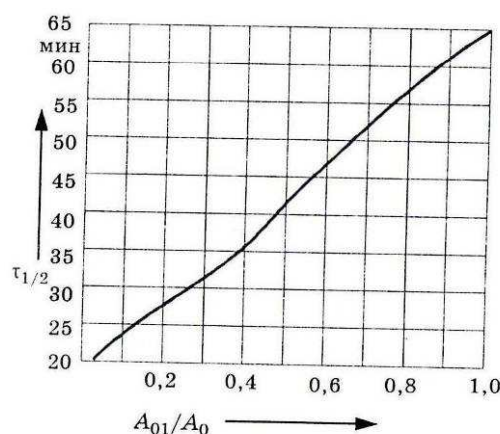


Рис.1

7. Рассчитайте теоретическую кривую снижения бета-активности ватного фильтра-источника, в котором содержится генетически связанные радионуклиды свинца-214 и висмута-214, по формуле:

$$A/A_0 = (A_{01}/A_0)\exp(-\lambda_1 t) + (A_{02}/A_0)\exp(-\lambda_2 t) + \frac{\lambda_2(A_{01}/A_0)}{\lambda_2 - \lambda_1}[\exp(-\lambda_1 t) - \exp(-\lambda_2 t)],$$

где A_{01}/A_0 – начальные значения активности свинца-214 и висмута-214 на исследуемом ватном фильтре; λ_1 и λ_2 – постоянные распада свинца-214 и висмута-214, соответственно.

8. Постройте на одном графике теоретическую $A/A_0 = f(t)$ и экспериментальную $N/N_0 = f(t)$ кривые снижения бета-активности фильтра, сравните их и проанализируйте, с учетом ошибки измерений, результаты приведенного сравнения.

Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу.

Таблица

№ изм	$N_{\text{ф,имп}}$	T , мин	t , мин	$N_{\Sigma, \text{имп}}$	$N_{\text{имп}}$	N/N_0	A/A_0

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Сформулируйте закон радиоактивного распада.
2. Что называют вековым равновесием?
3. Какие радионуклиды называют генетически связанными?
4. Какие радионуклиды создают естественную радиоактивность воздуха?
5. Находятся ли в вековом равновесии Pb-214 и Bi-214, осевшие на ватном фильтре, исследуемом в работе? Почему?
6. Почему содержание радона внутри зданий всегда выше, чем вне их?
7. Какие метеопараметры оказывают влияние на концентрацию Pb-214 и Bi-214 в атмосфере?

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Савастенко В.А. Практикум по ядерной физике и радиационной безопасности. – Мн.: Дизайн ПРО, 1998. – 192 с.
2. Marazzan G.M., Caprioli, Valli G., Vecchi R. Temporal variation of ^{214}Pb concentration in outdoor air of Milan and a comparison with ^{214}Bi . // Journal of Environmental Radioactivity. – 2003. – V. 65. – P. 77–90.

3. *Фетисов И.Н.* Статистика радиоактивного распада: метод. указания к лабораторной работе Я-64 по курсу общей физики. – М.: Из-во МГТУ им. Н. Баумана, 2009. – 20 с.
4. *Батраков Г.Ф., Семенов В.В.* Комплекс аппаратуры для измерений концентраций радиоактивных изотопов в приземной атмосфере // Системы контроля окружающей среды / Средства и информационные технологии. – Севастополь. – 2006. – С. 324 – 326.
5. *Ahmed A.A., Mohamed A., Ali A.E., et al.* Seasonal variations of aerosol residence time in the lower atmospheric boundary layer // J. of Environmental Radioactivity. – 2004. – V. 77. – P. 275 – 283.
8. *Papastefanou C.* Radioactive aerosols. – Amsterdam: Elsevier. – 2008. – 171 pp.

LECTURE 1 “NUCLEAR AND RADIOCHEMISTRY”

The discovery of radioactivity a century ago opened up a new field in science, that of the atomic nucleus, which culminated 40 years later in the discovery of fission, and its practical consequences in the form of nuclear weapons and nuclear power reactors. That remains still the focus of news media as it influences international politics and national energy policies. However, nuclear science has contributed much more to our daily life as it has penetrated into practically every important area; sometimes in a pioneering way sometimes by providing completely new solutions to old problems: from the history of the universe and our civilization to methods of food production and to our health from youth to old age. It is a fascinating, continuously developing field. Nuclear chemistry is an important part of this.

You can find some varied definitions in reference media.

McGraw-Hill Science and Technology Encyclopedia:

NC is an interdisciplinary field that, in general, encompasses the application of chemical techniques to the solution of problems in nuclear physics. The discoveries of the naturally occurring radioactive elements and of nuclear fission are classical examples of the work of nuclear chemists.

*Although chemical techniques that are employed in nuclear chemistry are essentially the same as those in **radiochemistry**, these fields may be distinguished on the basis of the aims of the investigation.*

Thus, a nuclear chemist utilizes chemical techniques as a tool for the study of nuclear reactions and properties, whereas a radiochemist utilizes the radioactive properties of certain substances as a tool for the study of chemical reactions and properties.

WordNet: **NC is the chemistry of radioactive substances. *Synonym:* radiochemistry.**

Wikipedia: **NC is the subfield of chemistry dealing with radioactivity, nuclear processes and nuclear properties.**

There are a lot of definitions and a lot of questions in reference media.

Nuclear Chemistry = Radiochemistry + Radiation chemistry?		
<i>Nuclear Chemistry</i>	To study nuclear reactions a combination of radiochemistry and radiation chemistry is used.	
	<i>Radiochemistry</i>	<i>Radiation chemistry</i>
Major areas are the chemical identification of radioactive nuclides and the determination of their nuclear properties, studies of nuclear structure and spectroscopy and of the probability and mechanisms of various nuclear reactions (<i>McGraw-Hill Science and Technology Encyclopedia</i>).	The chemistry of radioactive materials (<i>American Heritage Dictionary</i>). A subject which embraces all applications of radioactive isotopes to chemistry. It is not precisely defined and is closely linked to nuclear chemistry (<i>McGraw-Hill Science and Technology Encyclopedia</i>).	A subdivision of nuclear chemistry which is the study of the chemical effects of radiation on matter (<i>Wikipedia</i>). The study of chemical changes resulting from the absorption of high-energy ionizing radiation (<i>McGraw-Hill Science and Technology Encyclopedia</i>).

Properties, composition and structure of radioactive elements like radon, radium and actinides, are studied under the subject of **Nuclear Chemistry**. It also deals with the chemical view on the equipment (such as nuclear reactors) which is designed to perform nuclear processes. This includes the [corrosion](#) of surfaces and the behavior under conditions of both normal and abnormal operation (such as during an accident). An important area is the behavior of objects and materials after being placed into a [waste](#) store or otherwise disposed of.

It is the study of the chemical effects resulting from the absorption of radiation within living animals, plants, and other materials (the radiation chemistry, RC). RC controls much of radiation biology as radiation has an effect on living things at the molecular scale, to explain it another way the radiation alters the biochemicals within an organism, the alteration of the biomolecules then changes the chemistry which occurs within the organism, this change in [biochemistry](#) then can lead to a biological outcome. As a result nuclear chemistry greatly assists the understanding of medical treatments (such as [cancer](#) radiotherapy) and has enabled these treatments to improve.

NC also includes the study of the production and use of radioactive sources for a range of processes. These include radiotherapy in medical applications; the use of [radioactive tracers](#) within [industry](#), [science](#) and the [environment](#); and the use of radiation to modify materials such as [polymers](#).

It is the study and use of nuclear processes in *non-radioactive* areas of human activity. For instance, nuclear magnetic resonance (NMR) spectroscopy is commonly used in synthetic [organic chemistry](#) and [physical chemistry](#) and for structural analysis in macromolecular chemistry.

Marie Curie was the founder of the field of nuclear chemistry. She was fascinated by Antoine-Henri Becquerel's discovery. [Henri Becquerel](#) (see Vignette 1.1.) was one of the many scientists who began to work on ionizing radiation after the discovery of [X-rays](#) by [Wilhelm Röntgen](#).

Becquerel (working in France) investigated the relationship between [phosphorescence](#) and the blackening of [photographic plates](#). He discovered that, with no external source of energy, the uranium generated rays which could blacken (or *fog*) the photographic plate. Later the process of these rays producing Marie Curie called radioactivity.

[Marie Curie](#) (working in Paris) and her husband [Pierre Curie](#) isolated two new radioactive elements from uranium ore. They used [radiometric](#) methods to identify which stream the radioactivity was in after each chemical separation.

They separated the uranium ore into each of the different chemical elements that were known at the time, and measured the radioactivity of each fraction. They then attempted to separate these radioactive fractions further, to isolate a smaller fraction with a higher specific activity (radioactivity divided by mass). In this way, they isolated [polonium](#) and [radium](#). It was noticed in about 1901 that high doses of radiation could cause an injury in humans. It led to the investigations of the biological properties of radiation, which in time resulted in the development of medical treatments.

[Ernest Rutherford](#), working in Canada and England, showed that radioactivity decay can be described by a simple equation (a linear first degree derivative equation, now called [first order kinetics](#)), implying that a given radioactive substance has a characteristic "[half life](#)" (the time taken for the amount of radioactivity present in a source to diminish by half). He also coined the terms [alpha](#), [beta](#) and [gamma rays](#), he converted [nitrogen](#) into [oxygen](#), and most importantly he supervised the students who did the [Geiger-Marsden experiment](#) (gold leaf experiment) which showed that the '[plum pudding model](#)' of the [atom](#) was wrong. In the plum pudding model, proposed by [J.J. Thomson](#) in 1904, the atom is composed of electrons surrounded by a 'cloud' of positive charge to balance the electrons' negative charge. To Rutherford, the gold foil experiment implied that the positive charge was confined to a very small nucleus leading first to the [Rutherford model](#), and eventually to the [Bohr model](#) of the atom, where the positive nucleus is surrounded by the negative electrons.

In 1934 [Marie Curie](#)'s daughter ([Irène Joliot-Curie](#)) and her husband were the first to create [artificial radioactivity](#): they bombarded [boron](#) with alpha particles to make the neutron-poor isotope [nitrogen-13](#); this isotope emitted [positrons](#). In addition, they bombarded [aluminium](#) and [magnesium](#) with [neutrons](#) to make new radioisotopes.

In 1896, while investigating [phosphorescence](#) in [uranium](#) salts, Becquerel **accidentally** discovered [radioactivity](#). Investigating the work of [Wilhelm Conrad Röntgen](#), Becquerel wrapped a fluorescent substance, potassium uranyl sulfate, in [photographic plates](#) and black material in preparation for an experiment requiring bright sunlight.

However, prior to actually performing the experiment, Becquerel found that the photographic plates were already exposed, showing the image of the substance. This discovery led Becquerel to investigate the spontaneous emission of [nuclear radiation](#). In 1903, he shared the [Nobel Prize in Physics](#) with [Pierre](#) and [Marie Curie](#) (his doctoral student) "in recognition of the extraordinary services he has rendered by his discovery of spontaneous radioactivity".

[Radiochemistry](#) is the chemistry of radioactive materials, where radioactive [isotopes](#) of elements are used to study the properties and [chemical reactions](#) of non-radioactive isotopes (often within radiochemistry the absence of radioactivity leads to a substance being described as being *inactive* as the isotopes are *stable*).

[Radiation chemistry](#) is very different from [radiochemistry](#) as no radioactivity needs to be present in the material which is being chemically changed by the radiation. *Radiation chemistry* is the study of chemical changes resulting from the absorption of high-energy ionizing radiation, including alpha particles, electrons, gamma rays, fission fragments, protons, deuterons, helium nuclei, etc. In absorbing materials of low and intermediate atomic weight such as aqueous systems and most biological systems, such radiation deposits energy in a largely indiscriminate manner, leaving behind a complex mixture of short-lived ions, free radicals, and electronically excited molecules. Radiation-induced chemical changes result from reactions with these intermediates.

Study of nuclear reactions

A combination of radiochemistry and radiation chemistry is used to study nuclear reactions such as [fission](#) and [fusion](#). Some early evidence for nuclear fission was the formation of a short-lived radioisotope of [barium](#) which was isolated from [neutron](#) irradiated [uranium](#) (^{139}Ba , with a half-life of 83 minutes and ^{140}Ba , with a half-life of 12.8 days, are major fission products of uranium). At the time, it was thought that this was a new radium isotope, as it was then standard radiochemical practice to use a barium sulphate carrier precipitate to assist in the isolation of [radium](#). More recently, a combination of radiochemical methods and nuclear physics has been used to try to make new 'super heavy' elements; it is thought that islands of relative stability exist where the nuclides have half-lives of years, thus enabling weighable amounts of the new elements to be isolated. For more details of the original discovery of nuclear fission see the works of [Otto Hahn](#).

The nuclear fuel cycle

The chemistry associated with any part of the [nuclear fuel cycle](#), including [nuclear reprocessing](#). The fuel cycle includes all the operations involved in producing fuel, from mining, ore processing and enrichment to fuel production (*Front end of the cycle*). It also includes the 'in-pile' behaviour (use of the fuel in a reactor) before the *back end* of the cycle. The *back end* includes the management of the used nuclear fuel in either a [cooling pond](#) or dry storage, before it is disposed of into an underground waste store or [reprocessed](#).

The nuclear chemistry associated with the nuclear fuel cycle can be divided into two main areas; one area is concerned with operation under the intended conditions while the other area is concerned with maloperation conditions where some alteration from the normal operating conditions has occurred or (*more rarely*) an accident is occurring.

Absorption of fission products on surfaces

Another important area of nuclear chemistry is the study of how fission products interact with surfaces; this is thought to control the rate of release and migration of fission products both from waste containers under normal conditions and from power reactors under accident conditions.

For example, the Hanford Reservation in eastern Washington State is the site of one of the largest and most costly remediation efforts in the U.S. Years of plutonium production has generated 53 million gallons of high-level nuclear waste, which is now stored in 177 underground tanks. The waste consists of three distinct fractions, supernate, saltcake, and sludge. The supernate is an aqueous solution of sodium nitrate, nitrite, and hydroxide, and various organic compounds including citrate, gluconate, formate, oxalate, EDTA; in addition, appreciable quantities of ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{127}I , ^{237}Np and ^{99}Tc are present in the supernate.

Technetium is a long-lived (^{99}Tc : $2.13 \cdot 10^5$ year half-life) fission product found in nuclear waste and is one of the important isotopes of environmental concern. It is interesting to note that the $^{99}\text{TcO}_4^-$ anion can react with steel surfaces to form a [corrosion](#) resistant layer. In this way, these metaloxo anions act as [anodic corrosion inhibitors](#). The formation of $^{99}\text{TcO}_2$ on steel surfaces is one effect which will retard the release of ^{99}Tc from nuclear waste drums and nuclear equipment which has been lost before decontamination (e.g. [submarine](#) reactors lost at sea). The radioactive nature of technetium makes this corrosion protection impractical in almost all situations. It has also been shown that $^{99}\text{TcO}_4^-$ anions react to form a layer on the surface of activated carbon ([charcoal](#)) or [aluminium](#). ^{99}Tc in nuclear waste may exist in chemical forms other than the $^{99}\text{TcO}_4^-$ anion; these other forms have different chemical properties.

Spinout areas

Some methods first developed within nuclear chemistry and physics have become so widely used within chemistry and other physical sciences that they may be best thought of as separate from *normal* nuclear chemistry. For example, the isotope effect is used so extensively to investigate chemical mechanisms and the use of cosmogenic isotopes and long-lived unstable isotopes in [geology](#) that it is best to consider much of isotopic chemistry as separate from nuclear chemistry.

Kinetics (use within mechanistic chemistry)

The mechanisms of chemical reactions can be investigated by observing how the kinetics of a reaction is changed by making an isotopic modification of a substrate, known as the [kinetic isotope effect](#). This is now a standard method in [organic chemistry](#). Briefly, replacing normal hydrogen ([protons](#)) by [deuterium](#) within a molecule causes the [molecular vibrational](#) frequency of X-H (for example C-H, N-H and O-H) bonds to decrease, which leads to a decrease in vibrational [zero-point energy](#). This can lead to a decrease in the reaction rate if the rate-determining step involves breaking a bond between hydrogen and another atom. Thus, if the reaction changes in rate when protons are replaced by deuteriums, it is reasonable to assume that the breaking of the bond to hydrogen is part of the step which determines the rate.

Uses within geology, biology and forensic science

[Cosmogenic isotopes](#) are formed by the interaction of [cosmic rays](#) with the nucleus of an atom. These can be used for dating purposes and for use as natural tracers. In addition, by careful measurement of some ratios of stable isotopes it is possible to obtain new insights into the origin of bullets, ages of ice samples, ages of rocks, and the diet of a person can be identified from a hair or other tissue sample.

Within living things, isotopic labels (both radioactive and nonradioactive) can be used to probe how the complex web of reactions which makes up the [metabolism](#) of an organism converts one substance to another. For instance a [green plant](#) uses light [energy](#) to convert [water](#) and [carbon dioxide](#) into glucose by [photosynthesis](#). If the oxygen in the water is labeled, then the label appears in the oxygen gas formed by the plant and not in the glucose formed in the [chloroplasts](#) within the plant cells.

Applications of nuclear and radiochemistry

The widespread use of isotopes is based on two fundamental properties exhibited by all radioactive substances. The first property is that the disintegration rate of an isotopic sample is directly proportional to the number of radioactive atoms in the sample. Thus, measurement of its disintegration rate serves to analyze a radioactive compound. With nearly all chemical elements (notable exceptions being nitrogen and oxygen, which have no suitable radioactive isotopes), an isotope may be incorporated in a chemical compound, and thereafter, masses of this compound may be measured with a high precision. The second property is that the disintegration rate is completely unaffected by the chemical form of the isotope, and conversely, the property of radioactivity does not affect the chemical properties of the isotope. By substituting or labeling a particular atom within a molecule, isotopes can be used to trace the fate of that atom during a chemical reaction.

Carbon-14 dating

In northwest Europe, particularly around the west coasts of Scotland, Ireland and France, there are many ancient stone tombs. These were at one time a mystery to historians, because their builders left no written records. The best guess was that sailors from the Mediterranean had arrived roughly 3000 years ago, bringing this method of tomb-building with them. This theory was overturned by archaeologists who found bits of burnt wood in the tombs. **Radiocarbon dating** showed that the wood was at least 5000 years old; stone tombs were an invention of the local people, not an import from a distant land.

Archaeologists use the half-lives of naturally occurring radioisotopes to establish the ages of **fossils** and other **ancient artifacts**. Carbon-14, with half-life of 5730 years, has been used most extensively. When cosmic rays in the upper atmosphere strike atoms, the atoms disintegrate into electrons, protons, neutrons and other particles. Sometimes a free neutron collides with a nitrogen atom and causes it to lose a proton. The radioactive product is carbon-14. Carbon-14 combines with oxygen, just as carbon-12 does, to form carbon dioxide.

Plants use carbon dioxide to make **carbon-containing compounds**. Animals eat plants containing these compounds. Thus, all living organisms contain carbon-12 and carbon-14. The carbon-14 slowly decays in the organism's tissues. It is continuously replaced, however, by more carbon-14. Therefore, while the organism is alive, its ratio of carbon-12 to carbon-14 is constant. After the organism dies, however, it does not incorporate any new carbon. The carbon-12 to carbon-14 ratio changes as the carbon-14 decays to nitrogen-14.

In the 1940s the American chemist Willard Libby developed a method using carbon-14 to determine the age of an artifact. He measured the ratio of carbon-14 to carbon-12 in wood and textile samples from parchments and mummies. Then, he compared this ratio with the carbon-14 to carbon-12 ratio in recently-dead samples of similar materials. Using the half-life of carbon-14, he was able to calculate the age of the artifacts. For example, an object that had once been living might now have a carbon-14 concentration of one-half its original value. This object must therefore be about 5730 years old (one half-life). This technique can be used to determine the ages of objects between 200 and 50 000 years old. The accuracy of this method is good. For example, the Dead Sea Scrolls were determined to be 1940 ± 70 years old. This compares well with the **historical record**. Libby was awarded the 1960 Nobel Prize in chemistry for his work.

Charcoal is often found on archaeological sites, particularly where there has been a fire. Charcoal is nearly pure carbon, so it is a good material to test.

When other, less pure, items are being tested, carbon must be extracted from the dead matter. Cellulose can be extracted from wood, and collagen from bone. Collagen is the rubbery protein which holds bones together.

Samples must be cleaned to remove any contamination. They are washed several times in baths of dilute acid and alkali. Next, they are reduced to pure carbon. If a gas sample is required, the carbon

is burned to produce carbon dioxide (CO₂). If a liquid is required, the carbon is combined with hydrogen to make benzene (C₆H₆).

There are several techniques to measure the carbon-14 in an object. The most traditional method involves burning a small sample of the object to convert all carbon to carbon dioxide. The carbon dioxide is trapped and frozen with liquid air. The carbon-14 present is determined by measuring the radioactivity of the carbon dioxide with a radiation counter.

A newer technique involves ionizing the sample and passing it through a **particle accelerator** (Fig. 6.1). The isotopes are separated by a magnetic field and counted directly by a detector.

Carbon-14 dating is a good example of how chemistry helps researchers in other areas. Before this technique was used, archaeologists had to use time-consuming and sometimes imprecise methods to date objects.

With carbon-14 dating they have been able to accurately determine the age of objects. This assists in dating significant events, such as the initial migration of people to this continent.

Rock of ages

In the eighteenth century, a Scottish geologist called James Hutton came to the conclusion that the processes that form rocks (particularly **sedimentary rocks** such as sandstone and limestone) must take millions of years. Gradually, most scientists agreed with him that, based on the evidence of the rocks, the Earth is millions of years old — it might even have existed for ever. This replaced older ideas that the Earth was only a few thousand years old, as suggested, for example, by literal readings of the Bible. But how could the age of rocks be worked out?

The answer came with the discovery of radioactivity. Most rocks contain small amounts of uranium, which gradually decays to form first radium and then lead. Young rocks contain more uranium, older rocks contain more lead. Arthur Holmes, working at Imperial College in London, came up with the result that the oldest rocks in the Earth are billions of years old. This technique now allows us to say that the Earth is about 4500 million years old.

The Turin Shroud

The shroud of Turin is an ancient artifact (Fig. 6.2). The first historical record of the shroud is dated to about 1353. At that time it was in the possession of a French knight who claimed that it was the original burial shroud of Christ.

The shroud carries a mysterious image of a crucified man, complete with what appear to be bloodstains. For many people, this is convincing proof of its authenticity. When it is periodically exhibited in Turin cathedral, it attracts many hundreds of thousands of visitors.

The Catholic church was reluctant to allow the shroud to be radiocarbon dated, because the large samples required would have seriously damaged it. In the 1980s, a new technique was developed called accelerator mass spectrometry (AMS). This uses much smaller samples, perhaps 5 milligrams instead of 5 grams. The church eventually gave permission for three laboratories to date the shroud. They all agreed that it dated from 1325 ± 33 ad.

This date is so close to the date of the first historical record of the shroud that it now seems certain it was made in medieval times. Scientific study has yet to establish how the image was made. There is no evidence of paint on the surface of the cloth and it is impossible to tell whether the image was made when the cloth was manufactured or added later.

Particle accelerators

Since the 1930s, physicists have used particle accelerators to probe the mysteries of the atom. In a particle accelerator, sub-atomic particles, usually electrons or protons, travel at close to the speed of light. A beam of these particles has enough energy to smash a nucleus into fragments (hence the name "atom smashers"). The relativity effect at such high energies results in the conversion of energy into matter. As a result, new particles are created. These particles leave a trail of bubbles in

a detection device called a bubble chamber. Electronic detectors may also be used in conjunction with a computer that records the event on a printout.

Accelerators use electric fields and electromagnetic guides to accelerate charged particles to very high speeds. The simplest accelerators use a steady electric field. The field is created by mounting a metal sphere on a long pipe and charging it to a very high voltage. This causes a beam of particles to move faster and faster down the length of the pipe and to strike a target. This design is capable of energies of up to 10 million electron volts (1×10^7 eV). The linear accelerator, or linac, later improved on this design. It uses an alternating electric field to reach energies of up to 5×10^{10} eV. A linac boosts an electron's speed to nearly the speed of light. Large magnets keep the electrons from veering off course. The two mile long Stanford Linear Accelerator in California is currently the largest linac in North America.

The cyclotron is another kind of accelerator. Protons enter the center of a spiral shaped vacuum chamber. They are accelerated at each turn of the spiral by an electrical jolt, while an electromagnet guides them. The largest cyclotron has reached an energy of 7.2×10^8 eV. Synchrotrons accelerate particles in an oval shaped pathway resembling a race track. A linac in one or more of the straight sections increases the particles' speed. Particles can also be sent in opposite directions to produce high-speed collisions. The synchrotron's unique design has made energies of 1×10^{12} eV possible.

Today's giant accelerators have opened the door to new research. They have revealed, for example, that protons and neutrons consist of even smaller particles called quarks. Quarks are thought to be held together by other particles called gluons. Accelerator research has had practical benefits as well. Particle beams are being used by medical researchers to destroy tumors and create radioactive tracers. These tracers can be used instead of exploratory surgery. Accelerator technology is also being applied in the development of superspeed trains.

Large Hadron Collider

The Large Hadron Collider (LHC) is the world's largest and highest-energy particle accelerator. It is expected that it will address some of the most fundamental questions of physics, advancing humanity's understanding of the deepest laws of nature.

The LHC lies in a tunnel 27 kilometres (17 mi) in circumference, as much as 175 metres (574 ft) beneath the Franco-Swiss border near Geneva, Switzerland. This synchrotron is designed to collide opposing particle beams of either protons at an energy of 7 teraelectronvolts (1.12 microjoules) per particle, or lead nuclei at an energy of 574 TeV (92.0 μ J) per nucleus. The term hadron refers to particles composed of quarks.

The Large Hadron Collider was built by the European Organization for Nuclear Research (CERN) with the intention of testing various predictions of high-energy physics, including the existence of the hypothesized Higgs boson and of the large family of new particles predicted by supersymmetry. It is funded by and built in collaboration with over 10,000 scientists and engineers from over 100 countries as well as hundreds of universities and laboratories.

On September, 10, 2008 the proton beams were successfully circulated in the main ring of the LHC for the first time but 9 days later operations were halted due to a serious fault. On November, 20, 2009 they were successfully circulated again, with the first proton-proton collisions being recorded 3 days later at the injection energy of 450 GeV per beam. After the 2009 winter shutdown, the LHC was restarted and the beam was ramped up to 3.5 TeV per beam, half its designed energy. On March, 30, 2010 the first planned collisions took place between two 3.5 TeV beams, which set a new world record for the highest-energy man-made particle collisions.

The path of the protons (and ions) begins at linear accelerators (marked **p** and **Pb**, respectively) (Fig. 1.1). They continue their way in the booster (the small unmarked circle), in the Proton Synchrotron (**PS**), in the Super Proton Synchrotron (**SPS**) and finally they get into the 27-km-long LHC tunnel. In the LHC there are 4 large experiments marked with yellow dots and text.

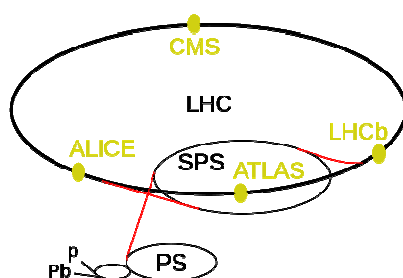


Figure 1.1 - The LHC experiments and the preaccelerators

Radioisotopes in research and medicine

Although radiation can be harmful and should be handled with care, it can be used safely and is important in many scientific procedures.

Neutron activation analysis is used to detect trace amounts of elements in samples. In this technique, a sample is bombarded with neutrons from a radioactive source. This causes the atoms in the sample to become radioactive. The half-life and type of radiation emitted by the radioisotopes is detected and processed by a computer. Since this information is characteristic for each element, scientists can tell what radioisotopes are produced and what elements were originally present in the sample. This is one of the most sensitive techniques for detecting trace amounts of elements. It is capable of measuring 10^{-9} g of an element in a sample. Neutron activation analysis is used by museums to detect art forgeries and by crime laboratories to analyze gunpowder residues.

Radioisotopes called tracers are used by chemists and biochemists to study chemical reactions and molecular structures. One of the reactants, labeled with a radioisotope, is added to the reaction mixture. After the reaction is over, the radiation of the product is measured to determine the uptake of the tracer. By comparing this amount with the amount originally added, scientists can learn much about the reaction mechanism. Reactions with many steps can be studied using this method.

Agricultural researchers use radioisotopes to test the effects of herbicides, pesticides, and fertilizers. The tracer is introduced into the substance being tested to make it radioactive. Next, the plants are treated with the radioactive substance. Then, the radioactivity of the plants is measured to determine the location of the substance. Often the tracer is also monitored in animals that consume the plants, in water, and in soil. This information helps scientists determine the effects of using the substance.

Radioisotopes are used to diagnose some diseases. Iodine-131 is used to detect thyroid problems. The thyroid gland extracts iodide ions from the bloodstream and uses them to make thyroxine. To diagnose thyroid disease, the patient is given a small amount of iodine-131 in a liquid. After about two hours, the amount of iodide uptake is measured by scanning the patient's throat with a radiation detector. In a similar way, technetium-99m is used to detect brain tumors, and phosphorus-32 is used to detect skin cancer.

Radiation is used to treat some cancers. This group of diseases is characterized by rapidly dividing abnormal cells. These cells are more sensitive to radiation than are normal cells. The cancerous area can be treated with radiation to kill the cancer cells. Some normal cells are also killed, however, and cancer cells at the center of the tumor may be radiation resistant. Therefore, the benefits of killing the cancer cells and the risks to the patient must be evaluated.

Radioactive pharmaceuticals containing radioisotopes of gold, iodine, or phosphorus are sometimes given in radiation therapy. A larger dose of iodine-131 than that given to detect thyroid disease can be given to treat the disease. The radioactive iodine collects in the thyroid and emits beta and gamma rays to provide therapy. Since the radioisotope is not sealed, the patient's excretions are radioactive and must be specially handled.

LECTURE 2 “DETECTORS”

Radioactivity is invisible, has no smell, makes no sound - in fact it cannot be detected by any of our senses. However, because radioactivity affects the atoms that it passes, we can easily monitor it using a variety of detectors: Geiger-Mueller tube, Scintillation detectors, Silicon and Germanium detectors and other systems.

The early pioneers equipped only with crudely constructed, large scale machines, their human senses and classical theory were seeking to see into the interiors of atoms. Were it not for the spinthariscopes and cloud chambers of their time, atomic theory could never have advanced as rapidly as it did.

Gas-filled detectors

Gas-filled detector systems collect and record the electrons freed from gaseous atoms and molecules by the interaction of radiation with these atoms and molecules. The systems have been classified into the primary categories of ionization chambers, proportional counters, and Geiger-Mueller (G-M) counters. The detectors have a variety of designs, but essentially consist of a chamber, which serves as the cathode, and a center wire, which serves as the anode. The electrical field is characterized by chamber shape and radius, the wire radius, and the applied voltage. The chamber is filled with a gas and a potential is applied between the two electrodes. The configuration of the system is shown in Fig. 2.1. Ionized electrons in the gas are collected onto the anode.

Figure 2.2 shows the response of the system in terms of the number of electrons or ions produced in the gas when the applied voltage is increased. The curves show six regions, each of which has different properties. The higher and lower curves pertain to particles that deposit more and less energy, respectively, in the detector.

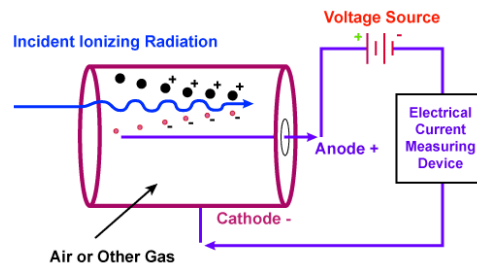


Figure 2.1 - Configuration of a gas-flow proportional counter

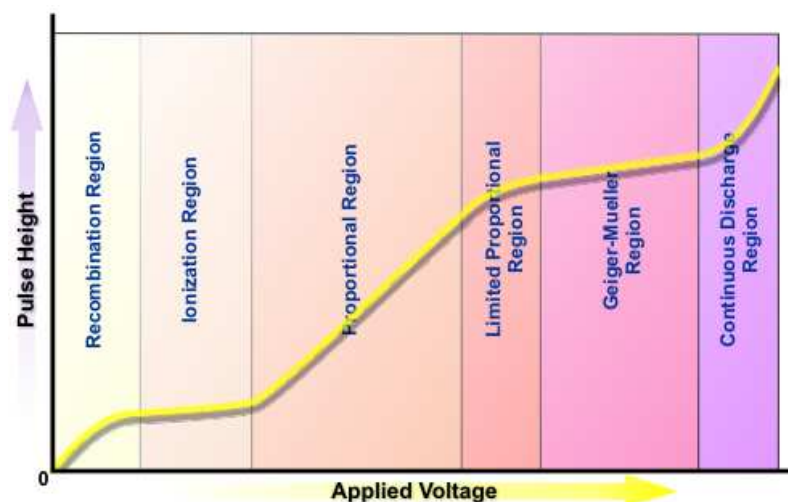


Figure 2.2 – Region Curve for Gas Filled Detectors

In Region 1, many electrons and ions produced in the gas recombine because the voltage applied between cathode and anode is not large enough to collect all electrons. This region is not useful for counting radiation.

Region 2 is the saturation region. The potential difference is sufficient to collect all freed electrons. The resulting very weak current or pulse over brief periods is measured with extremely sensitive electrometer devices. A detector working in the saturation region is called an ionization chamber. Its output is proportional to the deposited radiation energy. Internal or thin-window ionization chambers are used as alpha-particle and fission-fragment detectors. External samples are measured for beta particles and gamma rays with ionization detectors; the latter are larger and contain counting gas at elevated pressure.

In Region 3, the proportional region, the applied voltage is strong enough that the electrons free by the initial radiation are accelerated, so that they, in turn, ionize additional atoms or molecules (secondary ionization) to freed more electrons.

This electron multiplication generates an avalanche toward the anode for each primary electron that was freed. The applied voltage domain is called the proportional region because each avalanche is characterized by the same electron multiplication at a given applied voltage. The output signal is directly proportional to the deposited energy, although each pulse is many times larger than in the ionization region. As the applied voltage is increased, the amplification increases uniformly for the entire range of deposited energy.

A problem in proportional counters operating at these higher voltages is production of a secondary avalanche due to molecular excitation, which interferes with the detection of subsequent pulses. To prevent excitation that causes this secondary avalanche, a quenching agent is added to the fill gas. The multiplication factor in this region is about 10^4 , which requires the measurement device to be far less sensitive than that for the ionization chambers. The proportional counter system has a preamplifier and a linear amplifier.

In Region 4, the proportionality of the output signal to the deposited energy at a given applied voltage no longer applies. Amplification of the greater deposited energy reaches its limit while that for the lesser deposited energy continues to increase. This region of limited proportionality and is usually avoided as a detection region.

The third useful region for detection of radiation is Region 5, the G-M region; this applied voltage is high enough that any deposited energy produces sufficient secondary electrons to discharge the entire counting gas. The linear amplifier is no longer needed. One no longer can distinguish between a small and a large deposition of energy. This discharge must be quenched so that the next pulse can be detected. Either the applied voltage must be removed briefly or quenching gases must be added.

In Region 6, an electrical discharge occurs between the electrodes. This voltage region has been used for some purposes but generally is avoided because the discharge can disable the detector.

Although gas-filled detectors are operated in the second, third and fifth voltage regions, it would be a mistake to assume that a particular detector can be used in all of them simply by changing the applied voltage.

Detector components are designed to be used in a single voltage domain.

The operating voltage then is selected at a plateau region on the basis of the curve of count rate vs. applied voltage.

In proportional and G-M detectors, this curve begins with a zero count rate at a relatively low voltage, reaches a plateau at intermediate voltage, and then increases when a continuous electrical discharge occurs. The initial increasing count rate represents the increasing number of pulses that are sufficiently amplified to pass the lower discriminator. At the plateau, all pulses are detected.

In a proportional counter, a first plateau is reached for the much larger alpha-particle pulses, and a second plateau at higher applied voltages is then reached for beta particles as well as alpha particles. Detectors are operated near the middle of the plateau to avoid erroneous data due to small

fluctuations in applied voltage. In proportional counters, the applied voltage is reduced to measure alpha particles but not beta particles.

Scintillation detection systems

Certain materials that become excited by the absorption of radiation are able to de-excite through emission of light. These scintillators—or phosphors—enable radiation detection through the observation of flashes of luminescence. The amount of light observed is proportional to the amount of radiation energy absorbed by the medium. A scintillation detector utilizes a phosphor (to absorb radiation and produce light), optically coupled to a photomultiplier tube (PMT), which detects the light and converts it into an electrical signal (Fig. 2.3). A computer then collects the signal produced by the PMT.

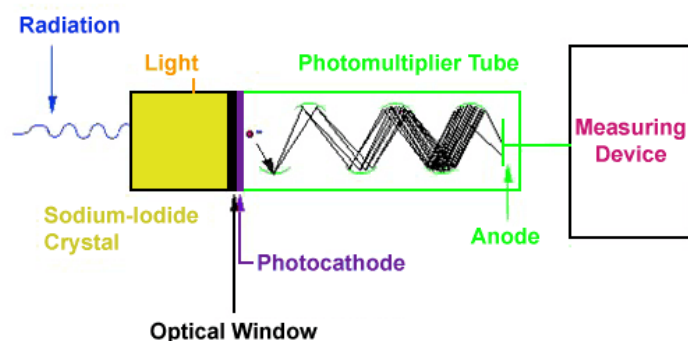


Figure 2.3 – Scintillation Detector

The phosphor can be an inorganic crystal or an organic solid, liquid, or gas. Materials function well as a scintillator for radiation if they efficiently absorb and convert radiated energy to light, exhibit good transparency for the light to escape the material, and emit a frequency of light that matches the photon-detection system. Some common scintillation detectors are given in Table 2.1.

Table 2.1 - Some common scintillators

Scintillation material	Physical state	Radiation primarily detected	Conversion efficiency (%)
Anthracene	Solid	Beta	4.5
Nal(Tl)	Solid	Gamma	10
Liquid Scintillators	Liquid	Alpha, beta	2-4
Plastic Scintillators	Solid	Alpha, beta, gamma	3.0

One effective medium in common use for gamma-ray measurements is thallium-activated sodium iodide [Nal(Tl)]. The relatively high-Z iodine atom provides a high attenuation coefficient for interacting with energetic gamma radiation.

It results in an appreciable fraction of counts in the full-energy peak, which is useful for spectral analysis. The crystal is sealed in an aluminium can because it is hygroscopic, with a light pipe at one end for coupling to the PMT. The inclusion of thallium in the Nal(Tl) detector provides energy levels that are somewhat lower than the conduction band. According to the band theory of crystalline solids, the valence electrons commonly occupy the highest filled atomic electron band. Above this energy is a band gap, and higher still is the conduction band. Incoming radiation (if sufficiently energetic to surmount the band gap) can excite the valence electrons to the conduction band; from here the electrons drop back, de-exciting by the emission of light. The thallium impurity facilitates the de-excitation of electrons to the valence band. The benefit of a smaller energy gap is that the excited electron will shed its excess energy more quickly for more efficient detector

response. Second, the energy emitted will not be the same as that which caused the initial excitation; consequently, photon emission will not cause re-excitation (i.e. the detector is transparent to its radiation).

Some other scintillation materials, such as caesium iodide and bismuth germanate, have characteristics that are less favourable than NaI(Tl) for general use, but recommend them for some special measurements. For example, CsI and NaI(Tl) can be combined for coincidence or anticoincidence counting by distinguishing between output from the two detectors by their pulse shapes.

Silver-activated zinc sulphide [ZnS(Ag)] has been used since radioactivity was first measured to detect alpha particles. It is relatively insensitive to electrons and gamma rays because it is not transparent to its own radiation. Radiation interactions within the detector are not recorded; only its surface, where alpha particles interact, emits scintillations. The ZnS is doped with silver to shift its scintillations to a longer wavelength for better PMT response.

Organic scintillators function similarly to inorganic crystals. One major difference is that impurities are not necessary to produce energy levels for de-excitation because the selected organic substances quickly shed energy by passing through multiple vibrational states. Organic scintillators that have resonance structures, such as anthracene, are excellent scintillators. The effect is similar to doping; the de-excitation photon is rarely of the same energy as the absorbed radiation, so that the organic scintillator is transparent to its own emissions.

Organic scintillators have relatively low counting efficiency for gamma rays because of their low-Z carbon, oxygen, and hydrogen atoms. Any spectral analysis has to be based on Compton-edge energy measurements because of the low full-energy peak intensity. Solid organic scintillators can be useful for beta-particle detection because they can be exposed without a container. They can also be machined to large volume in many shapes.

In a liquid scintillation (LS) system, the sample is mixed with a cocktail that consists of an organic scintillator dissolved in an organic solvent. The cocktail and the usual aqueous sample form an emulsion. The radiation emitted by the intimately mixed radionuclide deposits its energy in the solvent, which transfers to the scintillator. The scintillations are then detected by the PMT. The LS counter is useful for detecting alpha particles and low energy beta particles from samples that are dispersed throughout the LS detector, whereas in other detectors the radiation would be absorbed in the sample.

Silicon and germanium spectrometers

Solid-state detectors—notably silicon for alpha particles and germanium for gamma rays—are particularly effective for spectral analysis. Spectral analysis is used both to identify the radiation by its characteristic energy peak and to determine its activity based on the count rate within this peak. Further advantages of restricting analysis to the narrow band of the characteristic energy peak are reducing interference from other radionuclides in the sample and from background radiation. Other materials, such as cadmium telluride and cadmium zinc telluride, have been developed for specific advantages such as inclusion of a high-Z material, but are not in routine use.

The detection systems for alpha-particle and gamma-ray spectrometers are distinctly different. For alpha particles, a thin silicon detector and a thin sample are placed in a small vacuum chamber to eliminate energy loss in air. No further shielding is needed because the chamber is a shield for ambient background alpha particles while other ambient radiation is not detected in the thin solid to any significant extent. For gamma rays, a large germanium detector and samples as large as necessary are placed in a radiation shield of lead or steel.

The spectrometer systems require highly stable power supplies and amplifiers to support analysis at high-energy resolution. The germanium detector has a cryostat for cooling during application. A Dewar flask that contains liquid nitrogen coolant is commonly used, but electromechanical cooling can be substituted. Various geometric arrangements enable the germanium detector to view the sample vertically or horizontally.

The detected radiation is displayed to show near-Gaussian peaks. The spectrometer is calibrated for energy by matching the channel at the midpoint of the peak to the known energy of gamma radiation emitted by a set of radioactivity sources. Typically, the channel width is set to approximately one-fourth of the detector peak resolution, but some compromise is needed because the resolution changes with energy. The energy resolution of a recorded set of many identical pulses is the extent to which individual values deviate from the expected single value. The counting efficiency of these detectors is calibrated with radionuclide standards or Monte Carlo simulation. Typically, the alpha-particle detector has the same efficiency for thin samples at all commonly encountered energies, while the gamma-ray detector efficiency has a maximum near 100 keV for samples of various dimensions. Commercially available spectrometer systems include a computer for operating the system, storing data, analyzing data, and providing information output. These functions are used to set counting times and periods, identify peaks by channel and energy, store and subtract background, calculate gross and net counts in multiple peak regions, calculate count rates, and convert count rates to disintegration rates on the basis of stored decay scheme data. Statistics software programs are available to estimate output data uncertainty.

LECTURE 3 “ACTINIDES AND TRANSACTINIDES CHEMISTRY”

The chemical elements are the building blocks of nature. One of the most important and most interesting questions for a chemist is the one about the position of the elements in the Periodic Table.

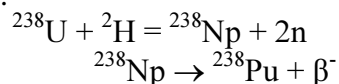
In total, 118 elements have been characterized as of March 2010, and new elements of higher atomic number are "discovered" from time to time, as new synthetic products of artificial nuclear reactions. As of February 2010, only the elements up to 112, copernicium, have been confirmed as discovered by IUPAC, while more or less reliable claims have been made for synthesis of elements 113-118. The heaviest element that is believed to have been synthesized to date is element 118, ununoctium, on October 2006, by the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions in Dubna, Russia.

The 22 heaviest chemical elements, the transuranium elements, are manmade. The story of their synthesis, their properties, their impact on chemistry and physics, and their importance to society is fascinating. This story is of particular importance to nuclear chemistry because most of our knowledge of these elements and their properties comes from the work of nuclear chemists, and such work continues to be a major area of nuclear chemical research.

The discovery of the elements

The actinide or actinoid (IUPAC nomenclature) series encompasses the 15 chemical elements with atomic numbers from 89 to 103, actinium to lawrencium. The actinide series derives its name from the group 3 element actinium; although actinoid (actinide) means "actinium-like" and therefore should exclude actinium, it is usually included in the series for the purpose of comparison. The actinides are usually considered to be f-block elements; they show much more variable valence than the lanthanides. Within actinides, there are two overlapping groups: transuranium elements, which follow uranium in the periodic table—and transplutonium elements, which follow plutonium. All actinides are radioactive and release energy upon radioactive decay; uranium and plutonium, the most abundant actinides on Earth, are used in nuclear reactors and nuclear weapons. After the discovery by Becquerel in 1896 that uranium salts blackened photographic plates due to radiations from the natural decay chains of uranium, Marie Curie and Pierre Curie (1898) began extensive studies of the new phenomenon that they dubbed "radioactivity." They were successful in isolating and identifying the first radioactive elements Po (84) and Ra (88) in pitchblende. They shared the Nobel Prize in Physics with Becquerel in 1903 for their studies of radioactivity. Marie Curie continued her investigations of radioactive species and isolated macro quantities of Ra to be used for medical purposes. She received the Nobel Prize in Chemistry in 1911 for the isolation of pure radium and the determination of its molecular weight. She is recognized as the founder of the sub-discipline of "radiochemistry," which can be defined as the study of radioactivity and radioactive elements; she could rightfully be acknowledged as the founder of nuclear medicine as well.

Shortly thereafter, the first transuranium element Np (93) was identified (1940) in experiments conducted to investigate the newly reported phenomenon of nuclear fission in neutron irradiations of U. The production and chemical identification of element Pu (94) in the form of ^{238}Pu produced in deuteron bombardments of uranium in the cyclotron at Berkeley followed in 1941, but it was not published until 1946 (Seaborg, 1946):



The discoveries were voluntarily kept secret because it was recognized that the highly fissionable ^{239}Pu produced at about the same time might have potential military uses. The artificial element Pm (61) was separated and positively identified (1947) among the fission products of uranium in 1945 during the World War II Plutonium Project at the Oak Ridge, Tennessee Laboratory. Although Tc, Pm, At, and Pu are often called "artificial" elements, all of them are found in nature in exceedingly small amounts, either as uranium fission or capture products or from natural decay chains. The very

long-lived ^{244}Pu was also reported in 1971 to exist in nature in minute quantities. Thus the distinction between "artificial" and "natural" elements is in itself somewhat artificial.

Humans have been fascinated ever since ancient times with trying to understand the composition of the terrestrial world around them and even the stars beyond their reach. In the 4th century B.C., Aristotle proposed that all matter could be described in terms of varying proportions of four "elements"—air, earth, fire, and water. Elements, including gold, silver, and tin, that are found relatively pure in nature were isolated and used over the period of the next several hundred years. The alchemists of medieval times isolated and discovered additional elements and used secret formulas and rituals in the attempt to find the "philosopher's stone" and attain their goal of transmuting lead into gold. The development of experimental science and the scientific method in the 18th century accelerated the pace of the discovery of new elements, but uranium, discovered in 1789 by Klaproth in pitchblende from Saxony, Germany, remained the heaviest known chemical element for 150 years.

During what might be called the "golden age of discovery" between 1940 and 1955, all the transuranium elements from Np through Md (101) were discovered. They were produced by either neutron or alpha bombardments of suitable targets and were identified with little controversy, probably because their half-lives were long enough to permit chemical separation and identification. Beginning with No (102), identification of new elements became even more difficult and controversial as the half-lives became shorter and the production rates even smaller. The first positive identifications of the elements beyond Md were based on physical techniques rather than on chemical techniques, and many controversies ensued. However, with the discovery of longer lived isotopes of No, Lr (103), and Rf (104), it was possible to confirm Seaborg's hypothesis (1945) that the actinide series ends with Lr and that the chemistry of Rf will be quite different from that of the actinides.

The transactinide elements are defined simply as those elements with atomic number greater than 103 (Lr), which completes the actinide series with the complete filling of the inner 5f shell. According to results of atomic relativistic calculations this transition series ends at element 112 with the filling of the 6d shell. The p shells are filled in elements 113 through 118, which are expected to be the heaviest members of the noble gas group. The 8s shell is expected to be filled in elements 119 and 120, making them homologs of groups 1 and 2. Based on relativistic calculations, element 121 should have an 8p electron in its ground-state configuration in contrast to the 7d electron expected by simple extrapolation from the elements in group 3 of the periodic table. A 7d electron would then be added in element 122, giving it the configuration $[118]8s^27d8p$, different from that expected from its homolog thorium, which has the configuration $[\text{Rn}]7s^26d^2$. The situation becomes even more complicated beyond element 122 because the energy spacing of the 7d, 6f, and 5g levels as well as those of the 8p, 9s, and 9p levels are so close that the chemical properties of these elements will be nearly impossible to characterize on the basis of currently known properties.

In the mid-1930s, the new breed of "nuclear" scientists, including both chemists and physicists, became intrigued with the possibility of actually synthesizing new "artificial" elements not found in nature. The discovery of "artificial" radioactivity by Joliot-Curies in 1934, the invention of the cyclotron by E. O. Lawrence in 1929, and the subsequent operation of larger cyclotrons at Berkeley facilitated production of artificial elements. The new developments rather quickly culminated in the realization of the ancient alchemists' dream of transmutation when the first "artificial" element technetium ($Z = 43$) was identified in 1937 in the products of deuteron bombardment of molybdenum in the cyclotron (1937). Then astatine (85) was identified in 1940 in cyclotron bombardments of Bi with He ions (1940).

Transactinide Elements and Controversy

Throughout the period from 1960 to 1977, controversies were associated with claims to priority of discovery and proposals for the naming of elements 104 and 105, the first of the transactinides, by

research groups working at Lawrence Berkeley Laboratory in the United States and the Joint Institutes for Nuclear Research (JINR) in Dubna, the USSR. Pending settlement of the competing claims to discovery and approval of names, the Commission on Nomenclature of Inorganic Chemistry (CMC) of the IUPAC mandated the use of three-letter "systematic names" based on 0=nil, 1=un, 2=bi, 3=tri, 4=quad, 5=pent, 6=hex, 7=sept, 8=oct, and 9=enn for elements with $Z > 100$. Thus, elements 104 and 105 officially became unnilquadium (unq) and unnilpentium (unp), although these names never found common usage among heavy element researchers. In the meantime, the names kurchatovium (Ku, 104) and nielsbohrium (Ns, 105) and rutherfordium (Rf, 104) and hahnium (Ha, 105) continued to be used by the Dubna and Berkeley groups, respectively. Among the reasons for the controversies over discovery of elements 104 and 105 are their short half-lives and small production rates that made it necessary to study and identify them "online" at the accelerators where they were produced on the basis of their decay properties rather than on "conventional" radioanalytical methods.

Mnemonics:

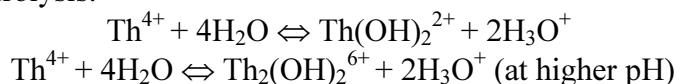
Although Theorists Prefer Unusual New Proofs, Able Chemists
 Ac Th Pa U Np Pu Am Cm
 Believe Careful Experiments Find More New Laws
 Bk Cf Es Fm Md No Lw

Chemical properties of actinides

All actinides are highly reactive with halogens and chalcogens; however, actinides react more easily than the lanthanides. Actinides, especially those with a small number of 5f-electrons, are prone to hybridization. This is explained by the similarity of the electron energies at the 5f, 7s and 6d shells. Most actinides exhibit a larger variety of valence states, and the most stable are +6 for uranium, +5 for protactinium and neptunium, +4 for thorium and plutonium and +3 for actinium and other actinides.

Chemically, **actinium** is similar to lanthanum, which is explained by their similar ionic radii and electronic structure. Like lanthanum, actinium has oxidation of +3, but it is less reactive and has more pronounced basic properties. Among other trivalent actinides Ac^{3+} is least acidic, i.e. has the weakest tendency to hydrolyze in aqueous solutions.

Thorium is rather active chemically. Owing to lack of electrons on 6d- and 4f-orbitals, the tetravalent thorium compounds are colorless. At $\text{pH} < 3$, the solutions of thorium salts are dominated by the cations $[\text{Th}(\text{H}_2\text{O})_8]^{4+}$. The Th^{4+} ion is relatively large, and depending on the coordination number can have a radius between 0.95 and 1.14 Å. As a result, thorium salts have a weak tendency to a hydrolysis:



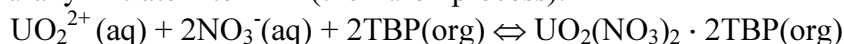
The distinctive ability of thorium salts is their high solubility, not only in water, but also in polar organic solvents.

Protactinium exhibits in two valence states; the +5 is stable, and the +4 state easily oxidizes to protactinium (V). Thus tetravalent protactinium in solutions is obtained by the action of strong reducing agents in a hydrogen atmosphere. Tetravalent protactinium is chemically similar to U (IV) and thorium. Fluorides, phosphates, hypophosphate, iodate and phenylarsonates of Pa (IV) are insoluble in water and dilute acids. Protactinium forms soluble carbonates. The hydrolytic properties of pentavalent protactinium are close to those of tantalum (V) and niobium (V). The complex chemical behavior of protactinium is a consequence of the start of the filling of the 5f shell in this element.

Uranium has a valence from 3 to 6, the last being most stable. In the hexavalent state, uranium is very similar to the sixth group elements. Many compounds of uranium (IV) and uranium (VI) are

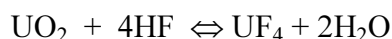
nonstoichiometric, i.e. have variable composition. For example, the actual chemical formula of uranium dioxide is UO_{2+x} , where x varies between -0.4 and 0.32 .

Uranium (VI) compounds are weak oxidants. Most of them contain the linear "uranyl" group, UO_2^{2+} . Between 4 to 6 ligands can be accommodated in an equatorial plane perpendicular to the uranyl group. The uranyl group acts as a hard acid and forms stronger complexes with oxygen-donor ligands than with nitrogen-donor ligands. Uranyl sulfate and carbonate complexes are especially strong and are used in extracting uranium from its ores. Of great practical importance are the complexes of the uranyl ions with nitrate that are soluble in organic liquids such as alcohols, ethers, ketones, and esters. One of the most important of these reactions is that involving the extraction of uranyl nitrate into TBP (the Purex process):

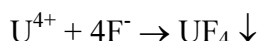


UF_6 ("hex") is the only readily available uranium compound that is volatile at room temperature. It is a colorless solid that is used in the uranium enrichment process. It sublimes at room temperature without melting. UF_6 is rapidly hydrolyzed by water and is a fluorinating agent. This latter property means that one must carefully choose the materials to contain UF_6 .

Uranium (IV) compounds exhibit reducing properties, e.g., they are easily oxidized by atmospheric oxygen. UF_4 ("green salt") is an intermediate in the production of U and UF_6 . It can be made by reacting UO_2 with excess HF as:



or, for laboratory use, by the reaction

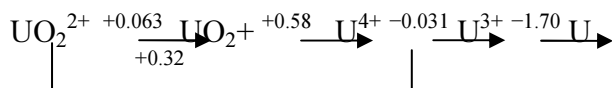


In aqueous solution, U (IV) hydrolyzes via the reaction:

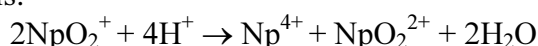


Uranium (III) is a very strong reducing agent. Owing to the presence of d-shell, uranium (as well as many other actinides) forms organometallic compounds, such as $\text{U}(\text{C}_5\text{H}_5)_3$ and $\text{U}(\text{C}_5\text{H}_5)_4$.

The formal reduction potential of uranium in aqueous solution (i.e., 1 M HClO_4) is

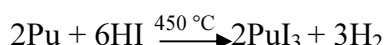
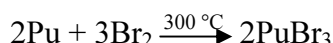


Neptunium has valence states from 3 to 7, which can be simultaneously observed in solutions. The most stable state in solution is +5, but the valence +4 is preferred in solid neptunium compounds. Disproportionation reaction is:



Neptunium metal is very reactive. Ions of neptunium are prone to hydrolysis and formation of coordination compounds.

Plutonium also exhibits the valence between 3 and 7, and thus is chemically similar to neptunium and uranium. It is highly reactive, and quickly forms an oxide film in air. Plutonium reacts with hydrogen even at temperatures as low as $25\text{--}50\text{ }^\circ\text{C}$; it also easily forms halides and intermetallic compounds:



Hydrolysis reactions of plutonium ions of different oxidation states are quite diverse. Plutonium (V) can enter polymerization reactions.

The largest chemical diversity among actinides is observed in **americium**, which can have valence between 2 and 6. Divalent americium is obtained only in dry compounds and non-aqueous solutions (acetonitrile). Oxidation states +3, +5 and +6 are typical for aqueous solutions, but also in the solid state. Tetravalent americium forms stable solid compounds (dioxide, fluoride and hydroxide) as well as complexes in aqueous solutions. It was reported that in alkaline solution

americium can be oxidized to the heptavalent state, but these data proved to be erroneous. The most stable valence of americium is 3 in the aqueous solutions and 3 or 4 in solid compounds.

Valence 3 is dominant in all subsequent elements up to **lawrencium** (maybe except for nobelium). Curium can be tetravalent in solids (fluoride, dioxide). Berkelium, along with a valence of +3, also shows the valence of +4, more stable than that of curium; the valence 4 is observed in solid fluoride and dioxide. The stability of Bk^{4+} in aqueous solution is close to that of Ce^{4+} . Only valence 3 was observed for californium, einsteinium and fermium. Bivalent state is proven for mendelevium and nobelium, and in nobelium it is more stable than the trivalent state. Lawrencium shows valence 3 both in solutions and solids.

Actinides in Nature

Thorium and uranium are the most abundant actinides in nature with the respective mass concentrations of $1.6 \times 10^{-3}\%$ and $4 \times 10^{-4}\%$. Uranium mostly occurs in the Earth's crust as a mixture of its oxides in the minerals uraninite, which is also called pitchblende because of its black color. There are several dozens of other uranium minerals such as carnotite ($\text{KUO}_2\text{VO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) and autunite ($\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$). The isotopic composition of natural uranium is ^{238}U (relative abundance 99.2742%), ^{235}U (0.7204%) and ^{234}U (0.0054%); of these ^{238}U has the largest half-life of 4.51×10^9 years. The worldwide production of uranium (Fig. 14.3) in 2009 amounted to 50,572 tonnes, of which 27.3% was mined in Kazakhstan. Other important uranium mining countries are Canada (20.1%), Australia (15.7%), Namibia (9.1%), Russia (7.0%), and Niger (6.4%). The most abundant thorium minerals are thorianite (ThO_2), thorite (ThSiO_4) and monazite ($(\text{Th}, \text{Ca}, \text{Ce})\text{PO}_4$). Most thorium minerals contain uranium and vice versa; and they all have significant fraction of lanthanides. Rich deposits of thorium minerals are located in the United States (440,000 tonnes), Australia and India (~300,000 tonnes each) and Canada (~100,000 tonnes).

Plutonium is clearly the most significant transuranium element in the environment. The plutonium present in the environment is due primarily to atmospheric testing of nuclear weapons, secondarily to the disintegration upon reentry of satellites equipped with ^{238}Pu power sources, and, lastly, to the processing of irradiated fuel and fuel fabrication in the nuclear power industry and the plutonium production program. During the period from 1950 to 1963, about 4.2 tons of plutonium (mostly a mixture of ^{239}Pu and ^{240}Pu) was injected into the atmosphere as a result of nuclear weapons testing. Because of the high temperatures involved, most of this plutonium was thought to be in the form of a refractory oxide. Most of this plutonium has been redeposited on Earth with concentrations being highest at the midlatitudes. Of the 350,000 Ci of ^{238}Pu and ^{239}Pu originally injected into the atmosphere, about 1000 Ci remained in 1989. Approximately $9.7 \cdot 10^6$ Ci of ^{241}Pu were also injected into the atmosphere during weapons testing. When this completely decays ($T_{1/2}$ of ^{241}Pu is 14.4 y), a total of $3.4 \cdot 10^5$ Ci of ^{241}Am will be formed. There is an additional ~1.4 tons of plutonium deposited in the ground (1989) due to surface and subsurface nuclear weapons testing. Approximately 16,000 Ci of ^{238}Pu were injected into the atmosphere when a satellite containing an isotopic power source disintegrated over the Indian Ocean in 1964. The Chernobyl accident caused the release of ~800 Ci ^{238}Pu , ~700 Ci of ^{239}Pu and ~1000 Ci of ^{240}Pu , representing ~3% of the reactor core inventory. This activity was dispersed over large areas of the former Soviet Union and Europe. The amount of plutonium in the environment due to fuel reprocessing is small.

Chemistry beyond the actinides

Element 104, rutherfordium, Rf, marks the beginning of a remarkable series of chemical elements: from a nuclear point of view they can be called superheavy elements — as they only live because of their microscopic shell stabilization, and from a chemical point of view they are transactinide elements—as the series of actinides ends with element 103.

The first chemical experiments on the transactinides were designed to determine their placement in the periodic table and whether the 5f actinide series actually ended with Lr as predicted by Glenn Seaborg. Then elements 104 (Rf) and 105 (Db/Ha) should have different chemistry from the actinides, and as members of the 6d transition series should be placed as the heaviest members of

groups 4 and 5 and have similar properties. After the discovery of Rf, Silva (1970) studied its solution chemistry for the known isotope 75-s ^{261}Rf . Positive identification was made by measuring its known half-life and decay characteristics. Several hundred elutions with α -hydroxyisobutyrate solutions from cation exchange resin columns were performed to compare the behavior of ^{261}Rf with those of No^{2+} , trivalent actinides, Hf^{4+} , and Zr^{4+} . The behavior of Rf was similar to those of Zr and Hf, which did not sorb on the column and entirely different from No^{2+} and the trivalent actinides that did sorb on the column at pH 4.0. These studies showed unequivocally that Rf should be placed under Zr and Hf in the periodic table. The first computer-controlled automated system for performing very rapid solution chemistry experiments on an atom-at-a-time basis was used in later pioneering experiments (Hulet, 1980). Results showed that the anionic-chloride complexes of Rf were clearly similar to Hf and much stronger than those of the trivalent actinides, again confirming the position of Rf in group 4 of the periodic table. Many additional studies to compare the solution chemistry of Rf with Zr, Hf, Th(IV), and Pu (IV) have shown that although Rf behaves generally like a group 4 element, its behaviour varies with different complexing agents.

Studies of the chemistry of element 105 (Db/Ha) languished until the very first studies of its behavior in solution were reported by Gregorich (1988). These were undertaken simply to determine its most stable oxidation state in aqueous solution. It had been postulated (Keller, 1984) that because of relativistic effects Ha might have a $7s6d7p^2$ valence configuration that could result in a 3+ oxidation state if the 7s electrons were sufficiently stabilized by relativistic effects. But the $6d^37s^2$ was expected by analogy to Ta, which has a $5d^36s^2$ configuration and a most stable state in aqueous solution of 5+. The sorption of Ha on glass cover slips was compared with that of tracers of the group 5 elements Nb and Ta produced under similar conditions.

These group 5 elements are known to sorb on glass surfaces after fuming with nitric acid while the group 4 elements and actinides do not. Element 105 was found to sorb on the glass as did Nb(V) and Ta(V) while Zr, Hf, and the trivalent actinides did not, thus demonstrating that element 105 should be placed in group 5 of the periodic table. However, in extractions into methylisobutyl ketone from mixed HNO_3/HF solutions, Ta extracted but Ha remained behind with Nb, again indicating that details of complexing behavior cannot be predicted on the basis of simple extrapolation from group trends.

The element 106 (Sg) is expected to be the heaviest member of group 6 in the periodic table. Considerations based on both relativistic molecular-orbital calculations and empirical relationships predict that SgO_2Cl_2 should be the most stable of the Sg oxychlorides and that the order of volatility of the dioxydichlorides of the group 6 elements should be $\text{Mo} > \text{W} > \text{Sg}$. Some investigations were performed to determine whether Sg would then behave in a manner different from that of W as suggested by theoretical examination and U (VI). Indeed, the Sg activity remained on the cation-exchange resin columns while W was eluted with 0.1 M HNO_3 . This behaviour was tentatively attributed to the weaker tendency of Sg to hydrolyze in dilute HNO_3 so that it remained as a 2+ or 1+ complex while hydrolysis of W (or Mo) resulted in the neutral species $\text{MO}_2(\text{OH})_2$. In the earlier experiments containing fluoride ion, Sg may have been eluted from the cation-exchange columns as a neutral or anionic fluoride complexes of the type SgO_2F_2 or $[\text{SgO}_2\text{F}_3]^-$ rather than as $[\text{SgO}_4]^{2-}$. Theoretical calculations of complex formation in HF solutions indicate that complex formation competes with hydrolysis in aqueous solutions and the dependence on pH and HF concentration is extremely complicated and reversals in trends may occur.

МАТЕРИАЛЫ ПОРТАЛА ПО РАЗДЕЛУ «ВОДНО-ХИМИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ И ВОДОПОГОТОВКА ДЛЯ АЭС»

Лекция «Водно-химические режимы ВВЭР»

1. Водно-химический режим первого контура

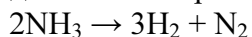
Основной задачей водно-химического режима первого контура является ограничение накопления в теплоносителях радиоактивных примесей. Данные примеси при просачивании воды первого контура во второй, где давление ниже, загрязняют воду парогенератора, который изначально является нерадиоактивным. Для этого должно обеспечиваться:

- мягкое регулирование реактивности активной зоны реактора в течение циклов его работы;
- подавление образования окислительных продуктов радиолиза;
- коррозионная стойкость конструкционных материалов оборудования и трубопроводов в течение проектного срока эксплуатации АЭС;
- минимальное количество отложений на поверхностях твэлов активной зоны реактора и парогенераторов;
- минимальное накопление активированных продуктов коррозии.

Водно-химический режим первого контура ВВЭР-1000 является коррекционным. В качестве корректирующих добавок в теплоноситель вводят борную кислоту H_3BO_3 , гидроксид калия KOH (либо гидроксид лития LiOH на зарубежных реакторах PWR), аммиак (либо гидразин-гидрат $\text{N}_2\text{H}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

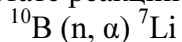
Бор, введенный в виде борной кислоты, используется при мягком регулировании реактивности реактора. Активным поглотителем в природном боре является содержащийся в нем в количестве 19% легкий изотоп ^{10}B , сечение поглощения тепловых нейтронов у которого достигает величины 3900 барн. Борная кислота устойчива в радиационных полях, не разлагается при высоких температурах, хорошо растворима в воде, не образует шлама и накипи, в присутствии щелочей является ингибитором коррозии.

Под действием ионизирующего излучения в воде первого контура происходят различные радиационно-химические реакции, что заметно меняет состав воды и растворов, используемых в качестве теплоносителя. Специфические условия, которые существуют в первом контуре реактора ВВЭР-1000, способствуют протеканию радиолиза воды с образованием коррозионно-активных промежуточных радикалов $\text{H}^\cdot$, $\text{OH}^\cdot$, e^-_{aq} и других, а также коррозионно-активных молекулярных продуктов H_2 , O_2 и H_2O_2 . Радиолиз воды замедляется в присутствии водорода, поэтому для подавления радиолиза в теплоносителе необходимо поддерживать повышенную концентрацию водорода. Концентрация водорода, обеспечивающая поддержание кислорода на уровне менее 0,01 мг/кг, обеспечивается путём введения в теплоноситель аммиака, который в реакторе разлагается с образованием водорода и азота по реакции:



При подщелачивании LiOH водород добавляется отдельно.

При работе реактора на мощности под действием нейтронов в теплоносителе происходит ряд ядерных реакций, в результате которых образуются изотопы кислорода, азота, натрия, лития, влияющие на ведение ВХР первого контура. Наиболее значительное влияние на ведение ВХР первого контура оказывает изотоп лития ^7Li , образующийся в результате реакции:



При длительной эксплуатации реактора на мощности содержание лития в теплоносителе повышается до высоких (до 1,0 мг/дм³) концентраций, которые необходимо учитывать при ведении ВХР.

Таблица 3.1. – Нормы качества теплоносителя при работе энергоблока ВВЭР-1000 на энергетических уровнях мощности.

Нормируемый показатель качества теплоносителя	Диапазон допустимых значений	Отклонения от допустимых значений для различных мощностей		
		Первый уровень	Второй уровень	Третий уровень
Массовая концентрация хлорид-ионов, мг/дм ³	Не более 0,1	-	От 0,1 до 0,2	Более 0,2
Массовая концентрация растворенного кислорода, мг/дм ³	Не более 0,055	От 0,005 до 0,02	-	Более 0,02
Массовая концентрация растворенного водорода, мг/дм ³	2,2 – 2,5	От 4,5 до 7,2 или от 1,3 до 2,2	От 7,2 до 9,0 или от 0,5 до 1,3	Более 9,0 или менее 0,5
Суммарная молярная концентрация щелочных металлов ($[K^+] + [Li^+] + [Na^+]$)	Зона А на рисунке 1.1.1.1.	Зоны Б и В	Зоны Г и Д	Зона Е
Диагностические показатели качества теплоносителя			Контрольные уровни	
Водородный показатель pH			5,8 – 10,3	
Массовая концентрация аммиака, мг/дм ³ , не менее			3,0	
Массовая концентрация железа, мг/дм ³ , не более			0,05	
Массовая концентрация меди, мг/дм ³ , не более			0,02	
Массовая концентрация нитрит-иона, мг/дм ³ , не более			0,2	
Массовая концентрация фторид-иона, мг/дм ³ , не более			0,1	
Массовая концентрация нефтепродуктов, мг/дм ³ , не более			0,5	

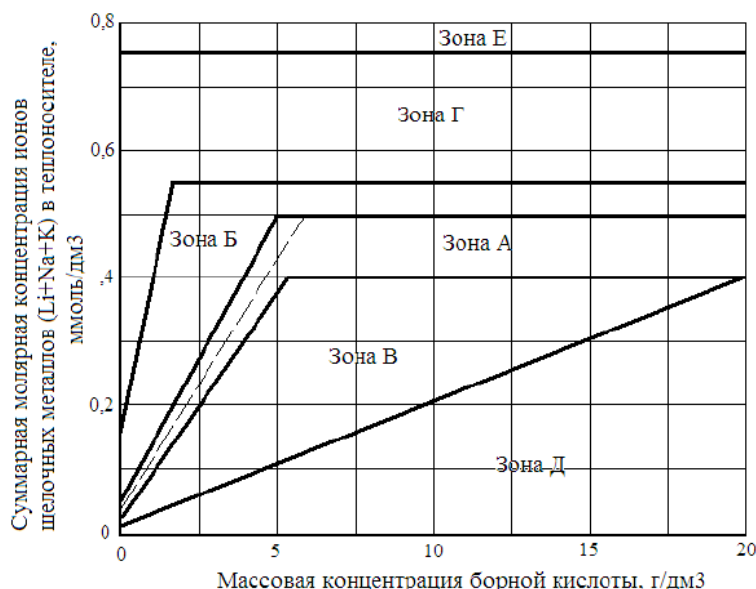


Рисунок 3.1. - Зависимость суммарной концентрации щелочных металлов от текущей концентрации борной кислоты.[5]

2. ВХР второго контура

Одна из важнейших задач водного режима второго контура АЭС с ВВЭР — борьба с отложениями в парогенераторах. Другой важной задачей водного режима является снижение скорости коррозии всех конструкционных материалов. При этом допустимая скорость коррозии определяет ресурс работы оборудования, который зависит, в том числе, и от концентрации продуктов коррозии, являющимися основными примесями питательной воды. Особенности водного режима определяет одновременное использование во втором контуре оборудования из перлитных сталей, аустенитной нержавеющей стали и медьсодержащих сплавов, обладающих различной коррозионной стойкостью в рабочих средах. Наиболее уязвимым оборудованием второго контура является парогенератор, в котором, вследствие упаривания котловой воды, происходит концентрирование ионогенных примесей, поступающих с питательной водой. Для выполнения поставленных задач ВХР второго контура должен обеспечивать:

- минимальное количество отложений на теплообменной поверхности ПГ, в проточной части турбин и в конденсатно-питательном тракте;
- предотвращение коррозионных и коррозионно-эрозионных повреждений конструкционных материалов ПГ, оборудования и трубопроводов;
- минимально достижимый объем сбросов с концентрацией содержащихся в них примесей, не превышающей предельно допустимой концентрации для водоемов;
- снижение общего солесодержания котловой воды в ПГ и особенно содержания хлоридов и сульфатов;
- низкое содержание кислорода в конденсате и питательной воде;
- стабильное поддержание величины рН питательной воды.

Основными возможными источниками загрязнения среды второго контура являются:

- добавочная вода после химводоочистки;
- присосы воздуха через неплотности в вакуумной части конденсатного тракта;
- присосы охлаждающей воды через неплотности в конденсаторах турбины;
- протечки сетевой воды в бойлерах теплосети;
- конденсат дренажных баков;
- продукты коррозии конструкционных материалов оборудования и трубопроводов второго контура.

Существует несколько вариантов водно-химического режима второго контура ВВЭР:

- гидразинно-аммиачный ВХР;
- гидразинно-аммиачный ВХР с дозированием гидроксида лития;
- ВХР с дозированием аминов.

2.1. Гидразинно-аммиачный ВХР

Для второго контура ВВЭР предусматривается поддержание ВХР с коррекционной обработкой рабочей среды гидразином и при необходимости дополнительной обработкой аммиаком. [

В рабочую среду вводятся:

- гидразин для связывания кислорода и подщелачивания рабочей среды за счёт накопления аммиака, образовавшегося в результате термического разложения гидразина;

- аммиак для поддержания рН на допустимом уровне.

Основными преимуществами данного режима являются:

- сравнительно малые стоимость и расход реагентов;
- сравнительно лёгкие управляемость и корректируемость параметров;
- диагностируемость средствами автоматического контроля.

Однако данный режим имеет достаточно серьезные недостатки, такие как:

- аммиак в присутствии кислорода коррозионно-агрессивен по отношению к медьсодержащим сплавам оборудования второго контура;
- высокая текучесть аммиака приводит к низким значениям pH продувочной воды ПГ, что инициирует коррозионное растрескивание напряженного металла оборудования;
- концентрация железа в питательной воде, на некоторых АЭС превышающая 15 мкг/дм³, приводит к высокой скорости коррозионных процессов, что, в свою очередь, приводит к поступлению в объем парогенератора значительного количества железокислородного шлама и развитию коррозии.

Нормируемые показатели питательной и продувочной воды приведены в таблицах 3.2 и 3.3.

Таблица 3.2. — Нормы качества питательной воды при работе энергоблока на энергетических уровнях мощности не менее 35 % $N_{\text{ном}}$

Показатели	Питательная вода			
	Норми- руемое значение	Уровень отклонения показателей от нормируемых значений		
		Первый уровень	Второй уровень	Эксплуата- ционный предел
Нормируемые показатели				
Удельная электрическая проводимость Н- катионированной пробы, мкСм/см	Менее или равно 0,5	0,5-1,0	-	Более 1,0
Концентрация O ₂ после деаэратора, мкг/кг	Менее или равно 10	10-30	30-100	Более 100
Диагностические показатели		Контрольные значения показателей		
Значение pH при 25 °С		8,5-9,2		
Концентрация железа, мкг/кг		Менее или равно 5		
Концентрация меди за ПНД-4, мкг/кг		Менее или равно 5		
Концентрация гидразина, мкг/кг		Более 20		
Концентрация масел и тяжелых нефтепродуктов, мкг/кг		Менее или равно 100		

Таблица 3.3. — Нормы качества продувочной воды при работе энергоблока на энергетических уровнях мощности менее 35 % $N_{\text{ном}}$ [8]

Показатели	Продувочная вода ПГ из солевого отсека		
	Нормируемое значение	Уровень отклонения показателей от нормируемых значений	
		Первый уровень	Эксплуатационный предел
Удельная электрическая проводимость Н-катионизированной пробы, мкСм/см	Менее или равно 9	9 – 15	Более 15
Концентрация натрия, мкг/кг	Менее или равно 1000	1000 – 1500	Более 1500
Концентрация хлорид-ионов, мкг/кг	Менее или равно 300	300 – 500	Более 500
Концентрация сульфат-ионов, мкг/кг	Менее или	600 – 1000	Более 1000

	ровно 600		
Диагностический показатель	Контрольные значения показателей		
Значение pH при 25 °C	8,0 – 9,0		

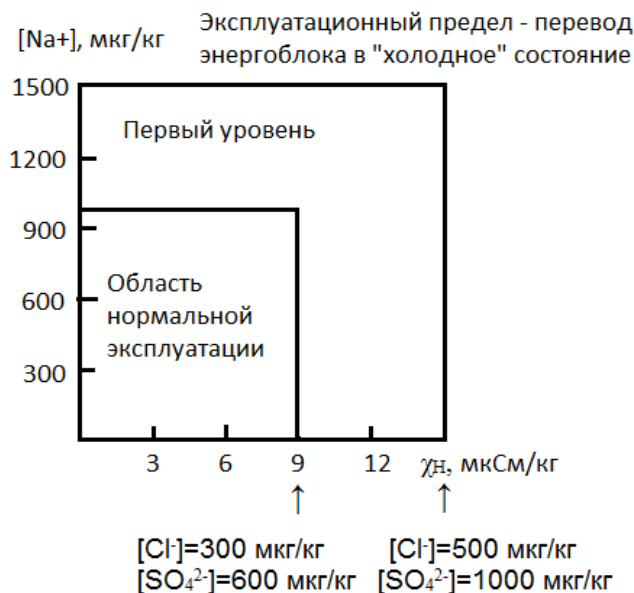


Рисунок 3.2. - Условия эксплуатации энергоблока при работе на энергетических уровнях мощности менее 35 % $N_{ном}$ при отклонении показателей качества продувочной воды парогенераторов от нормируемых значений

1.2 Гидразинно-аммиачный ВХР с дозированием LiOH

Использование гидроксида лития как корректирующей добавки для второго контура обусловлено рядом важных коррозионных и технологических аспектов.

Во-первых, общая скорость коррозии и растрескивания углеродистых и нержавеющих сталей уменьшается в ряду NaOH, KOH, LiOH.

Во-вторых, гидроксид лития образует с конструкционными железосодержащими материалами нерастворимую пленку феррита лития $LiFeO_2$, которая обладает хорошими защитными свойствами.

В-третьих, гидроксид лития обладает хорошими нейтрализующими свойствами против сульфатов и хлоридов с образованием растворимых солей $LiCl$ и Li_2SO_4 .

В-четвертых, подщелачивание воды парогенератора соединениями лития направлено на снижение концентрации гидразина и, соответственно, аммиака в турбинном конденсате, что способствует снижению коррозии меди.

Преимущества данного режима следующие:

- сравнительно малые стоимость и расход реагентов для поддержания параметров ВХР второго контура;

- введение гидроксида лития позволило повысить pH продувочной воды до значений 8,6–8,7 за счет ионов лития, снизить концентрацию аммиака во втором контуре и тем самым снизить уровень поступления меди в объем ПГ по сравнению с режимом без дозировки LiOH;

- гидроксид лития, как прекрасный пленкообразующий ингибитор, может быть использован для консервации ПГ в ремонтный период: однопроцентный раствор LiOH позволяет создать на стенках парогенератора и теплообменных трубках сплошную оксидную пленку, устойчивую к коррозионному воздействию и способную сохраняться в

течение всего срока кампании в случае микродозировки гидроксида лития во время работы блока на мощности.

Недостатки использования LiOH в основном сводятся к тому, что дозировка лития не может в полной мере исключить влияние аммиака на коррозию медьсодержащих сплавов, что, в свою очередь, приводит к повышенной скорости коррозионного износа.

1.3 ВХР с дозированием аминов

Основные достоинства аминов:

- выравнивание значения pH в рабочих средах второго контура (конденсат, питательная вода, продувочная вода) вследствие распределения аминов в среде пар–вода на уровне «один к одному» приводит к снижению скорости коррозии в разы и, как следствие, к уменьшению концентрации железа;

- при повышении уровня pH до 9,0 не создаются условия для щелочного растрескивания конструкционных материалов, так как накопление аминов в зазорах не происходит в силу его физических и химических свойств;

- затраты на использование аминов с избытком компенсируются экономией гидразина и эксплуатацией блочной очистной установки с увеличенными фильтроциклами.

Среди недостатков аминов отметим следующие, являющиеся достаточно существенными:

- при реализации аминowego ВХР во втором контуре происходит термическое разложение амина, продуктами которого являются органические кислоты. Третью часть образующихся органических кислот составляет муравьиная кислота и две трети – уксусная кислота. Образование данных кислот в присутствии кислорода приводит к повышению электропроводности и требует ввода в работу фильтров смешанного действия;

- амины являются плохими растворителями меди и, в никак от неё не защищают. В условиях работы блока с медьсодержащими материалами в оборудовании второго контура возможно повышение концентрации меди в питательной воде и в водяном объеме парогенератора, что может привести к возникновению и развитию электрохимической контактной коррозии.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

Моделирование типовых ситуаций водно-химического режима первого контура АЭС с ВВЭР и их контроль с использованием ионной хроматографии

Водно-химический режим первого контура АЭС с ВВЭР

Водно-химический режим станции (ВХР) – это система организационно-технических мероприятий, направленных на обеспечение и поддержание норм качества водного теплоносителя и допустимого состояния внутренних поверхностей оборудования основного контура в целях достижения безаварийной и экономичной работы оборудования в течение проектного срока эксплуатации.

ВХР первого контура на АЭС является одним из важнейших факторов, влияющих на ее надежную, экономичную и безопасную эксплуатацию. Со времени ввода в эксплуатацию первых блоков АЭС и до настоящего времени остается актуальной задача создания и поддержания таких физико-химических свойств теплоносителя, которые предотвращали или хотя бы ослабляли влияние коррозионных явлений.

ВХР первого контура обеспечивает выполнение следующих функциональных требований:

- Подавление образования окислительных продуктов радиолиза при работе на мощности;
- Коррозионную стойкость конструкционных материалов оборудования и трубопроводов в течение проектного срока службы АЭС;
- Минимизацию отложений на поверхностях тепловыделяющих элементов активной зоны реактора и теплообменной поверхности парогенераторов;
- Минимизацию накопления активированных продуктов коррозии.

Оптимальное ведение ВХР первого контура и функционирование средств его поддержания являются одним из условий минимизации накопления активированных продуктов коррозии, а также радиоактивных отходов и сброса этих отходов в окружающую среду.

Для первого контура при работе энергоблока АЭС с реакторами ВВЭР-1000 на энергетических уровнях мощности предусмотрено ведение слабощелочного восстановительного аммиачно-калиевого водно-химического режима с борной кислотой.

Характеристики показателей качества теплоносителя первого контура

Нормы качества теплоносителя первого контура, включая диапазоны допустимых значений и уровни отклонений, при работе энергоблока на энергетических уровнях мощности представлены в табл. 1.

Таблица 1. Нормы качества теплоносителя первого контура АЭС с ВВЭР при работе энергоблока на энергетических уровнях мощности

Нормируемый показатель качества теплоносителя	Диапазон допустимых значений	Отклонения от допустимых значений для различных мощностей		
		Первый уровень	Второй уровень	Третий уровень
Концентрация хлорид-ионов, мг/дм ³	Не более 0,1	-	От 0,1 до 0,2	Более 0,2
Концентрация растворенного O ₂ , мг/дм ³	Не более 0,005	От 0,005 до 0,02	-	Более 0,02
Концентрация растворенного H ₂ , мг/дм ³	2,2 – 4,5	От 4,5 до 7,2 или от 1,3 до 2,2	От 7,2 до 9,0 или от 0,5 до 1,3	Более 9,0 или менее 0,5

Суммарная концентрация щелочных металлов	Зона А	Зоны Б и В	Зоны Г и Д	Зона Е
Диагностические показатели качества теплоносителя				
Водородный показатель pH			5,8 – 10,3	
Концентрация аммиака, мг/дм ³ , не менее			3,0	
Концентрация железа, мг/дм ³ , не более			0,05	
Концентрация меди, мг/дм ³ , не более			0,02	
Концентрация нитрат-иона, мг/дм ³ , не более			0,2	
Концентрация фторид-иона, мг/дм ³ , не более			0,1	
Концентрация нефтепродуктов, мг/дм ³ , не более			0,5	

Содержание хлористых и фтористых соединений (Cl⁻, F⁻)

Хлористые и фтористые соединения поступают в первый контур с подпиточной водой, оказывая отрицательное коррозионное воздействие на конструкционные материалы реакторной установки. Основным источником поступления фторид-ионов в первый контур являются также поверхностные загрязнения оболочек твэлов свежезагруженных ТВС.

Для коррозионностойких сталей аустенитного класса в условиях многократной принудительной циркуляции характерна коррозия под напряжением при совместном воздействии хлоридов и кислорода.

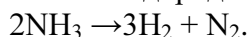
Поддержание концентрации хлорид-ионов и фторид-ионов в теплоносителе первого контура в пределах норм достигается за счет использования дозируемых химических реагентов высокой степени чистоты, поддержания качества подпиточной воды первого контура на соответствующем уровне, очистки теплоносителя первого контура на ионообменных фильтрах системы КВЕ (система очистки теплоносителя первого контура).

Содержание кислорода (O₂)

Накопление свободного кислорода в теплоносителе первого контура происходит в результате радиолиза воды, а также за счет поступлений с подпиточной водой. Присутствие кислорода способствует развитию местной коррозии конструкционных материалов контура и активной зоны. Поддержание концентрации кислорода в пределах нормы достигается связыванием образующегося в результате радиолиза воды кислорода избытком молекулярного водорода.

Содержание водорода (H₂) и аммиака (NH₃)

Молекулярный водород необходим в теплоносителе для подавления радиолиза воды. Содержание водорода в теплоносителе на нормируемом уровне обеспечивает полное связывание кислорода в теплоносителе первого контура. Нормируемая концентрация водорода поддерживается дозированием аммиака, который радиолитически разлагается с образованием водорода и азота:



Содержание продуктов коррозии

Содержание продуктов коррозии в теплоносителе характеризует скорость коррозионных процессов и процессов массопереноса в первом контуре. Циркулируя через активную зону, продукты коррозии значительно активируются и образуют отложения на внутренних поверхностях оборудования по всей главной циркуляционной петле, что отрицательно влияет на радиационную обстановку, усложняя ремонтные работы, и вызывает необходимость дезактивации.

Расчетный анализ показал, что поддержание оптимального значения pH(t) обеспечивает минимальное накопление отложений на поверхностях ТВС и минимальный массоперенос.

Содержание ионов щелочных металлов (K⁺, Na⁺, Li⁺) и борной кислоты (H₃BO₃)

В условиях первого контура интенсивность и направление массопереноса продуктов коррозии с поверхностей оборудования на ТВС, а также массоперенос коррозионных радионуклидов с ТВС на поверхности контура зависит от величины высокотемпературного $pH(t)$ теплоносителя, которая определяется, в основном, соотношением между концентрациями борной кислоты и суммы щелочных металлов. Борная кислота используется в качестве жидкого поглотителя нейтронов, что позволяет плавно регулировать мощность реактора.

Учитывая, что при работе реактора концентрация борной кислоты изменяется в зависимости от запаса реактивности, для поддержания $pH(t)$ в оптимальной области необходимо координировать концентрацию суммы щелочных металлов в зависимости от изменения концентрации борной кислоты.

На основании расчетных данных определена оптимальная область $pH(t)$, поддержание которой обеспечивает минимизацию отложений и низкий уровень загрязненности поверхностей контура коррозионными радионуклидами (зона А на рисунке 1).

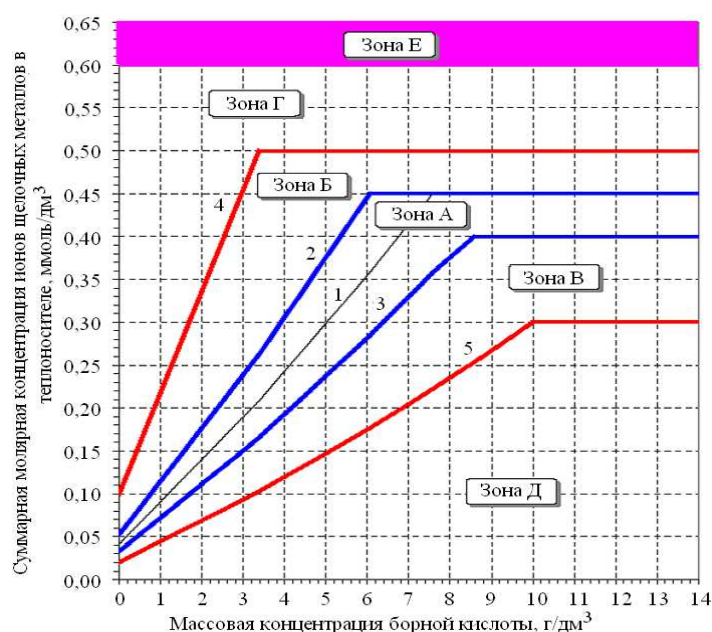
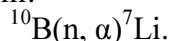


Рисунок 1. Зависимость суммарной концентрации щелочных металлов от текущей концентрации борной кислоты.

Поддержание оптимального соотношения суммы щелочных металлов и борной кислоты поддерживается дозированием гидроокиси калия. При этом учитывается вклад катионов натрия, поступающих в контур подпиточной водой и примесями химических реагентов, а также катионов лития, накапливающихся при облучении бора нейтронами по реакции:



Суммарная молярная концентрация щелочных металлов поддерживается в зависимости от текущей концентрации борной кислоты.

Поддержание регламентированных параметров водно-химического режима является одним из обязательных условий обеспечения безопасности в ядерной энергетике.

Особенностью аналитического контроля на АЭС является необходимость, во многих случаях, определять содержание аналитов на уровне чрезвычайно низких концентраций - единиц мкг/л, причем в высокорadioактивных водных средах. Эта накладывает свой отпечаток на выбор методов и средств контроля. В большинстве своем используемые на начальных этапах развития атомной энергетики методы контроля были преимущественно ориентированы на определение одного аналита в пробе. Это приводило к вынужденному увеличению трудоемкости аналитического контроля, существенному росту радиоактивного

облучения персонала. С позиции уменьшения объемов и числа проб для обеспечения контроля по всем нормируемым и диагностическим показателям предпочтительны универсальные методы анализа, позволяющие определять несколько аналитов из одной пробы. К числу таких методов относится ионная хроматография, которая все чаще применяется для аналитического контроля в атомной энергетике.

Для определения одного из нормируемых показателей теплоносителей 1-ых контуров ВВЭР, характеризуемого как «сумма щелочных металлов» долгое время использовались методики пламенно-фотометрического определения каждого из них. Проявляемое при этом сильное взаимное влияние определяемых ионов приводило к необходимости приготовления сложных градуировочных стандартов, что существенно усложняло проведение анализа.

Ионная хроматография применяется в атомной энергетике с 1983 года, и в настоящее время большинство АЭС США и многие европейские АЭС оснащены ионохроматографическим оборудованием, разработаны и используется ряд аттестованных методик, в том числе для определения содержания ионов щелочных металлов в 1 контуре АЭС с ВВЭР.

Методика выполнения работы

Методика предназначена для одновременного определения суммарной концентрации щелочных металлов [Li, Na, K] в пробах, которые являются моделями типовых ситуаций ВХР первого контура АЭС с ВВЭР.

Сущность метода

Измерение суммарной концентрации щелочных металлов выполняют на ионном хроматографе 850 Professional IC AnCat фирмы Metrohm. Разделение катионов происходит на колонке MetrosepC4 – 250/4.0. Детектирование хроматографических пиков осуществляется кондуктометрически. Сигналы регистрируются программным обеспечением MagICNetTM.

Материалы и реактивы

- колбы мерные вместимостью 100 мл;
- пипетка автоматическая переменного объема (100-1000 мкл);
- вода деионизованная, полученная на установке SiemensUltraClear;
- стандартный раствор для ионной хроматографии с содержанием по 10,0 мг/кг $\pm$ 0,2% Li, Na, K, Mg, Ca.

Хроматографические условия анализа

- температура колонки – 35,0 °С;
- элюент – азотная кислота 2,5 ммоль/л;
- расход элюента - 0,700 мл/мин;
- время одного измерения – 41 мин.

Приготовление модельных растворов

Для проведения эксперимента выбраны модельные пробы с концентрацией борной кислоты 8 г/л. Для удобства анализа расчет суммарной концентрации щелочных металлов проведен с учетом разбавления в 50 раз. Результаты вычислений в табл. 2.

Таблица 2. Расчетные параметры для модельных проб

№ п/п	Объем стандартного раствора, мкл	Суммарная концентрация [Li+Na+K], мкг/л	Суммарная концентрация [Li+Na+K], ммоль/л*10 ²	[Li+Na+K], мкг/л с учетом разбавления	Зона
1	220	22	0,4689	0,2345	Д
2	300	30	0,6394	0,3197	В
3	360	36	0,7673	0,3837	А

4	440	44	0,9378	0,4689	Б
5	540	54	1,1510	0,5755	Г
6	620	62	1,3215	0,6608	Е

Все растворы следует готовить на деионизованной воде. Всю используемую посуду многократно (не менее 5 раз) ополаскивают деионизованной водой.

Для приготовления раствора борной кислоты в колбу вместимостью 100 мл добавить 1,600 г борной кислоты, довести до метки водой.

Для приготовления проб в 6 колб вместимостью 100 мл добавить по 1 мл приготовленного раствора борной кислоты, а также стандартный раствор в количестве, указанном в табл. 2, довести до метки водой.

Полученные растворы тщательно перемешать, залить в емкости для отбора проб, закрыть крышкой, поместить в прибор.

Ход выполнения измерений

1. Установку, включение и подготовку хроматографа к работе осуществить в соответствии с инструкцией по эксплуатации, прилагаемой к прибору.

2. Загрузить программное обеспечение MagICNet™. Во вкладке «Система» проверить работу всех систем прибора (надпись «ок» для каждой). Во вкладке «Метод» выбрать «Стандартные катионы».

3. Открыть вкладку «Запуск», запустить «Кондиционирование» прибора на время, пока не установится постоянное значение электропроводности. Время выхода прибора на режим – не более 1 часа.

4. Выполнение холостого опыта. Чтобы избежать искажения результатов определения катионов из-за присутствия их в деионизованной воде, необходимо проводить анализ воды перед началом работы. При отсутствии на хроматограмме деионизованной воды значимых пиков можно приступить к приготовлению растворов.

5. Во вкладке «Серия измерений» прописать все модельные растворы, дав каждому соответствующее название, позицию, а также указав следующие параметры:

- метод – стандартные катионы;
- тип пробы – проба;
- объем – 2000 мкл;
- разведение – 1 раз;
- количество инъекций – 1;

6. Запустить серию измерений. Для каждого раствора установить время записи 41 мин.

7. Для катионов Li, Na, K выписать площади пиков, время удерживания и концентрацию в мкг/л. Сделать вывод о возможности использования ионной хроматографии для анализа теплоносителя первого контура АЭС с ВВЭР.

Контрольные вопросы

1. Опишите водно-химического режима первого контура АЭС с ВВЭР. Объясните необходимость введения всех корректирующих добавок.
2. Чем обусловлен выбор дозирования в контур гидроокиси калия для поддержания оптимального соотношения суммы щелочных металлов и борной кислоты?
3. Назовите существующие пути совершенствования ВХР первого контура АЭС с ВВЭР (сравните с ВХР зарубежных АЭС с РWR).
4. Для контроля каких показателей применяется метод ионной хроматографии на АЭС? Чем обусловлен выбор данного метода?

Водоподготовка в атомной энергетике/ Водоподготовка и водно-химические режимы АЭС



Для студентов
специальности «Химия высоких
энергий»

Лекции – 20 ч.
Лабораторные – 12 ч.
Практические – 7 ч.
КСР – 4

Лекция 2

Доцент Савицкая Татьяна Александровна

Химический факультет БГУ, февраль 2015 г.

В дополнение к лекции 1

ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СТОИМОСТИ АЭС



По данным Каталонского университета (Барселона)

Содержание лекции

1. Водные ресурсы мира и динамика их развития.
2. Краткая характеристика основного оборудования энергоблока с реакторами ВВЭР-1000 (первый и второй контур).
3. Организация ВХР и оценка его качества.
4. Поступление примесей в пароводяной тракт АЭС и основные конструкционные материалы.

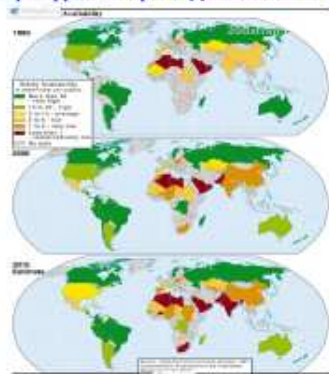


Водные ресурсы мира и динамика их развития

- Водные ресурсы – речной сток, запасы воды в водоемах, естественные и эксплуатационные ресурсы подземных вод
- Наиболее обеспечены водными ресурсами: Бразилия (8 233 км³), Россия (4 508 км³), США (3 051 км³),... Беларусь (57 км³)
- Средняя водообеспеченность в год на жителя в мире: 11,2 тыс. м³ в Беларуси – 5,7 тыс. м³ (Французская Гвиана- 609,1, Россия- 31,8)



Водные ресурсы мира и динамика их развития



Водные ресурсы мира и динамика их развития



Прогноз на 2025 год (м³/год на человека): Кувейт 0, ОАЭ 58, Саудовская Аравия 59, Иордания 81, Йемен 85.....

Решение проблемы нехватки воды

- Опреснение воды (дистилляция, обратный осмос, электролиз, вымораживание, ионный обмен)



- Получение воды из воздуха



Производительность:

- До 5100 т/сутки.

Средняя стоимость одного литра воды: до 0,10\$



Каталонские тепловые электростанции (КТЕ) в г. Барселона

International Hydrological Programme of UNESCO (since 1975)



UNESCO's International Hydrological Programme (IHP) is the largest international programme in the field of water. It was established in 1975 and has since then been working to improve the understanding of the water cycle and its role in the environment. IHP has a global network of scientists and institutions working together to address water-related challenges. The programme has a focus on research, education, and public awareness. IHP has a long history of successful projects and has been instrumental in advancing the science of water. The programme has a strong commitment to sustainability and has been a key player in the development of the Sustainable Development Goals (SDGs). IHP has a strong presence in the global water community and is a leading organization in the field of water science.

Водные ресурсы Республики Беларусь

- На территории РБ: водораздел бассейнов рек Балтийского (45% речного стока) и Черного морей (55%), 7 крупных рек (протяженностью более 500 км), являющихся трансграничными (кроме Березины).
- Всего: 20,8 тыс рек и ручьев, 10,8 тыс озер и 153 водохранилища (800 м² или 0,4% площади страны), 1500 прудов и 18 полносистемных речных хозяйств (

Новый Водный кодекс Республики Беларусь, принят 30 апреля 2014 г.

В нем впервые закреплены следующие принципы

- улучшение экологического состояния (статуса) поверхностных водных объектов (их частей);
- бассейновое управление водными ресурсами;
- участие граждан и общественных объединений в вопросах принятия решений в области охраны и использования вод.

Водные ресурсы Республики Беларусь

- ✓ 85% озер и водохранилищ имеют высокий экологический статус. 8% из них (преимущественно в бассейне р. Западная Двина) классифицируются как «чистые».

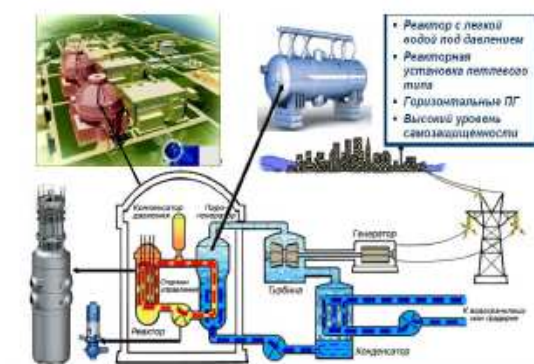
- ✓ Приоритетные показатели загрязнения: фосфор фосфатный, азот аммонийный и азот нитритный.
Р. Западная Двина (р-н Полоцка-Верхнедвинска: 0,51-0,58 мг N/мл при ПДК=0,39мг/мл (данные 2009 г.)



Гидроэнергетический потенциал Беларуси

- Освоен на 6 %
- Перспективное направление использования: восстановление и строительство малых ГЭС
- До 2020 года – общей мощностью до 200 МВт, в основном за счет строительства каскадов на реках Неман, Западная Двина и Днепр
- После реализации данных проектов выработка электроэнергии составит 805,5 млн кВт·ч. Это позволит экономить 225,5 млн м³ природного газа.

Водные ресурсы и их использование/М.М.Бражкин, А.С.Катинович, П.И.Куркин- Минск: БГУИР, 2011- 26 с.



Строительство АЭС

- «Нет ни одной страны, которая на ветряках и ГЭСах полностью обеспечивает себя энергией» – заметил заместитель генерального директора концерна «Белэнерго» Минэнерго Беларуси Павел Якубович.
- «Строительство АЭС поможет серьезно решить вопросы энергетической безопасности страны. И это то, что позволит нам сдерживать рост тарифов на энергетику, а может быть, и снизить их, если снизится мировая цена на нефть и газ», – сказал замминистра энергетики Михаил Михалюк.

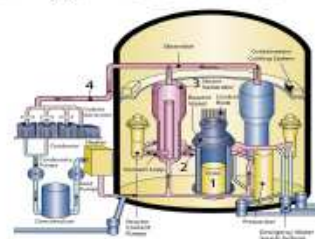
В случае форсмажорных обстоятельств, перерывов в подаче газа, других техногенных случаях станция позволит белорусской энергосистеме работать стабильно.



Второй контур АЭС с ВВЭР

Состоит:

- Парогенератор
- Турбоустановка
- Конденсатор
- Система регенеративного подогрева питательной воды.



Водно-химический режим

ВХР АЭС является одним из важнейших факторов, влияющих на надежную, экономичную и безопасную эксплуатацию АЭС.

ВХР – это совокупность мероприятий, регламентирующих качество рабочих сред с целью обеспечения надежной и экономичной эксплуатации оборудования, контактирующего с ним

Сравнительные характеристики питьевой воды и воды II контура АЭС

Показатель	Единица измерения	Питьевая вода	ПДК	Вода II контура	Контрольные значения
Fe	мг/л	0,094	5,0	0,005	< 0,02
Cl ⁻	мг/л	12,70	350,0	0,04	< 0,05
Жесткость	мг/л	5,30	7,0	0,00*	---
Cu ²⁺	мг/л	0,05	1,0	0,0025	< 0,005
pH	---	7,20	7,50	8,50	8,5-9,2

Повторяем пройденное:

Водо-водяные ядерные реакторы (ВВЭР)

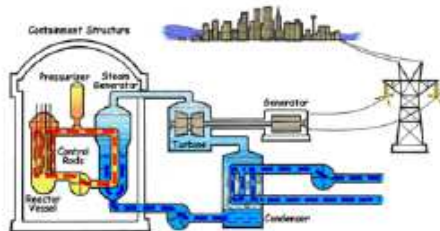
- ВВЭР и его западный аналог — самый не-распространенный? тип реактора для АЭС. Легководный корпусный реактор на тепловых нейтронах, в котором вода является замедлителем? теплоносителем? Вода находится под давлением, **Каким?** поэтому не кипит, циркулируя через реактор и парогенератор. **Температура воды на входе в реактор? На выходе?** Образующийся в парогенераторе пар по второму контуру попадает в турбину. Размеры активных зон ВВЭР весьма умерены, что позволяет располагать их в прочных корпусах, принимающих на себя давление теплоносителя. В реакторах этого типа применяются стержневые тепловыделяющие элементы (ТВЭЛы) с топливом из ?и оболочками из ?сплавов. Обогащение по урану-235 составляет ? %.

Направления развития ВВЭР

- Эволюционный проект ВВЭР с пониженным расходом природного урана (ВВЭРС)
- Инновационный проект ВВЭР с теплоносителем сверхкритических параметров и повышенным коэффициентом воспроизводства делящихся нуклидов (ВВЭР-СКД)

ВВЭР (СССР, Россия), PWR (США,

WestinghouseElectric"), EPR (AREVA, Франция-Германия)



Первый контур АЭС с ВВЭР

Реакторная установка —

- реактор ВВЭР-1000
- парогенератор типа ПГМ-1000М
- главный циркуляционный насос типа ГЦН-195М,
- главный циркуляционный трубопровод,
- система компенсации объема,
- пассивная система аварийного охлаждения зоны.

Основная система первого радиоактивного контура энергоблока — это главный циркуляционный контур:

ВВЭР-1000

четыре циркуляционные петли: ГЦН, ПГ и главный циркуляционный трубопровод

ВХР должен

- Обеспечивать целостность барьеров (оболочки ТВЭЛов, границы контура теплоносителя, герметичные ограждения, локализирующие системы безопасности) на пути возможного распространения радиоактивных веществ в окружающую среду
- Предотвращать коррозионное и коррозионно-эрозивное воздействие теплоносителя и других рабочих сред на конструкционные материалы
- Минимизировать скорость образования отложений на теплопередающих поверхностях оборудования и трубопроводов

Задачи организации ВХР:

- Поддержание качества воды и пара на уровне, соответствующем нормам технологического проектирования
- Определение с необходимой степенью точности значений показателей этого качества с помощью автоматических приборов и ручными методами контроля

Системы химико-технологического мониторинга

- Повышают надежность поддержания основных показателей ВХР в нормируемых диапазонах
- Отличаются от систем автоматического контроля наличием программного обеспечения, построенного на базе математических моделей
- Позволяют не только фиксировать информацию, но и анализировать ситуацию, строить вероятностные прогнозы, давать советы оператору, начальнику смены химического цеха и др.

Экспертные системы

- Позволяют количественно прогнозировать вклад различных показателей работы станции, в том числе и водно-химических, в надежность работы АЭС в целом
- Используют параметры, определяемые с помощью автоматических приборов химконтроля (электрическая проводимость, концентрация кислорода, общего органического углерода, натрия, окислительно-восстановительный потенциал)

Пути поступления примесей в пароводяной тракт (ПВТ) АЭС

- Неплотности в конденсаторах турбин, обуславливающие попадание охлаждающей воды в конденсат пара
- С добавочной водой, которая используется для восстановления потерь, вызванных утечками пара и воды
- Коррозия конструкционных материалов
- Подшипники турбины
- Присос воздуха в сальниках насосов
- Введение реагентов для коррекции ВХР
- Нарушение оболочек ТВЭлов

Виды примесей, поступающих в пароводяной тракт (ПВТ) АЭС

- В связи с наличием в охлаждающей воде соединений кальция, магния, кремневой кислоты при высоких температурах возможно образование труднорастворимых соединений
- При использовании поверхностных источников поступают органические соединения, которые подвергаются термолизу с образованием коррозионно-активных соединений (углекислота, уксусная, муравьиная и другие органические кислоты).
- Примеси, которые попадают в добавочную воду при её подготовке
- Продукты коррозии в растворенном и коллоидном состоянии
- Масла
- Реагенты для коррекции ВХР, продукты деления ядерного топлива

Источники загрязнения	Характеристика загрязнения
Неплотности в конденсаторах	Соединения, содержащиеся в охлаждающей воде: соединения кальция, магния, натрия, кремневая кислота, органические соединения
Добавочная вода	Соединения натрия, кремневая кислота, органические соединения
Коррозия оборудования ПВТ	Соединения железа, цинка, меди, никеля, алюминия и др.
Подшипники	масла
Присосы в сальниках насосов	Углекислота, кислород
Реагенты для коррекции ВХР	Зависит от типа оборудования
Нарушение плотности оболочек ТВЭЛов	Продукты деления ядерного топлива
Радиационно-химические процессы	Зависит от типа реактора

Конструкционные материалы

- Углеродистые стали перлитного класса
- Аустенитные нержавеющие стали (трубопроводы, насосы первого контура, поверхности нагрева парогенераторов)
- Циркониевые сплавы (оболочки ТВЭЛов)
- Сплавы на основе алюминия (также ТВЭЛы исследовательских реакторов)
- Сплавы на основе меди (трубки конденсаторов)
- Стали с высоким содержанием кобальта (стеллит) (лопатки турбин, работающие в атмосфере влажного пара)

Углеродистые стали перлитного класса

- **Сталью** называется сплав железа с углеродом, содержащий углерода до 2,1%. **Легированные стали** классифицируют либо по структуре, либо по назначению. Различают легированную сталь следующих структурных классов. Стали **перлитного класса** имеют структуру перлита или его разновидностей: сорбита, тростита, а также перлита с ферритом или с заэвтектидными карбидами. Стали **аустенитного класса** имеют сильно пониженную температуру распада аустенита, который сохраняется в структуре стали даже при комнатной температуре.

Продолжение следует.

Объект изучения требует внимания!



Водоподготовка в атомной энергетике/ Водоподготовка и водно-химические режимы АЭС



Для студентов
специальности «Химия высоких
энергий»

Лекции – 20 ч.
Лабораторные – 12 ч.
Практические – 7 ч.
КСР – 4

Лекция 3

Доцент Савицкая Татьяна Александровна

Химический факультет БГУ, февраль 2015 г.

Содержание лекции

1. Основные конструкционные материалы
2. Виды вод на АЭС по назначению и источнику получения
3. Организация ВХР первого контура и оценка его качества.



Основные конструкционные материалы

- Ижорские заводы. Первый в истории корпус реактора ВВЭР 1200
- «АЭМ-технологии». Реактор для Белорусской АЭС (г.Волгодонск). Вес 337 т, длина 10м, диаметр 4,8 м
- Реактор со 100-летним сроком службы. ЦНИИ КМ «Прометей» (для новой АЭС под Курском)
- Для изготовления корпусов реакторов ВВЭР-1000 используется **перлитная сталь марки 15Х2НМФА**
- Х-селен, Н-никель, А-азот, В-вольфрам, Е-селен, Г-марганец, Д-медь, Б-ниобий, Р-бор, П-фосфор, Ю-алюминий, М-молибден, К-кобальт, Ц-цирконий, Ф-ванадий.
- Если впереди марки – **две цифры**, то они указывают среднее содержание углерода **в сотых долях процента. Одна цифра – в десятых долях процента**

Основные конструкционные материалы

- Если впереди марки **нет цифры**, то количество углерода составляет **1% и выше**.
- **Цифры, следующие за буквами**, показывают среднее содержание данного элемента **в процентах**.
- Буква **А** в конце марки означает высококачественную сталь, содержащую меньше фосфора и серы. Допускается содержание серы до 0,015%.
- 12Х2Н4А ?
- Г13 ?
- 10ГН2МФА ?
- 15Х2НМФА ?



Материалы для ТВЭЛов и ТВС

- Проблема: прогиб безчехловых ТВС из-за недостаточной жесткости конструкции. Были разработаны радиационно-стойкие сплавы (З635, З110, З125)

Элемент	Nb	Sn	Fe	O	Si	Zr
min, %	0.90	1.10	0.30	0.05	0.0050	-
max, %	1.10	1.40	0.47	0.12	0.0200	остальное

У компании "Westinghouse" можно выделить сплавы А1 и А5.

Сплав А1 имеет состав Zr -1,0Nb-0,35Sn-0,5Fe-0,32Cu-0,18% В нм, по сравнению со стандартным и низколегированным. вариантами, существенно снижено содержание олова и сделаны добавки меди и ванадия. В состав сплава А5 (Zr-0,7Nb-0,35Sn-0,35Fe-0,25Cu) входит добавка хрома.

Группа AREVA изучает серию сплавов Qxx, таких как Q12, Q32 и Q42. Они различаются между собой содержанием железа (от 0,1Fe до 0,2Fe) и олова (от 0,35Sn до 0,55Sn). В японской промышленности рассматриваются сплавы J1, J2 и J3, в которых варьируется содержание ниобия от 1,6 до 2,5% и возможны добавки хрома.



Материалы для трубопроводов

- Углеродистые стали 10 и 20 при t<450 оС
Марки углеродистой конструктивной стали обозначаются: 08, 10, 15, 20, 25 ... 85, где двузначные цифры указывают процентное содержание углерода, увеличенное в 100 раз.
- Стали перлитного класса 12Х1МФ и 15Х1М1Ф при t = 450-470 оС
- Аустенитные нержавеющие стали типа ОХ18Н10Т при t<700 оС
- Аустенитные стали обладают наиболее высокой общей коррозионной стойкостью, что важно при транспортировке коррозионно-агрессивных сред, например в системах дезактивации.
Недостатки: дорогие, низкая теплопроводность.

Водно-химический режим

ВХР АЭС является одним из важнейших факторов, влияющих на надежную, экономичную и безопасную эксплуатацию АЭС.

ВХР – это совокупность мероприятий, регламентирующих качество рабочих сред с целью обеспечения надежной и экономичной эксплуатации оборудования, контактирующего с ними

Изучение ВХР

Основная цель - изучение **основ** физико-химических процессов протекающих в контурах АЭС, **организации ведения** ВХР контуров АЭС при различных режимах состояния энергоблока, **правил эксплуатации** установок очистки вод обоих контуров, **организации контроля** качества воды контуров АЭС.

На АЭС воды подразделяются

- по назначению или источнику : - **исходная природная** вода используемая в качестве исходного сырья на водоподготовительной установке;
- **добавочная (или подпиточная)** вода, направляемая в контур для восполнения утечек после обработки с применением физико - химических методов до определенного уровня;
- **турбинный конденсат** - получается в конденсаторах ПТУ и является основной частью питательной воды;
- **питательная вода** - вода, подаваемая в ПГ для замещения испаряющейся воды; - вода ПГ ПГ и реакторов - вода, находящаяся в элементах указанных агрегатов;

На АЭС воды подразделяются

- **продувочная** вода - выводимая из ПГ или первого контура вода на очистку или в дренаж для поддержания в воде контуров заданной концентрации примесей;
- **вода контуров** - вода, находящаяся в контуре;
- **охлаждающая или циркуляционная** вода используется в конденсаторах для конденсации отработавшего пара и в других охладителях;
- **вода опорожнения основных и вспомогательных контуров;**

На АЭС воды подразделяются

- вода бассейнов выдержки отработанных ТВС и перегрузки активной зоны; - дезактивационные и обмывочные воды;
- воды спец. прачечных и душевых;
- регенерационные и промывочные воды;
- фильтрат и декантат из хранилищ жидких отходов.

Источник: <http://5fan.ru/viewjob.php?id=20788>



Вода 1-го контура

- Границы 1-го контура - третий физический барьер на пути распространения радиоактивных веществ в помещения АЭС и ОС.
- Некипящая вода под давлением. Стабильность давления: компенсатор давления или компенсатор объема при его изменении в результате разогрева-расхолаживания в контуре. Для повышения давления вода в КД подогревается, для понижения- в паровое пространство КД вспрыскивается теплоноситель из холодной ветви.

(Если это не срабатывает подключается барботер, если давление в барботере больше допустимого, срабатывает предохранительная мембрана и радиоактивная среда выбрасывается в помещения защитной герметичной оболочки.



Вода 1-го контура

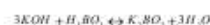
- При работе реактора приобретает высокую наведенную радиоактивность, даже если не происходит сверхнормативного нарушения герметичности оболочек ТВЭЛ, т.к. в воде присутствуют продукты коррозии, которые активируются в активной зоне.
- Теплоноситель 1-го контура – это не чистая вода, а вода с растворенной борной кислотой, хотя в дальнейшем будем её обозначать как «вода». Единица измерения концентрации: 1г борной кислоты на 1 кг воды, иногда используется концентрация чистого бора на кг воды (1г В/1 кг Н2О=5,72г Н3ВО3/1 кг Н2О).

ВХР 1-го контура АЭС с ВВЭР

- В активной зоне осуществляется управляемая цепная реакция деления ядер урана с выделением энергии и происходит передача теплоты от топлива теплоносителю 1-го контура. Регулирование мощности реактора и гашение реакции деления производится *деуия системами воздействия на реактивность*;
- Системой механического перемещения регулирующих стержней из поглощающего материала;
- Системой изменения концентрации борной кислоты в теплоносителе.
- На первом контуре АЭС с реакторами ВВЭР-1000 принят **аммиачно-борно-калиевый водный режим**, заключающийся в поддержании в воде первого контура определенной концентрации борной кислоты и нейтрализации ее смесью гидроксида калия и аммиака.

Аммиачно-борно-калиевый водный режим

- В настоящее время на АЭС с реакторами ВВЭР-1000 в качестве замедлителя нейтронов используется водный раствор борной кислоты. По расчетам необходимая концентрация борной кислоты составляет: **до 15г/л – при подъеме на мощность, и (0-10)г/л – на номинальном (предельно допустимом) уровне мощности.** Борная кислота хорошо растворяется в воде, практически не реагирует с конструкционными материалами, однако снижает pH воды первого контура. Оптимальное значение pH=9-10,4, но из-за сложности поддержания pH нормируемый показатель для него в первом контуре варьируется от 5,9 до 10,3.



Аммиачно-борно-калиевый водный режим

- При активации КОН по реакции: $^{41}\text{K}(n, \gamma) \rightarrow ^{42}\text{K}$ образуется ^{42}K с периодом полураспада 12,4 часа. С учетом малой распространенности ^{41}K (8,4% в смеси изотопов), а так же небольшого сечения активации можно предполагать, что образование в реакторе больших радиационных полей за счет ^{42}K исключено.
- При облучении бора нейтронами в реакторной воде образуется литий по реакции: $^{10}\text{B} + n \rightarrow ^7\text{Li} + \alpha$
- Происходит накопление лития и, таким образом, LiOH фактически участвует в нейтрализации борной кислоты вместе с КОН.

Аммиачно-борно-калиевый водный режим

- За рубежом на двухконтурных АЭС с реакторами охлаждаемыми водой под давлением (аналогами ВВЭР) для нейтрализации борной кислоты используют LiOH.
- Li имеет два изотопа ${}^6\text{Li}$ и ${}^7\text{Li}$. Сечение захвата ${}^6\text{Li}$ в несколько раз больше по сравнению с ${}^7\text{Li}$. Поэтому, если вместо KOH в первом контуре будем использовать природный литий, то по реакции:



будет образовываться тритий активность которого выше, чем у ${}^{42}\text{K}$. Поэтому при использовании LiOH активность будет больше, чем при использовании KOH.

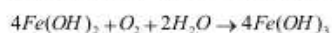
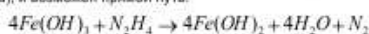
Утечка трития на АЭС Browns Ferry

- В США после утечки на АЭС в реку попало 750 л радиоактивной воды. Утечка радиоактивного вещества трития (сверхтяжелого водорода) произошла на АЭС Browns Ferry в городе Атланта (штат Алабама, США) из-за неисправности одного из вентиля. Компания - оператор станции Tennessee Valley Authority (TVA) заявила, что утечка была быстро устранена и не представляла угрозы для местного населения, сообщает информационный ресурс Chattanooga.com.
- Представитель компании Джим Холкинс признал, что содержание радиоактивных веществ в воде, которая попала в реку, превысило допустимые стандарты, однако заверил: "Анализ зоны вероятного заражения показал, что уровень трития укладывается в норму для питьевой воды. В том маловероятном случае, если тритий попадет в питьевые каналы, он практически сразу растворится в водоеме, а радиоактивное излучение снизится до допустимого уровня".



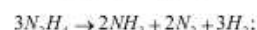
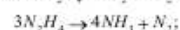
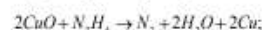
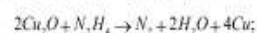
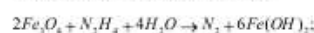
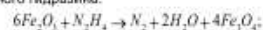
Аммиачно-борно-калиевый водный режим

- Радиолиз воды – разложение воды на водород и кислород. На практике не вызывает заметных изменений свойств воды, но продукты радиолиза интенсифицируют коррозию и может образоваться гремучая смесь.
- Особенность ВХР первых контуров подавление радиолиза за счет повышенной концентрации водорода (за счет радиолиза аммиака).
- Добавление гидразина (для связывания кислорода). В первую очередь гидразин реагирует с гидроксидом (косвенное поглощение кислорода), и возможен прямой путь:



Аммиачно-борно-калиевый водный режим

- Взаимодействие с другими продуктами коррозии и разложение избыточного гидразина:



Контролируемые показатели качества теплоносителя

- Нормируемые** – показатели качества теплоносителя, поддержание которых в диапазонах допустимых значений обеспечивает целостность топливных кассет активной зоны реактора, проектный ресурс оборудования первого контура и удовлетворительную радиационную обстановку при ремонте оборудования.
- Диагностические** – показатели качества теплоносителя, обеспечивающие получение дополнительной информации о причинах изменения нормируемых показателей или ухудшения ВХР. Для диагностических показателей установлены контрольные уровни.

Контролируемые показатели качества теплоносителя

- Отклонения диагностических показателей от контрольных уровней указывают на нарушения ВХР, которые при длительном воздействии могут привести к отклонениям нормируемых показателей. **Нарушениями ВХР являются отклонения нормируемых показателей качества теплоносителя от допустимых значений, не устраненные в течение установленного для каждого уровня времени, а также отклонения диагностических показателей, которые не устранены в течение 7 сут начиная с момента их обнаружения.**

Нормируемые показатели

Показатель	Значение
Водородный показатель, pH	5,9 – 10,3
Содержание кислорода	$\leq 0,005 \text{ мг/дм}^3$
Содержание водорода	$\leq 2,4 - 4,5 \text{ мг/дм}^3$
Суммарная молярная концентрация K, Li, Na	$3 \cdot 10^{-2} - 5 \cdot 10^{-1} \text{ ммоль/дм}^3$

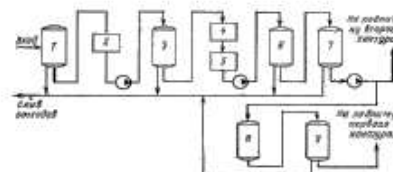
Диагностические показатели

Показатель	Значение
Массовая концентрация борной кислоты	$0 - 10 \text{ г/дм}^3$
Массовая концентрация хлоридов	$\leq 0,1 \text{ мг/дм}^3$
Массовая концентрация фторидов	$\leq 0,1 \text{ мг/дм}^3$
Массовая концентрация аммиака	$\leq 3 \text{ мг/дм}^3$
Массовая концентрация меди	$\leq 2 \cdot 10^{-2} \text{ мг/дм}^3$
Массовая концентрация железа	$\leq 5 \cdot 10^{-2} \text{ мг/дм}^3$
Массовая концентрация нефтепродуктов	$\leq 5 \cdot 10^{-4} \text{ мг/дм}^3$

Для поддержания чистоты воды в первом контуре на заданном уровне необходимо

- необходимо непрерывное выведение примесей, образующихся в результате коррозии металлов элементов анутрикорпусных конструкций. Примеси удаляются путем отбора части воды (продувки), ее очистки и возвращения в первый контур. Продувочная вода отбирается из трубопровода между главным циркуляционным насосом 7 и задвижкой. Продувочная вода проходит через охладитель продувки, питаемый насосом, ионообменные фильтры СВО-1 и возвращается в контур.
- Наряду с непрерывной продувкой существует **химводоочистка**. Вода первого контура (или протечи, дренажные воды и т.д.) собирается в бак активного конденсата и насосом направляется на выпарные установки и далее через фильтры в бак чистого конденсата. Очищенный конденсат насосом направляется для дегазации в деаэрактор подпитки и подпиточным насосом возвращается в реактор. При глубокой очистке активность конденсата не превышает 10 - 8 Км/кг. Выпар конденсата по специализации направляется в хранилище.

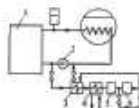
Принципиальная схема химводоочистки



- 1 - механический фильтр, 2—Бак осветленной воды;
3—катионитовый фильтр I ступени;
4—декарбонизатор, 5—Бак декарбонизированной воды;
6—катионитовый фильтр II ступени;
7—анионитовый фильтр I ступени;
8—катионитовый фильтр III ступени, 9—анионитовый фильтр II ступени

Безопасная очистка воды реактора на ионообменных фильтрах:

- 1 —реактор;
2—циркуляционный насос;
3 —регенеративный теплообменник;
4 —охлаждение конденсатом,
5 —катионитовый фильтр;
6 —анионитовый фильтр.



- По происхождению примеси в контурных водах подразделяются на: естественные, образующиеся в самом контуре, вводимые специально для коррекции водного режима реагенты. К основным показателям качества воды относят: общее солесодержание, удельную электропроводность, содержание грубодисперсных веществ, водородный показатель, окислительно-восстановительный потенциал среды, объемную активность, содержание растворенных газов и др. вещества, окисляемость, жесткость, щелочность, прозрачность и др.

Источник: <http://5fan.ru/wiewjob.php?id=20788>

ГЛОССАРИЙ

Как пример представления Глоссария в Портале приведем скрин-шот отдельных страниц для раздела темы «Ядерные материалы» и «Радиационное материаловедение», которые содержат 38 и 127 материалов, соответственно.

The screenshot displays the BeNET portal interface. The header includes the portal's name in Russian and Belarusian, along with a logo and flags. The main navigation bar contains links to the main page, information center, cooperation, and event journal. The left sidebar shows a tree view of the portal's content, with 'Radiation Materials Science' (Радиационное материаловедение) selected. The central area shows the 'Electronic Library' (Электронная библиотека) section, which includes search filters for language, sorting, and display settings. The main content area displays the 'Absorption' (Абсорбция) section, which describes the process of atoms dissolving in a metal. The right sidebar contains a 'State Selection' (Состояние выборки) section with search results and a 'Filter' (Фильтр) section with a search bar and buttons for 'Find' (Найти) and 'Set Question' (Задать вопрос).

The screenshot shows a detailed view of the 'Anisotropy' (Анизотропия) section. It includes a definition of anisotropy as the ability of some metals to exist in different structural and property states depending on temperature. Below this, there are several other entries: 'Austenite' (Аустенит), 'Ballistic mixing of atoms' (Баллистическое смешивание атомов), 'Bainite' (Бейнит), 'Vacancies' (Вакансии), 'Weldability' (Свариваемость), 'Graphite' (Графит), and 'Graphitization' (Графитизация). Each entry includes a brief description and a link to more details. The 'Bainite' entry includes a small image of a metal microstructure. The 'Graphitization' entry includes a list of two points: 1. The process of decomposing cementite into graphite and ferrite. 2. The appearance of thermal treatment, leading to the decomposition of cementite into ferrite and graphite.

Дефекты в кристаллах

Нарушение периодичности кристаллической структуры в кристалле. Дефекты в кристаллах принято классифицировать по характеру их измерения в пространстве на точечные (нульмерные), линейные (одномерные), поверхностные (двухмерные), объемные (трехмерные). [Подробнее...](#)

Деформация

Изменение формы какого-либо объекта в результате внешних воздействий или внутренних сил. [1].

[Подробнее...](#)

Диаграмма состояния

График, показывающий фазовое состояние сплава в зависимости от химического состава и температуры. [1].

[Подробнее...](#)

Диффузия

Проникновение в среду частиц одного вещества частиц другого вещества, происходящее вследствие теплового движения в направлении уменьшения концентрации другого вещества. [[Подробнее...](#)]

Длина пробега ионов

Длина пути, пройденная ионом в веществе до его полной остановки. [Подробнее...](#)

Доза ионов (флюенс)

Число ионов, прошедших через единицу поверхности образца за все время облучения, Φ [ион/см²]. [Подробнее...](#)

Доза облучения

Поток ионов, проходящих через единичную площадку вещества в единицу времени. Она определяется плотностью ионного тока и длительностью облучения: $Q = J \cdot t$. Обычно дозу выражают в мкЗл/см² или, что удобнее для практики, в ион/см², так как $N_s = Q/q = J \cdot t / (n \cdot e)$ [Подробнее...](#)

Жаропрочность

Способность материала сопротивляться приложенным силам при высоких температурах. [Подробнее...](#)

Жаростойкость

Способность металла сопротивляться окислению при высоких температурах. [Подробнее...](#)

Жесткость механическая

Способность тела сопротивляться деформации при данной величине нагрузки. [Подробнее...](#)

Износ

Отрыв частичек материала с поверхности в результате трения. [Подробнее...](#)

Износостойкость

Способность материала сопротивляться износу. [Подробнее...](#)

Интенсивность облучения

Параметр, характеризующийся числом смещений на атом в единицу времени, равным числу стабильных к атерической рекомбинации пар Френкеля, образуемых в единицу времени на каждый решеточный атом. [Подробнее...](#)

Ионная имплантация

Метод внедрения ускоренных ионов в материалы (металлы, полупроводники, диэлектрики) с целью модификации их структуры и эксплуатационных свойств. Имплантируемые ионы делят на: - легкие: H<20 (B, N, O); - средние: 20<H<60 (Si, P, S, Ar); - тяжелые: H>60 [Подробнее...](#)

Каналирование

В монокристаллах бомбардирующие ионы могут перемещаться по каналам, если падающий пучок ионов параллелен одному из кристаллографических направлений с низкими индексами Миллера. Движение ионов строго по центру канала имеет малую вероятность, однако может [Подробнее...](#)

Карбиды

Химические соединения металла с углеродом. К. урана. Соединения урана с углеродом. Обладают электропроводностью, высокой твердостью, термической и химической стабильностью. Карбиды урана обогащенные ураном-235, используются в качестве ядерного топлива. [Подробнее...](#)

Коагуляция

Сливание частиц дисперсной фазы и увеличение их размеров. [Подробнее...](#)

Конструкционные материалы

К свойствам конструкционных материалов, работающих в условиях радиационных облучений, предъявляются следующие требования: 1) высокая механическая прочность и пластичность; 2) высокая термическая стабильность (теплостойкость); 3) высокая коррозионная стойкость. [Подробнее...](#)

Коррозия

Разрушение металла в результате химического или электрохимического воздействия с окружающей средой. К. под напряжением. Вид коррозии металла, находящегося под механическим напряжением, вследствие образования в нем микронеплотностей. нежесткокристаллитная К. [Подробнее...](#)

Кристалл

Твердое тело, обладающее трехмерной периодической атомной или молекулярной структурой и имеющее при равновесных условиях образования форму правильного многогранника. [Подробнее...](#)

Микроструктура

Строение материала, выявляемое с помощью микроскопа. [Подробнее...](#)

Микротвердость

Твердость отдельных участков микроструктуры материала. [Подробнее...](#)

Микрошиф

Объект для изучения микроструктуры. [Подробнее...](#)

Монокристалл

Кристалл, имеющий во всем объеме единую кристаллическую решетку. [Подробнее...](#)

Коагуляция

Сливание частиц дисперсной фазы и увеличение их размеров. [Подробнее...](#)

Конструкционные материалы

К свойствам конструкционных материалов, работающих в условиях радиационных облучений, предъявляются следующие требования: 1) высокая механическая прочность и пластичность; 2) высокая термическая стабильность (теплостойкость); 3) высокая коррозионная стойкость. [Подробнее...](#)

Коррозия

Разрушение металла в результате химического или электрохимического воздействия с окружающей средой. К. под напряжением. Вид коррозии металла, находящегося под механическим напряжением, вследствие образования в нем микронеплотностей. нежесткокристаллитная К. [Подробнее...](#)

Кристалл

Твердое тело, обладающее трехмерной периодической атомной или молекулярной структурой и имеющее при равновесных условиях образования форму правильного многогранника. [Подробнее...](#)

Микроструктура

Строение материала, выявляемое с помощью микроскопа. [Подробнее...](#)

Микротвердость

Твердость отдельных участков микроструктуры материала. [Подробнее...](#)

Микрошиф

Объект для изучения микроструктуры. [Подробнее...](#)

Монокристалл

Кристалл, имеющий во всем объеме единую кристаллическую решетку. [Подробнее...](#)

Первично выбитый атом (ПВА)

[Подробнее...](#)

перегрев

Рост зерна аустенита при завышенной температуре нагрева или выдержки в процессе термообработки, приводящий к снижению механических свойств стали после охлаждения. [Подробнее...](#)

Пережог

Окисление граней зерен перепретой стали, приводящее к резкому снижению механической прочности. Брак неисправимый. [Подробнее...](#)

Переход фазовый

Переход вещества из одной фазы в другую при изменении внешних условий. фазовый П. первого рода. фазовый переход, сопровождающийся скачкообразным изменением внутренней энергии, энтропии и объема. фазовый П. второго рода. фазовый переход, при котором [Подробнее...](#)

перлит

Однородная механическая смесь феррита и цементита. П. зернистый. Перлит, в котором цементит имеет форму зерен, распределенных в ферритной основе. П. пластичный. Перлит, в котором феррит и цементит имеют форму пластинок, расположенных слоями. [Подробнее...](#)

Плавление

Переход вещества из твердого состояния в жидкое, т.е. переход от дальнего порядка к ближнему порядку. [Подробнее...](#)

Пластичность

Свойство твердых тел необратимо изменять свои размеры и форму под действием механических сил. [Подробнее...](#)

Ползучесть

Медленная непрерывная пластическая деформация твердого тела под действием постоянной нагрузки или механического напряжения. [Подробнее...](#)

Поликристалл

Вещество, состоящее из мелких кристаллов. [Подробнее...](#)

Полиморфизм (аллотропия)

Способность некоторых веществ существовать в состоянии с различной кристаллической структурой [Подробнее...](#)

Порядок

ближний П. Упорядоченное расположение частиц внутри малых объемов вещества, например в расплавах. дальний П. Регулярное периодическое расположение частиц вещества по всему занимаемому им объему, например в кристаллах. [Подробнее...](#)

Предел

П. выносливости. Наибольшая величина периодически меняющегося механического напряжения в материале, которая не приводит к разрушению при сколь угодно большом числе циклов. П. пропорциональности. Наибольшее механическое напряжение, при превышении которого [Подробнее...](#)

Проективный пробег ионов

Расстояние, пройденное внедренным ионом вглубь мишени в направлении, перпендикулярном ее поверхности. [Подробнее...](#)

Прочность

Свойство твердых тел сопротивляться разрушению под действием внешних сил. длительная П. Разрушение материала спустя лишь некоторое время после приложения нагрузки, например, в результате растяжения при высоких температурах. конструктивная П. Комплекс св [Подробнее...](#)

Радиационная коррозия

Скорость коррозии урана в теплоносителях увеличивается с ростом температуры, интенсивности облучения и времени пребывания в реакторной среде. [Подробнее...](#)

Радиационная повреждаемость

Процесс нарушения упорядоченного расположения атомов в решетке металла в результате столкновения быстрых нейтронов с атомами металла. [Подробнее...](#)

Радиационная ползучесть

Облучение нейтронами существенно (в 60-100 раз) повышает скорость ползучести. Конструкционные узлы и детали современных ядерных энергетических установок находятся в напряженном состоянии и при этом работают при повышенных температурах. Поэтому одной и [Подробнее...](#)

Радиационная стабильность

Сопротивление изменению формы и объема в процессе эксплуатации. [Подробнее...](#)

Радиационная стойкость

Свойство стабильности структуры и эксплуатационных характеристик материалов в условиях жестких облучений. Наибольшее влияние структурные изменения от облучения оказывают на механические свойства и коррозионную стойкость. [Подробнее...](#)

Радиационно-защитный оптический материал

Материал, обладающий высоким линейным коэффициентом ослабления ионизирующего излучения и позволяющий наблюдать за объектом в радиационном поле без соматического и генетического ущерба для наблюдателя. [Подробнее...](#)

Радиационно-индуцированная сегрегация

Перераспределение легирующих элементов на отдельных структурных участках при воздействии облучения. [Подробнее...](#)

Радиационно-индуцированные фазовые превращения

Формирование новой фазы при облучении. [Подробнее...](#)

Радиационно-оптическая устойчивость

Способность оптического материала сохранять высокую пропускную способность в видимой области спектра в условиях облучения ионизирующим излучением. [Подробнее...](#)

Радиационно-стигулированные процессы

Процессы, вызванные образованием в облученном твердом теле радиационных дефектов. [Подробнее...](#)

Радиационно-стойкие стекла

Стекла, способные сохранять высокую пропускную способность в видимой области спектра в условиях их облучения ионизирующим излучением. [Подробнее...](#)

Радиационно-усиленная (стигулированная) диффузия

Механизм, способствующий ускоренному достижению термодинамически равновесного состояния в системе, вносит вклад в инициирование и интенсификацию структурно-фазовых процессов в облученных металлических материалах. [Подробнее...](#)

Радиационное дефектообразование

Процесс взаимодействия между излучением и твердым телом, приводящий к выбиванию атома из узла кристаллической решетки. [Подробнее...](#)

Радиационное материаловедение

Наука, изучающая влияние облучения высокоэнергетическими частицами различной природы и энергии на свойства материалов, главным образом, на служебные характеристики материалов ядерных устройств [Подробнее...](#)

Радиационное охрупчивание

Процесс, приводящий к снижению критической температур хрупкости в области более высоких температур, ограничивая безопасную область температур эксплуатации материалов и уменьшающий работу разрушения в вязкой зоне температурной зависимости ударной вязкости [Подробнее...](#)

Радиационное распухание (разбухание)

Изменение объема материала за счет образования пор $\Delta V/V$. Пример: кубик чистого никеля с размером каждой грани 1 см после облучения в реакторе флюксом 10^{22} н/см² изменится до размера 1,06 см на сторону, вызвав изменение объема на 20 % [Подробнее...](#)

Радиационное упрочнение

Эффект роста предела текучести под облучением. Относительно природы явления радиационного упрочнения к настоящему времени более или менее утвердились два объяснения, в одном из которых упрочнение связывается с тем, что создаваемые при облучении радиации [Подробнее...](#)

Радиационное формоизменение

Изменение линейных размеров деталей реактора при облучении. Является наиболее важным фактором с точки зрения радиационной стойкости графита, поскольку именно неравномерные размерные изменения по толщине графитовых деталей, обусловленные градиентами ней [Подробнее...](#)

Радиационные дефекты

Дефекты кристаллической структуры, образовавшиеся при их облучении потоками частиц или квантов электромагнитного излучения [Подробнее...](#)

Радиационные технологии

Методы и приемы преобразования вещества и происходящих в нем процессов с помощью ионизирующего излучения и электромагнитных полей. [Подробнее...](#)

Радиационный отжиг

Отжиг облучением, уменьшает концентрацию дефектов и частично восстанавливает свойства металла. Облучение при температуре выше температуры рекристаллизации - высокотемпературное облучение сопровождается радиационным отжигом, который способствует восстановлению [Подробнее...](#)

Радиационный рост

Искажение формы образца под облучением при постоянном объеме. Пример: цилиндрический урановый образец длиной 10 см и диаметром 1 см после облучения флюенсом 10^{20} н/см² увеличивает длину до 30 см и снижает размер диаметра до 0,58 см, оставшаяся объем не изменился [Подробнее...](#)

Распад твердого раствора

Нестабильность твердого раствора в зависимости от условий (температура, тип, энергия и плотность потока бомбардирующих частиц). [Подробнее...](#)

Растворы твердые

Фазы переменного состава, в которых атомы различных химических элементов образуют общую кристаллическую решетку, тип которой соответствует решетке одного из элементов. твердые Р. с неограниченной растворимостью. Фазы, в которых концентрация может изменяться [Подробнее...](#)

Расширение тепловое

Изменение линейных размеров тел при изменении температуры. [Подробнее...](#)

Резины

Эластичные многокомпонентные материалы на основе каучука. Эластичность резин, т.е. способность к очень большим (500 - 800%) обратимым деформациям, является наиболее ценным их свойством. Резины имеют очень низкий модуль упругости ($E = 1...10$ МПа) и легко [Подробнее...](#)

Релаксация напряжений

Самопроизвольное уменьшение механических напряжений в деформированных телах, происходящее с течением времени, которое не сопровождается деформацией. [Подробнее...](#)

Свариваемость

Способность металлов соединяться при помощи сварки. [Подробнее...](#)

Сверхпроводимость

Явление скачкообразного падения до нуля электросопротивления некоторых веществ при низких температурах. [Подробнее...](#)

Сверхструктура

Структура твердых растворов замещения, в которых осуществляется дальний порядок в расположении атомов разного сорта. [Подробнее...](#)

Сетка цементитная

Структура заэвтектоидных сталей, в которой цементит располагается по границам зерен перлита. [Подробнее...](#)

Смещения на атом (с.н.а.)

Число смещений, претерпеваемых каждым атомом материала за время облучения. Этот параметр характеризует не только общую дозу облучения, но и эффективность создания повреждений при данном виде облучения. [Подробнее...](#)

Соединение

Химическое С. в сплавах. Фаза, состоящая из разнометаллических атомов, образующих общую кристаллическую решетку, тип которой отличается от типа решеток входящих компонентов и имеющей постоянный химический состав. интерметаллическое С. Химическое соединение, [Подробнее...](#)

Сорбит

Структура стали, состоящая из феррита и цементита размером частиц около $1 \cdot 10^{-4}$ мкм, имеющая твердость 260-300 НВ, получаемая при охлаждении аустенита со скоростью 50-100 град/с или при высоком отпуске закаленной стали. [Подробнее...](#)

Сорбция

Поглощение вещества жидкими или твердыми телами. [Подробнее...](#)

Спектр первично-выбитых атомов

Распределение первично выбитых атомов по энергиям. [Подробнее...](#)

Сплав

Металл, состоящий из равноионных атомов. металлокерамический твердый С. Инструментальный материал, состоящий из твердых карбидов, вольфрама, титана, тантала и мягкого кобальта, получаемый методом порошковой металлургии. минералокерамический твердый С [Подробнее...](#)

Стабилизация аустенита

Свойство остаточного аустенита становится более устойчивым к распаду в процессе выдержки при комнатной температуре. [Подробнее...](#)

Сталь

Название большой группы сплавов железа с углеродом в количестве не более 2,14%. доэвтектоидная С. Сталь, имеющая в равновесном состоянии структуру, состоящую из феррита и перлита. заэвтектоидная С. Сталь, имеющая в равновесном состоянии структуру, состо [Подробнее...](#)

Старение

1. Вид термической обработки с целью повышения прочности за счет выделения в структуре дисперсных твердых частиц. 2. Изменение свойств сплава с метастабильной структурой во времени. 3. Процесс выделения твердых частиц из твердого раствора при с [Подробнее...](#)

Стекло металлическое

Металлический сплав в аморфном состоянии, образовавшийся при сверхбыстром охлаждении расплава. [Подробнее...](#)

Страглинг

Величина рассеяния или отклонения проекций пробегов от среднего значения. [Подробнее...](#)

Сульфидирование

Процесс насыщения поверхности детали серой с целью повышения коррозионной стойкости. [Подробнее...](#)

Твердение дисперсионное

Повышение твердости металла в результате выделения в нем каких-либо мельчайших твердых частиц. [Подробнее...](#)

Твердость

Сопротивление материала местной пластической деформации вдавливанием. [Подробнее...](#)

Текстура

Анизотропия свойств вещества, возникающая под действием механических, тепловых, магнитных или электрических воздействий. кристаллическая Т. Преимущественная ориентация кристаллов в поликристаллическом веществе. [Подробнее...](#)

Текучесть

Свойство тел пластически деформироваться под действием механических напряжений. [Подробнее...](#)

Тело

Микроскопическая система, размеры которой во много раз превышают расстояния между составляющими ее микрочастицами. аморфное Т. Тело, не имеющее правильного, периодического расположения составляющих его микрочастиц. анизотропное Т. Тело, свойства которого [Подробнее...](#)

Температура

Физическая величина, характеризующая степень нагрева системы, пропорциональная средней кинетической энергии хаотического движения частиц, составляющих систему. Т. кристаллизации. Температура, при которой происходит фазовый переход из жидкого состояния в [Подробнее...](#)

Термообработка

Комплекс операций нагрева до определенной температуры, выдержки и охлаждения с определенной скоростью металлических сплавов с целью получения требуемых свойств за счет изменения структур. [Подробнее...](#)

Термостойкость

Способность материала сопротивляться возникновению трещин при циклическом изменении температуры. [Подробнее...](#)

Титанирование

Вид химико-термической обработки, состоящий в насыщении поверхности детали титаном. [Подробнее...](#)

Трещина

Нарушение сплошности материала с образованием поверхности раздела. закалочные Т. Трещины, возникшие в процессе чрезмерно быстрого охлаждения при закалке. горячие Т. Трещины, возникающие в наплавленном металле шва при сварке. холодные Т. Трещины в около [Подробнее...](#)

Тростит

Структура стали, состоящая из феррита и цементита с размером частиц цементита примерно 1.10^{-5} мкм, образовавшаяся при непрерывном охлаждении со скоростью 100 - 150 град/с. [Подробнее...](#)

Упрочнение

Повышение сопротивления металла пластической деформации путем затруднения движения дислокаций или их размножения, достигаемое механической или термической обработкой. [Подробнее...](#)

Упругость

Свойство тел изменять форму и размеры под действием нагрузок и самопроизвольно восстанавливать форму и размеры при прекращении внешних воздействий. [Подробнее...](#)

Усталость

Изменение свойств материала при длительном воздействии периодически изменяющейся во времени напряженности, приводящее в результате к возникновению трещины и разрушению. [Подробнее...](#)

Фаза

Химически однородная часть сплава, отделенная от других поверхностью раздела. Различают фазы: -термически стабильные; -радиационно-стимулированные; -радиационно-индуцированные фазы: -радиационно-модифицированные (превращения). [Подробнее...](#)

Феррит

1. Твердый раствор внедрения углерода в альфа-железе. 2. Сложный оксид железа, являющийся ферромагнетиком и сочетающий в себе свойства ферромагнетика и полупроводника или ферромагнетика и диэлектрика. [Подробнее...](#)

Фосфотирование

Насыщение поверхности детали фосфором с целью повышения коррозионной стойкости. [Подробнее...](#)

Хладноломкость

Свойство некоторых металлов снижать ударную вязкость при низких температурах. [Подробнее...](#)

Хрупкость

Свойство материалов разрушаться при небольших деформациях под действием напряжений, уровень которых ниже предела текучести. отпускная Х. Хрупкость, возникающая при отпуске некоторых легированных сталей. [Подробнее...](#)

Цементит

Название карбида железа в сплавах железа с углеродом. Ц. первичный. Цементит, выделяющийся из расплава в процессе кристаллизации. Ц. вторичный. Цементит, выделяющийся из аустенита. Ц. третичный. Цементит, выделяющийся из феррита. [Подробнее...](#)

Цианирование

Одновременное насыщение поверхности детали углеродом и азотом. [Подробнее...](#)

Цирконий

Химический элемент (металл), слабо поглощающий тепловые нейтроны, широко используется в атомном машиностроении. [Подробнее...](#)

Чугун

Сплав железа с углеродом, содержащий от 2,14 до 6,67% углерода. белый Ч. Чугун, в котором углерод содержится в виде цементита. высокопрочный Ч. Чугун с графитом шаровидной формы, получаемый при введении магния. ковкий Ч. Чугун с хлопьевидной формой графита [Подробнее...](#)

Цианирование

Одновременное насыщение поверхности детали углеродом и азотом. [Подробнее...](#)

Цирконий

Химический элемент (металл), слабо поглощающий тепловые нейтроны, широко используется в атомном машиностроении. [Подробнее...](#)

Чугун

Сплав железа с углеродом, содержащий от 2,14 до 6,67% углерода. Белый Ч. Чугун, в котором углерод содержится в виде цементита. высокопрочный Ч. Чугун с графитом шаровидной формы, получаемый при введении магния. ковкий Ч. Чугун с хлопьевидной формой графа [Подробнее...](#)

Эвтектика

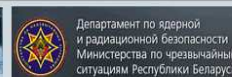
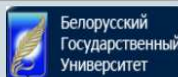
1. Однородная механическая смесь кристаллов, образовавшаяся при кристаллизации из жидкого состояния. 2. Сплав такой концентрации, температура кристаллизации которого наименьшая в данной системе. [Подробнее...](#)

Эвтектиод

Однородная механическая смесь кристаллов, образовавшаяся при распаде твердого раствора. [Подробнее...](#)

Элемент

Химический символ вещества, состоящего из одноименных атомов, легированный Э. Элемент, специально введенный в сплав для получения требуемых свойств. Э. раскислители. Элементы, обладающие большим сродством к кислороду, применяются для удаления кислорода из [Подробнее...](#)



eLab-Science/BelNET, 2014-2015 гг.

Проект финансируется Министерством образования Республики Беларусь в рамках задания 1.35 ГПНИ "Информатика и космос, научное обеспечение безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций"

Замечания и предложения по структуре сайта просьба присылать Светлане Сиховой (sytova@inp.bsu.by)

Замечания по функционированию программного обеспечения сайта просьба присылать Аркадию Мазаньку (arkadi@inp.bsu.by)



Электронный портал ядерных знаний учреждений образования Республики Беларусь Belarusian Nuclear Education and Training Portal - BelNET

(государственный проект)



[Главная страница](#) [Информационный центр](#) [Сотрудничество](#)

[Журнал событий](#)

Навигация

- Основные принципы
 - Глоссарий
 - Термины и определения
 - Ядерное образование и обучение
 - Ядерная физика
 - Ядерная энергетика
 - Ядерно-физические методы
 - Ядерная и радиационная безопасность
 - Регистрация и анализ ионизирующих излучений
 - Ядерные материалы**
 - Ядерная и радиохимия
 - Радиационное материаловедение
 - Водно-химические режимы АЭС
 - Менеджмент ядерных знаний
 - Новости
 - Наука



Электронная библиотека



Основные принципы » Глоссарий » Термины и определения » Ядерное образование и обучение » Ядерные материалы

Язык оригинала	Все указанные языки
☐ Наименование	А В С D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z A B B T D E E Ж З И
☐ Авторы	Й К Л М Н О П Р С Т У Ф Х Ц Ч Ш Щ Ъ Ы Ъ Ю Я 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 (\ / [- _ + * . !

МОХ-топливо (Mixed Oxides)

Смешанное оксидное топливо, представляющее собой смесь оксидов урана и плутония-239 (UO₂+PuO₂). [Подробнее...](#)

Аффинаж

Очистка урана. Предполагает растворение закиси урана U₃O₈ в азотной кислоте. Уран при этом переходит в форму растворимого соединения, которое очищают методом экстракции, реже - осаждения. Конечным продуктом аффинажной технологии является либо закись ура [Подробнее...](#)

Высокообогащенный уран

Уран с обогащением 20% и выше. [Подробнее...](#)

Гексафторид урана

Газообразное соединение UF₆, - единственное устойчивое газообразное соединение урана, используемое для обогащения урана изотопом ²³⁵U, наиболее удобная форма для обогащения урана. Обогащение осуществляется методом газовой термодиффузии или центрифугиров [Подробнее...](#)

Состояние выборки

Найдено записей: 38
Страница: 1 из 1

Настройки

☒ Размер страницы: 172

172
[Установить](#)

☒ Сортировка:

Наименование ▲
Идентификатор ▲
Наименование ▲
Идентификатор ▲
Идентификатор ▼
[Установить](#)

☒ фильтр: ☒ Вкл/Вкл
фильтра нет

Поиск
☒ Портал ☐ Google
[Найти](#)

[Задать вопрос](#)

[Вход, регистрация](#)

Гидрометаллургическая переработка руды

Состоит в ее дроблении, кислотном выщелачивании, сорбционным или экстракционным извлечении U из осветленных растворов или пульп и получении очищенной закиси-оксида урана U3O8. Для руд, бедных ураном и легких для выщелачивания (особенно в трудных для горн [Подробнее...](#)

Делящееся вещество

Вещество или материал, содержащие нуклиды, способные делиться на несколько осколков при поглощении нейтрона или самопроизвольно. [Подробнее...](#)

Делящиеся ядерные материалы

Материалы или вещества, содержащие делящиеся радионуклиды и способные образовывать (при определенных условиях) критическую массу. [Подробнее...](#)

Диоксид урана

Химически и термически устойчивое (температура плавления 2760°С) соединение урана с кислородом (UO2), что обусловило его выбор в качестве ядерного топлива легководных реакторов. Самое распространенное топливо для ядерных энергетических установок, в кото [Подробнее...](#)

Желтый кек

Закись урана U3O8. [Подробнее...](#)

Закись-окись урана

Соединение, имеющее несколько модификаций в зависимости от условий приготовления; образуется при окислении диоксида урана и при прокаливании на воздухе любого оксида урана, гидрата оксида или соли урана и летучего основания или кислоты. [Подробнее...](#)

Значимое количество ядерного материала

Изначальное количество ядерного материала, опасность переключения которого на незаъявленные цели должна быть своевременно предотвращена в интересах нераспространения; МАГАТЭ считает 25 кг урана-235 и 8 кг плутония-239 значимым количеством ядерного матери [Подробнее...](#)

Зона баланса материалов

По определению МАГАТЭ, зона в/вне установки, в которой: а) количество ядерного материала при каждом перемещении в/из зоны баланса материалов может быть определено; б) фактически наличное количество материала в каждой зоне баланса материалов может быть, [Подробнее...](#)

Карбиды

Химические соединения металла с углеродом. К. урана. Соединения урана с углеродом. Обладают электропроводностью, высокой твердостью, термической и химической стабильностью. Карбиды урана обогащенные ураном-235, используются в качестве ядерного топлива. [Подробнее...](#)

Керамическое топливо

Ядерное топливо, состоящее из тугоплавких соединений, например, оксидов, карбидов, нитридов. [Подробнее...](#)

Низкообогащенный уран

Уран с содержанием изотопа урана-235 не более 20%. Низкообогащенный уран с содержанием изотопа урана-235 от 2% до 5% используется при производстве топлива для АЭС. [Подробнее...](#)

Обогащенное ядерное топливо

Ядерное топливо, в котором содержание делящихся нуклидов больше, чем в исходном природном сырье. [Подробнее...](#)

Обогащенный уран

Уран, в котором соотношение урана-235 (к U-238) выше природного (0,7 ‰). Уран реакторного качества обычно обогащается приблизительно до 3,5–4 ‰ U-235, а содержание U-235 в оружейном уране составляет более 90 ‰. [Подробнее...](#)

Оружейные делящиеся материалы

Материалы или вещества, из которых могут быть изготовлены или были изготовлены компоненты ядерных зарядов. Оружейными делящимися материалами являются высокообогащенный уран и оружейный плутоний. [Подробнее...](#)

Отработавшее ядерное топливо

Облученное ядерное топливо, дальнейшее использование которого в ядерном реакторе не предусматривается. [Подробнее...](#)

Плутоний

Радиоактивный химический элемент, атомный номер 94, массовое число наиболее долгоживущего изотопа 244. Изотоп плутония – плутоний-239 – используется в ядерной энергетике в качестве ядерного топлива. [Подробнее...](#)

Поглотитель нейтронов

Материал, с которым нейтроны интенсивно взаимодействуют посредством реакций, приводящих к исчезновению нейтронов как свободных частиц. [Подробнее...](#)

Поглощающий элемент

Элемент ядерного реактора, содержащий материалы - поглотители нейтронов и предназначенный для управления реактивностью реактора. [Подробнее...](#)

Природный уран

Уран, содержащийся в природе, с содержанием изотопов U-235 около 0,7 %, может использоваться как топливо в реакторах с тяжелой водой в качестве замедлителя. [Подробнее...](#)

Производство топлива

Производство ядерного топлива, обычно в форме керамических таблеток, заключенных в металлические трубки, которые впоследствии собираются в топливные сборки. [Подробнее...](#)

Радий

Продукт радиоактивного распада урана, часто обнаруживаемый в урановой руде. Он имеет несколько радиоактивных изотопов. Радий-226 при распаде образует радон-222. [Подробнее...](#)

Радиоактивные вещества

Не относящиеся к ядерным материалам вещества, испускающие ионизирующее излучение. [Подробнее...](#)

Радиоактивные отходы

Ядерные материалы и радиоактивные вещества, дальнейшее использование которых не предусматривается. [Подробнее...](#)

Расщепляющиеся материалы

Ядерные материалы, такие как обогащенный уран-235 и плутоний-239, которые используются для изготовления ядерного оружия. [Подробнее...](#)

Смешанное оксидное топливо

Ядерное топливо, состоящее из смеси диоксидов урана и плутония. [Подробнее...](#)

Смешанное топливо (плотные виды)

Нитриды, карбиды, металлические сплавы и композиционные топливные материалы на их основе. [Подробнее...](#)

Специальный ядерный материал

Плутоний-239, уран-233, уран, обогащенный изотопами уран-235, любой материал, содержащий вышеуказанные изотопы или любой другой материал, способный выделять существенное количество ядерной энергии, который иногда может определяться как специальный ядерный материал. [Подробнее...](#)

Теплоноситель

Вещество (газ, воздух, углекислый газ, вода, водяной пар, органическая жидкость, жидкий металл, расплав солей), циркулирующее через активную зону, чтобы вынести тепло, генерируемое в ней делением и радиоактивным распадом, к парогенераторам или теплообменникам. [Подробнее...](#)

Торий

Химический радиоактивный элемент (металл) с атомным номером 90 и массой наиболее распространенного и устойчивого изотопа 232 (всего в природе встречается восемь изотопов тория). [Подробнее...](#)

Уран

Является плотным, твердым и малопластичным металлом. Многие его свойства и особенно такие важные, как нейтронно-физические, сильно зависят от наличия в нем примесей, поэтому к чистоте урана предъявляются особо высокие требования. У. металлический. Яде [Подробнее...](#)

Урановое оксидное топливо

Ядерное топливо, состоящее из спеченных при высоком давлении и температуре таблеток диоксида урана с обогащением по изотопу урана-235 2-4 %, применяется для легководных реакторов. [Подробнее...](#)

Функциональные ядерные материалы

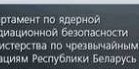
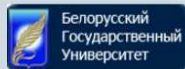
Материалы, непосредственно участвующие в ядерном топливном цикле. [Подробнее...](#)

Ядерное топливо (горючее)

Вещество, которое используется в ядерных реакторах для осуществления ядерной цепной реакции деления. Ядерное топливо для энергетического реактора выбирается с учетом его ядерных и химических свойств, а также стоимости. К делющимся веществам относятся и [Подробнее...](#)

Ядерные материалы

Материалы или вещества, содержащие или способные воспроизвести делющиеся ядерные материалы или вещества. [Подробнее...](#)



eLab-Science/BelNET, 2014–2015 гг.

Проект финансируется Министерством образования Республики Беларусь в рамках задания 1.35 ГПНИ "Информатика и космос, научное обеспечение безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций"

Замечания и предложения по структуре сайта просба присылать Светлане Ситовой (sytova@ipr.bau.by)

Замечания по функционированию программного обеспечения сайта просба присылать Аркадию Казаньку (arkadi@ipr.bau.by)

ИОНИЗИРУЮЩЕЕ ИЗЛУЧЕНИЕ. ПОЛЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

ВВЕДЕНИЕ

Общие замечания

В данном очерке, подготовленном для Портала ядерных знаний, предлагается толкование основных понятий и представлений, связанных с ионизирующим излучением. Их формулировки даются, главным образом, в соответствии с нормативным документом [Б1], предшествовавшим ему документом [Б2], Физической энциклопедией [Б3] и используются в научно-методической и учебной литературе [Б4-7]. В некоторых случаях предлагаются уточненные формулировки, подкрепляемые соответствующими рассуждениями. Понятия и термины вводятся в порядке, диктуемом, в первую очередь, их физическим смыслом в той степени, в какой он понимается автором. Поэтому их последовательность отличается от принятой в [Б1], или в [Б2], которая, как можно догадаться, выстроена на основании формальных требований к составлению нормативного документа и возникающей при этом его внутренней логики. В связи с этим формулировки некоторых понятий и представлений в тексте статьи также приходится изменять. В случае существенного отличия даваемого здесь определения от нормативного, дается соответствующий комментарий.

Термины, употребляемые в тексте впервые, выделяются курсивным шрифтом. Их название, как правило, дублируется в фигурных скобках по-английски в написании слов, принятом в британском варианте английского языка¹. Формулировки определений, рекомендуемых к применению, выделяются подчеркнутым шрифтом. Жирным шрифтом выделяются важнейшие определения и результаты, на которые надо обратить особое внимание. Синим шрифтом в тексте выделяются понятия, которые, по мнению автора, должны быть более полно раскрыты в других частях Портала.

В разделе 2 рассматриваются определение ионизирующего излучения и классификация его видов. В разделах 3,4 рассматриваются понятия источника и поля ионизирующего излучения и вводятся их характеристики. При этом предпринята попытка гармонизировать между собой несколько отличающиеся методические подходы, используемые в [Б4,5] и [Б6,7] для определения характеристик поля ионизирующего излучения. В заключение обсуждаются рекомендации МАГАТЭ и МКРЗ [Б8-12] по применению терминологии в данной области.

В список использованных источников включен ныне отмененный ГОСТ СССР [Б2], в котором, в отличие от [Б1], приведены формулировки некоторых терминов, используемых в [Б1], в научной и учебной литературе. Поэтому этот ГОСТ не утратил своего научно-методического значения.

¹ В [Б2] приведены дословные переводы терминов на английский, немецкий и французский языки. В некоторых случаях перевод терминов на английский язык в [Б2], по мнению автора не соответствуют практике словоупотребления в научной литературе. В этой связи в данном тексте приводятся соответствующие отсылки на англоязычную литературу.

Используемые обозначения

Буквой E будем обозначать кинетическую энергию частиц, обладающих массой. Энергия покоя частиц с массой m будем обозначать $\mathcal{E}_0 = mc^2$, c – электродинамическая постоянная (скорость света в вакууме). Сумма

$$\mathcal{E} = E + \mathcal{E}_0 \quad (\text{Б1.1})$$

является полной энергией свободной частицы. Для фотонов $\mathcal{E}_0 = 0$, поэтому $\mathcal{E} = E$, и поэтому можно использовать букву E и для обозначения энергии фотона. В ультрарелятивистском приближении $E \gg \mathcal{E}_0$, поэтому в расчетах можно принимать $\mathcal{E} \approx E$. В дальнейшем величину E будем называть просто энергией частиц и тем самым отличать ее от полной энергии (Б1.1).

В ряде случаев удобно пользоваться безразмерной величиной

$$\lambda = \frac{\mathcal{E}_0}{E}, \quad (\text{Б1.2})$$

где $\mathcal{E}_0$ – энергия покоя частиц вещества, с которыми происходит взаимодействие частиц ионизирующего излучения (чаще всего, с электронами). Величина (Б1.2) в радиационной защите носит название волнового числа [Б6]. Не следует ее путать с понятием волнового числа, используемым в оптике. Для фотонного ионизирующего излучения

$$E = hc/\lambda_\gamma, \quad (\text{Б1.3})$$

где h – постоянная Планка, а λ_γ – длина волны фотона. В этом случае (Б1.2) представляет собой не что иное, как величину длины волны фотона, выраженную в единицах комптоновской длины волны частицы вещества $\lambda_C = hc/\mathcal{E}_0$: $\lambda = \lambda_\gamma/\lambda_C$, с которой фотон взаимодействует. В случае частиц ионизирующего излучения, обладающих массой, параметр (Б1.2) имеет смысл величины, обратной кинетической энергии частицы излучения, выраженной в единицах энергии покоя частицы вещества, с которой частица излучения взаимодействует с наибольшей вероятностью. Для оценки величины энергии фотонов в эВ по длинам их волн (или наоборот), удобно использовать в (Б1.3) значение произведения hc в единицах эВ·м:

$$hc \approx 1,24 \text{ эВ} \cdot \text{мкм} = 1,24 \text{ кэВ} \cdot \text{нм} = 1,24 \text{ МэВ} \cdot \text{пм} = 1,24 \text{ ГэВ} \cdot \text{Фм}. \quad (\text{Б1.4})$$

Скорость частиц ионизирующего излучения u связана с их кинетической энергией формулой

$$u(E) = c \frac{\sqrt{E(E + 2\mathcal{E}_0)}}{E + \mathcal{E}_0}, \quad (\text{Б1.5})$$

которая в ультрарелятивистском случае ($E \gg \mathcal{E}_0$), либо в случае фотонов переходит в скорость света c , а в нерелятивистском случае ($E \ll \mathcal{E}_0$) – в известную из ньютоновской механики формулу

$$u(E) = c \sqrt{\frac{2E}{\mathcal{E}_0}}. \quad (\text{Б1.6})$$

Для расчетов скоростей движения элементарных частиц и ядер в формулах (Б1.5) и (Б1.6) удобно использовать значения кинетической энергии и энергии покоя в электрон-вольтах.

Для связи импульса частиц с кинетической энергией следует использовать, вообще говоря, релятивистское выражение

$$p = \frac{1}{c} \sqrt{E(E + 2\mathcal{E}_0)}, \quad (\text{Б1.7})$$

которое для ультрарелятивистских частиц сводится к связи между энергией и импульсом формально похожей на аналогичную точную формулу для фотона: $E = pc$, а в нерелятивистском пределе дает

$$p = \frac{1}{c} \sqrt{2\mathcal{E}_0 E}. \quad (\text{Б1.8})$$

Минимально возможные линейные размеры области локализации частиц определяются, согласно принципу неопределенности, величиной, сопоставимой с их приведенной длиной волны де Бройля

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{hc}{\sqrt{E(E + 2\mathcal{E}_0)}}. \quad (\text{Б1.9})$$

При вычислениях с помощью этой формулы удобно пользоваться значением hc , выраженным в эВ·м (ср. с (Б1.4)):

$$hc \approx 197 \text{ эВ} \cdot \text{нм} = 197 \text{ кэВ} \cdot \text{пм} = 197 \text{ МэВ} \cdot \text{Фм}. \quad (\text{Б1.10})$$

Направление движения частиц ионизирующего излучения будем описывать единичным вектором $\vec{\Omega}$, $\vec{\Omega}^2 = 1$. Его декартовые компоненты удобно выражать через сферические координаты точки на единичной сфере ϑ, φ (рисунок Б1.1):

$$\vec{\Omega}(\sin \vartheta \cos \varphi, \sin \vartheta \sin \varphi, \cos \vartheta). \quad (\text{Б1.11})$$

Той же коренной буквой Ω , но без стрелки, будем обозначать телесный угол, в пределах которого летят частицы. Элементарный телесный угол, как видно из рисунка 1, равен

$$d\Omega = \sin \vartheta d\vartheta d\varphi. \quad (\text{Б1.12})$$

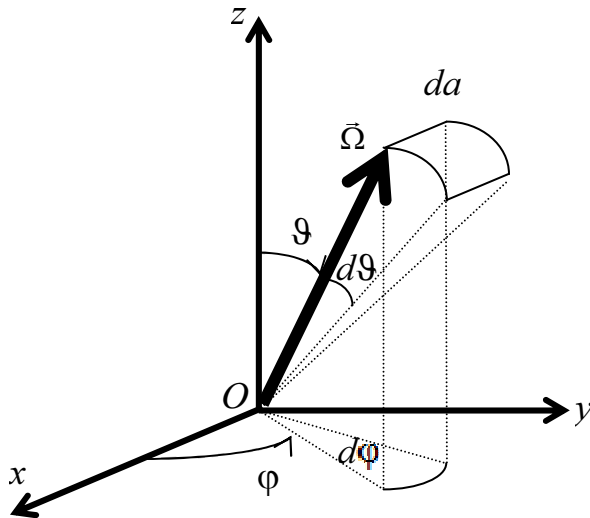


Рисунок Б1.1. К определению вектора $\vec{\Omega}$ и элемента телесного угла в сферической системе координат.

Элементарный объем в некоторой точке пространства будем обозначать dV , а

макроскопический объем – просто V . Следует иметь в виду, что в литературе встречаются обозначения $d\vec{r}$ – для элемента объема и $d\vec{\Omega}$ – для элемента телесного угла. Чтобы не возникало путаницы с обозначением элементарного перемещения и дифференциалом вектора $\vec{\Omega}$, такие обозначения здесь использоваться не будут.

ИОНИЗИРУЮЩЕЕ ИЗЛУЧЕНИЕ И ЕГО ВИДЫ

Ионизация и ионизирующее излучение – основные определения

Ионом {ion} называется атом или молекула, утратившие (положительно заряженный ион {positively charged ion}²²) или присоединившие (отрицательно заряженный ион {negatively charged ion}) один, или несколько электронов. Ионизацией {ionisation} называется превращение электрически нейтральных атомов или молекул вещества в ионы. Число отделенных (присоединенных) в результате ионизации электронов называется кратностью ионизации {degree of ionisation} [Б3].

Процесс ионизации не сводится к отрыву электронов от атома или молекулы (присоединению электрона к ним), как это часто предполагается по умолчанию. К явлению ионизации следует относить и появление в веществе ионов, выбитых из атома или молекулы посредством столкновения частицы с ядром, изменения ядерного состава вещества. В число явлений ионизации следует включить и образование в веществе пар «частица – античастица», например, образование электрон-позитронных пар. Электрон пары может быть присоединен к какому-либо из нейтральных атомов вещества, образуя с ним отрицательно заряженный ион, тогда как позитрон может проаннигилировать с одним из атомарных электронов, превратив этот атом в положительно заряженный ион.

Ионизация сопровождается обратным процессом – рекомбинацией, когда образовавшийся ион вновь захватывает электрон(ы) и становится нейтральным атомом или молекулой.

Ионизация может быть вызвана не только взаимодействием частиц с атомами и молекулами вещества, но и электрическим полем. Последний вид ионизации здесь не рассматривается.

В литературе [Б1-5] принимается следующее определение *ионизирующего излучения* {ionising radiation}:

Ионизирующим излучением называется «излучение, взаимодействие которого с веществом приводит к образованию ионов разных знаков».

Кроме создания ионов, ионизирующее излучение может возбуждать атомы и молекулы вещества, создавать в среде другие носители заряда, например, создавать пары «электрон – дырка», инициировать разнообразные химические явления, вызывать колебания кристаллической решётки (фононы), служить причиной изменения термодинамического состояния тел. Все эти явления могут вызывать в живой материи соответствующую реакцию, связываемую с биологическим действием ионизирующего излучения. Однако основным отличительным признаком действия ионизирующего излучения является его способность создавать не единичную, а множественную ионизацию вещества.

²² Положительно заряженный ион может образоваться и путем присоединения протона, ядра или положительно заряженного иона другого атома к атому или молекуле. Такие процессы происходят, например, в плазме.

«Ионизирующее излучение, которое в рассматриваемом процессе взаимодействия со средой является или принимается исходным», называется *первичным ионизирующим излучением* {primary ionising radiation} [Б2].

«Ионизирующее излучение, возникающее в результате взаимодействия первичного излучения с рассматриваемой средой» называется *вторичным ионизирующим излучением* {secondary ionising radiation} [Б2].

Характеристики и параметры, относящиеся к первичному излучению, обычно обозначаются верхним индексом *o*, а характеристики, относящиеся к вторичному излучению – верхним индексом *s* [Б6].

Все механизмы ионизации посредством частиц можно разбить на два больших класса:

- *непосредственная ионизация* {direct ionisation};
- *косвенная ионизация* {indirect ionisation}.

Непосредственная ионизация – явление образования ионов ионизирующим излучением путем рассеяния налетающих частиц на частицах вещества.

Косвенная ионизация – явление образования ионов под действием вторичного ионизирующего излучения.

Энергией ионизации {ionisation energy} называется «Минимальная энергия, необходимая для отрыва электрона (ионизации) от атома, иона, или молекулы, находящихся в основном энергетическом состоянии» [Б3]. Энергия ионизации имеет также смысл *энергии связи* {binding energy} электрона с атомом. Иногда энергию ионизации называют потенциалом ионизации [Б13], что неверно, т.к. *потенциал ионизации равен энергии ионизации, отнесенной к величине элементарного заряда*, и измеряется в вольтах [Б3].

Энергия ионизации атома водорода из основного состояния равна примерно 13,6 эВ. Значения энергии ионизации для более сложных атомов варьируются в широком диапазоне в зависимости от энергетического состояния электрона в атоме, или в молекуле. Так, энергия связи электронов на внешней оболочке атома, I_0 , варьируется в пределах от 3,89 эВ (Cs) до 24,6 эВ (He) [Б3]. В то же время значения энергии связи электронов, находящихся на нижних электронных оболочках атомов подбираются к 1 кэВ, начиная с неона, и могут достигать величин свыше 120 кэВ (Pu) [Б13].

Для характеристики процессов ионизации и возбуждения отдельных атомов, молекул, или смесей химических веществ, растворов, сплавов и т.п., вводят в рассмотрение *среднюю энергию возбуждения* $\bar{I}$ {mean excitation energy}, имея в виду под ней *среднюю энергию ионизации* {mean ionisation energy}. Средняя энергия возбуждения иногда называется *I-величиной* {I-value}. Средняя энергия возбуждения $\bar{I}$ определяется сначала для отдельных атомов, а затем – для веществ сложного атомно-молекулярного состава.

Общее определение средней энергии возбуждения зависит от механизмов ионизации и возбуждения, а также способа усреднения по уровням энергии электронов в атоме, по атомам в молекуле, либо по атомам или молекулам, находящимся в некотором *элементарном объеме* (определение будет дано в п. 4.1) вещества сложного состава. Поэтому определение средней энергии возбуждения атомов, молекул и смесей не может быть сформулировано однозначно. Для атомов легких элементов во многих практически важных случаях обычно принимается оценка, надежно обоснованная только для водородоподобных ионов, находящихся в основном состоянии:

$$\bar{I} \approx 13,6Z \text{ эВ}, \quad (\text{Б2.1})$$

где Z – порядковый номер атома (ядра). Эта формула применима для атомов с $Z < 12$. Для атомов с $Z > 12$ применяют следующую эмпирическую формулу [Б6, с. 64; 14, с. 87]

$$\bar{I} \approx (9,76 + 58,8Z^{-1,19})Z \text{ эВ}. \quad (\text{Б2.2})$$

Для атомов с $Z > 34$ в [Б6] приведена другая эмпирическая формула для средней энергии возбуждения

$$\bar{I} \approx (10,3Z - 8,17Z^{1/3}) \text{ эВ}, \quad (\text{2.2}')$$

и указано, что она дает ответ с ошибкой около 10%. Например, для атомов азота из (Б2.2) имеем $\bar{I}_N \approx 109 \text{ эВ}$, а для кислорода – $\bar{I}_O \approx 118 \text{ эВ}$. Для атомов сверхтяжелых элементов формула (2.2') дает около 800 эВ. Эта величина в 150 раз меньше энергии связи электрона, находящегося в атоме Рн на К-оболочке, в то время как энергия связи валентных электронов Рн составляет примерно 6 эВ [Б13].

Для атомов, входящих в химические соединения, величина $\bar{I}$ должна быть умножена на коэффициент 1,13 [Б6]. Для сплавов, растворов, смесей оценку средней энергии возбуждения выполняют по следующей формуле³ [Б6, с. 65; 14, с. 88]

$$\bar{I} \approx \exp \left[\frac{\sum_{\alpha} w_{\alpha} \frac{Z_{\alpha}}{M_{\alpha}} \ln \bar{I}_{\alpha}}{\sum_{\alpha} w_{\alpha} \frac{Z_{\alpha}}{M_{\alpha}}} \right] \text{ эВ}, \quad (\text{Б2.3})$$

где w_{α} – массовое содержание химического элемента с порядковым номером Z_{α} и массовым числом A_{α} , $M(Z_{\alpha}, A_{\alpha})$ – масса атома α , а $\bar{I}_{\alpha}$ – его средняя энергия возбуждения. Величину $M(Z_{\alpha}, A_{\alpha})$ обычно заменяют на массовое число атома A_{α} . В знаменателе дроби под экспонентой в (Б2.3) стоит выражение для среднего порядкового номера смеси. Для двухатомных молекул формула (Б2.3) дает атомарные значения $\bar{I}$. Считая воздух состоящим на 80% из молекул азота и 20% из молекул кислорода, из (Б2.3) и приведенных выше оценок значений $\bar{I}_N$ и $\bar{I}_O$ вытекает, что для воздуха $\bar{I}_{\text{Air}} \approx 111 \text{ эВ}$.

Экспериментальные значения средней энергии возбуждения для различных элементов и их соединений можно найти, например, в [Б6, табл. 3.5]. Они не всегда близки к значениям, рассчитанным по формулам (Б2.1) – (Б2.3). I -величина имеет смысл средней пороговой энергии реакции возбуждения атома или молекулы в системе отсчета, связанной с центром инерции взаимодействующих частиц. В лабораторной системе отсчета эта величина будет несколько выше (см. Приложение А).

Для характеристики средних затрат энергии одной частицей излучения на образование одной пары ионов в следе вводится понятие *средней энергии, затрачиваемой ионизирующей частицей на создание одной пары ионов* в среде {*mean energy expended to produce an ion pair* [Б7]}. Оно непосредственно не связано со средней энергией возбуждения $\bar{I}$.

Средняя энергия образования одной пары ионов в среде $\bar{W}$ определяется как отношение энергии частицы E , полностью затраченной на ионизацию вещества к числу ионов одного знака N_i , образованном в данном объеме:

³ Эта формула не учитывает возможное вращение молекул, колебания ядер в молекуле и связанные с этими движениями изменения в структуре их уровней энергии.

$$\bar{W} = \frac{E}{N_i}. \quad (\text{Б2.4})$$

В величину $\bar{W}$ дают вклад все процессы, происходящие в веществе при прохождении ионизирующего излучения. Величина $\bar{W}$ зависит от вида частиц, из которых состоит излучение, и слабо зависит от их энергии. Для сухого воздуха при нормальных условиях величина $\bar{W}$ для электронов составляет 33,8 эВ, а для жидкой воды при атмосферном давлении в пределах диапазона температур, в котором она сохраняет своё жидкое состояние – 36,9 эВ. Для альфа-частиц в воздухе $\bar{W}$ равна примерно 35,1 эВ. Более подробные сведения о значениях $\bar{W}$ можно найти в [Б7, табл. 1.7].

Данное выше определение ионизирующего излучения не следует понимать буквально так, что образование хотя бы одного иона в некотором объеме облучаемого вещества является свидетельством ионизирующего действия излучения. Это действие необходимо выделить среди других явлений, которые также могут приводить к ионизации. Например, процессы ионизации (и последующей рекомбинации) в газах возникают и без воздействия ионизирующего излучения в результате столкновений атомов и молекул при их хаотическом движении. При этом также может возникать и перезарядка ионов. Появление одного или нескольких ионов в газе под воздействием излучения сложно выделить из числа других событий ионизации. Для того чтобы обнаружить ионизирующее действие излучения, необходимо, надежно зарегистрировать изменение электрической проводимости газа. Иными словами, число ионов, образованных излучением, должно быть достаточно высоким, чтобы можно было бы отделить их появление на фоне конкурирующих процессов, присущих равновесному состоянию газа.

Из сказанного можно сделать вывод, что значение энергии частиц излучения, начиная с которого оно становится ионизирующим, нельзя установить, опираясь лишь на минимальное значение энергии возбуждения для атомов, или молекул, либо на среднее значение энергии возбуждения для каждого вида атомов, молекул, или их смеси и т.п., либо же на среднюю энергию создания одной пары ионов. Для нейтронов как ионизирующего излучения понятие нижнего порога энергии, по-видимому, вообще не существует в силу того, что сечение захвата нейтрона ядром пропорционально $1/u$, где u – скорость нейтрона. Т.о. ответ на вопрос, каково же наименьшее значение энергии частиц ионизирующего излучения, если он вообще уместен, зависит как от свойств самих частиц, так и от основных механизмов ионизации – непосредственного, либо косвенного, – которые возникают при их взаимодействии с веществом.

Классификация видов ионизирующего излучения

Основные классификационные признаки видов ионизирующего излучения

Существуют различные способы классификации видов ионизирующего излучения, основанные как на различии между отдельными частицами, так на особенностях взаимодействия отдельных видов ионизирующего излучения с веществом. Классификация видов ионизирующего излучения может быть проведена по следующим признакам:

- 1) по составу ионизирующего излучения;
- 2) по механизму взаимодействия частиц ионизирующего излучения с веществом;
- 3) по особенностям распространения ионизирующего излучения в веществе;
- 4) по характеристикам движения частиц ионизирующего излучения.

Есть, однако, виды ионизирующего излучения, которые не подчиняются ни одному из перечисленных выше критериев. Примерами таковых являются понятия первичного и вторичного ионизирующего излучения, вынесенные в п. 2.1 как основные определения, а также понятие *фонового ионизирующего излучения* {background radiation}, или *радиационного фона* {radiation background}. Последнее понятие удобнее рассмотреть после обсуждения классификации видов ионизирующего излучения по признакам 1) – 4). Классификация по признаку 4) будет более детально рассмотрена в разделе 4.

Классификация видов ионизирующего излучения по его составу

В зависимости от типа частиц, составляющих ионизирующее излучение, различают:

- *фотонное ионизирующее излучение* {photon ionising radiation} – ионизирующее излучение, состоящее из квантов электромагнитного поля – фотонов⁴;
- *корпускулярное ионизирующее излучение* (particulate ionising radiation)⁵ – ионизирующее излучение, состоящее из обладающих массой элементарных частиц, а также атомных ядер и ионов.

Данное определение корпускулярного ионизирующего излучения несущественно отличается от приведенного в [Б2]. Следует отметить, что оно не вошло в заменивший [Б2] документ [Б1]. Определение фотонного излучения, данное здесь, значительно отличается от [Б1,2]. Объяснение этому будет дано ниже (см. п. 2.2.2.1).

Под выбранный признак классификации подпадает и понятие *смешанного ионизирующего излучения* {mixed ionising radiation}. Именно, смешанное ионизирующее излучение – ионизирующее излучение, состоящее из различных видов частиц. Именно такой вид излучения, как правило, и возникает при взаимодействии ионизирующего излучения с веществом.

Фотонное ионизирующее излучение

К фотонному ионизирующему излучению традиционно относят электромагнитное излучение, следующее на шкале электромагнитных волн за ультрафиолетовым излучением (см. рисунок 2.1). Все виды фотонного излучения, имеющие энергии, меньшие энергий фотонов ионизирующего излучения, принято относить к *неионизирующему излучению* {non-ionizing radiation} [Б2]. На самом деле, такое разделение является достаточно искусственным и требует уточнения.

Фотонное ионизирующее излучение разделяют на рентгеновское ионизирующее излучение {ionising X-ray radiation} и гамма-излучение {gamma-radiation, или γ -radiation}.

Это разделение весьма условно, т.к.

- 1) диапазоны энергий рентгеновского и гамма-излучения перекрываются;
- 2) не любое рентгеновское излучение способно эффективно ионизировать вещество.

Поэтому в приведенное выше определение фотонного ионизирующего излучения включается только рентгеновское ионизирующее излучение.

⁴ Другие калибровочные бозоны (см., например, [Б3]) не имеет смысла рассматривать как частицы ионизирующего излучения, т.к. средние длины их свободного пробега, кроме пока гипотетического гравитона, не превышают размеров нуклона, а ионизирующее действие гравитонов пока не обнаружено.

⁵ В [Б2] дается перевод «Corpuscular radiation», который не употребляется в англоязычной литературе (см., например, [Б14,15]).

В [Б3, с. 375] диапазон энергий фотонов рентгеновского излучения определяется в пределах от 10 эВ (длина волны имеет порядок 10^{-7} м = 0,1 мкм) до нескольких МэВ (длина волны – порядка 10^{-12} м = 1 пм). В рентгеновской оптике [Б3, с. 345] он подразделяется на *ультрамягкое рентгеновское излучение*, УМР {ultralow-energy radiation}, с длинами волн от 30 до 100 нм (с энергиями фотонов от 12,4 эВ до 41 эВ), *мягкое рентгеновское излучение*, МР {low-energy X-radiation} с длинами волн от 1 до 30 нм (Б41 эВ – 1,24 кэВ) и *жесткое рентгеновское излучение*, ЖР {high-energy X-radiation} с длинами волн меньше 1 нм (более 1,24 кэВ).

Диапазон энергий фотонов гамма-излучения условно ограничен снизу величиной 6,2 кэВ (длина волны меньше $2 \cdot 10^{-10}$ м), а сверху – только существующими возможностями регистрации гамма-излучения (в гамма-астрономии максимальные энергии регистрируемых фотонов имеют порядок 10^{17} эВ [Б3]). Таким образом, разделение фотонного ионизирующего излучения на рентгеновское и гамма-излучение по энергии фотонов (длине волны) носит весьма условный характер. Следует отметить, что не установлено и четкой границы между рентгеновским и ультрафиолетовым излучением, которые имеют значительный диапазон перекрытия в области от 100 нм (~12,4 эВ согласно (Б1.3), (Б1.4)) до 10 нм (~124 эВ) – часть *вакуумного ультрафиолетового излучения* (экстремальный ультрафиолет) и мягкое рентгеновское излучение [Б3]. Поэтому в некоторых классификациях экстремальное ультрафиолетовое излучение относят к фотонному

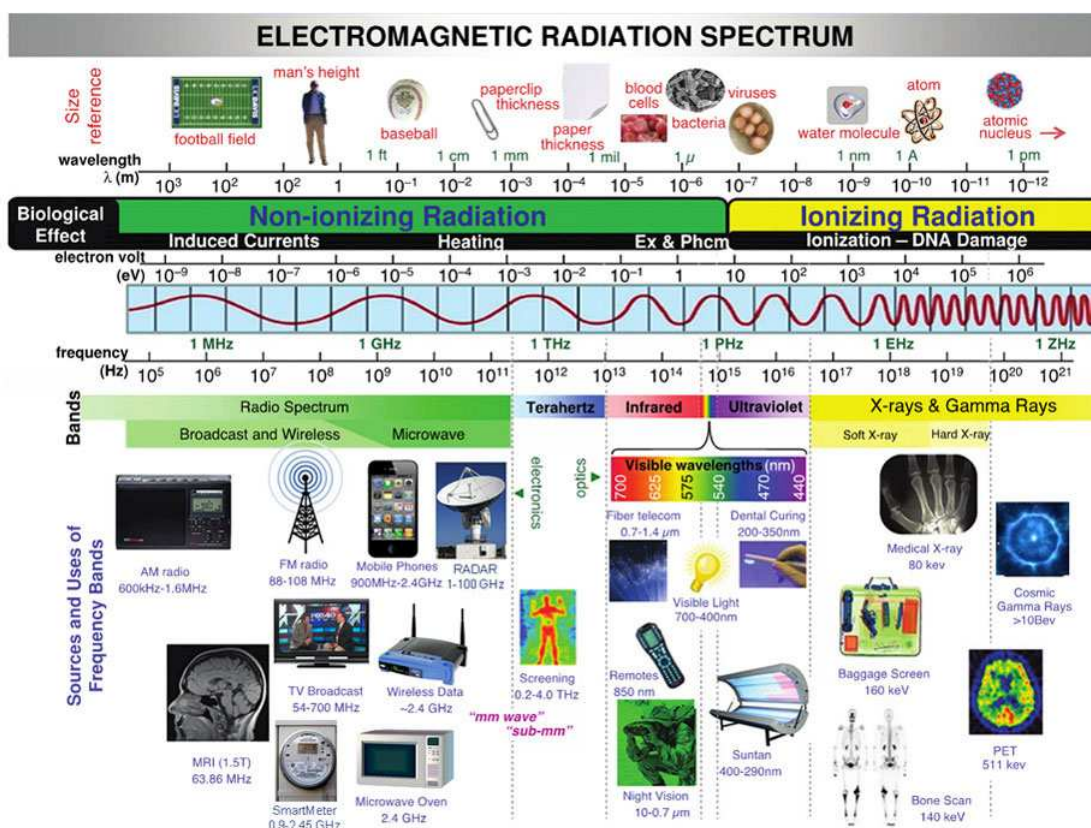


Рисунок Б2.1. Шкала электромагнитных волн.

Источник: <http://www.13min.ru/wp-content/uploads/2013/04/Shkala-jelektromagnitnyh-voln-2.jpg>

ионизирующему излучению. Но фотоны с энергией до 100 – 150 эВ не будут производить заметную ионизацию вещества. Для определенности **будем относить к ионизирующему излучению любое фотонное излучение с энергией фотонов свыше 124 эВ**. В этом случае

все виды ультрафиолетового излучения не будут относиться к ионизирующему излучению. Ограничение сверху энергий рентгеновских фотонов величиной 500 кэВ тоже выглядит весьма условно, т.к., например, тормозное излучение, возникающее в линейных ускорителях с энергиями, превышающими 500 кэВ, имеет ту же природу, что и тормозное рентгеновское излучение. Все эти ограничения носят чисто исторический характер и сегодня уже не имеют того значения, которое им придавалось раньше.

Уточним понятие рентгеновского излучения. В нормативном документе [Б1] и в учебниках [Б4,5], повторяя вслед за [Б2], *рентгеновским излучением* называют «фотонное излучение, состоящее из *тормозного* {*bremsstrahlung*⁶} и *характеристического* {*characteristic*} рентгеновского излучений».

Согласно [Б1], **характеристическое рентгеновское излучение – фотонное ионизирующее излучение «с дискретным спектром»⁷, возникающее при изменениях энергетических состояний электронов атома** (*рентгеновская флуоресценция* {*X-ray fluorescence radiation*}). Характеристическое рентгеновское излучение возникает при электромагнитных переходах в атомах на низшие оболочки (*K, L, M, N, O*) с вышележащих энергетических состояний [Б3]. Оно называется характеристическим потому, что индивидуально характеризует каждый атом и его систему энергетических уровней. По характеристическому рентгеновскому излучению можно определять наличие химических элементов даже в тех случаях, когда чисто химическими способами это сделать невозможно (*рентгеновский флуоресцентный анализ*). Рентгеновские спектры в целом хорошо описываются одноэлектронной моделью состояний атома⁸. Однако, не любое характеристическое рентгеновское излучение следует относить к ионизирующему излучению в соответствии с замечанием, сделанным выше.

В [Б1,2,4,5] *тормозное излучение* определяется как «фотонное излучение с непрерывным энергетическим спектром, возникающее при уменьшении кинетической энергии заряженных частиц». Данное определение полностью соответствует смыслу слова «тормозное». В то же время это понятие не охватывает все возможные физические ситуации, в которых может генерироваться ионизирующее фотонное излучение при движении заряженных частиц и взаимодействии их с фотонами.

Известно, что электромагнитное излучение возникает при любом ускоренном движении заряженных частиц, например, в линейных ускорителях. В циклических ускорителях, где на большей части своей траектории частицы совершают равномерное круговое движение. При криволинейном движении частиц в бетатронах и циклотронах возникает т.н. *магнитотормозное излучение* {*magnetic bremsstrahlung*} за счет движения частиц по окружности. В [Б3] эта разновидность электромагнитного излучения включается в определение тормозного излучения. Однако, механизм его генерации несколько отличается от собственно тормозного излучения. С ростом энергии ускоряемых в циклических ускорителях частиц до релятивистских значений возникает потребность в синхронизации включения ускоряющего электрического поля с процессом их кругового движения в магнитном поле. Это осуществляется в *синхротронах* {*synchrotron*} и *синхрофазотронах* {*synchrophasotron*}. Электромагнитное излучение, испускаемое релятивистскими частицами

⁶ В англоязычных текстах, и публикациях, написанных на многих других языках, для обозначения тормозного излучения используется это немецкое слово в честь первооткрывателя X-лучей В.К.Рентгена.

⁷ Понятие спектра излучения будет определено в разделе 4.

⁸ При расчете энергий испускаемых атомами рентгеновских фотонов, строго говоря, необходимо из энергии перехода вычитать кинетическую энергию атома (иона) отдачи, которой, однако, в подавляющем большинстве случаев можно пренебречь.

при их движении в однородном магнитном поле, получило название *синхротронного излучения* {synchrotron radiation}. Аналогичное излучение возникает также при движении релятивистских частиц и в межзвездных магнитных полях. Магнитотормозное излучение можно рассматривать как частный случай синхротронного излучения.

При столкновении быстрых электронов и позитронов с электронами вещества скорость первичных частиц резко изменяется как по величине, так и по направлению. В этом случае механизм генерации фотонного ионизирующего излучения усложняется. Чтобы не вводить множество терминов, этот случай также будем относить к тормозному излучению.

Движение заряженных частиц в некоторых устройствах может быть сложным и состоять из участков ускоренного (несмотря на потери энергии при излучении) и замедленного движения излучающих заряженных частиц. В специфических устройствах, *ондуляторах* {undulator}, частицы движутся по извилистым траекториям и испускают *ондуляторное излучение* {undulator radiation}. На этом основана генерация высококогерентного узконаправленного излучения *лазером на свободных электронах*. Все перечисленные виды фотонного излучения не подпадают под сформулированное в [Б1,2,4,5] достаточно узкое определение рентгеновского излучения.

Есть и другой, достаточно специфический случай возникновения рентгеновского излучения. При *электронном захвате* возникают не только нейтрино, но и фотон. Энергия превращения распределяется между нейтрино и фотоном, поэтому при электронном захвате возникает фотонное излучение, имеющее непрерывный спектр от 0 до энергии, соответствующей Q -фактору радиоактивного превращения, значение которого лежит в рентгеновском диапазоне энергий. Обычно это излучение слабое и маскируется жестким гамма-излучением дочерних ядер. Однако существуют изотопы, которые при электронном захвате превращаются в стабильный нуклид. К таким изотопам относится, например, ^{55}Fe [Б14, с. 70]. Возникающее при этом ионизирующее рентгеновское излучение с максимальной энергией 230 кэВ в [Б14] относят к тормозному излучению и называют *внутренним тормозным излучением* {inner bremsstrahlung}, тогда как традиционное тормозное излучение называют *внешним тормозным излучением* {external bremsstrahlung}.

В течение последних 100 лет стали известны и другие способы генерации рентгеновского излучения. Например, рентгеновское *переходное излучение* {transient radiation}, возникающее при пересечении заряженной частицей достаточно высокой энергии резкой границы раздела двух сред с различными электромагнитными свойствами в рентгеновском диапазоне. При этом не происходит заметного изменения ни направления движения, ни кинетической энергии частицы. Еще одним примером, выходящим за рамки определения тормозного рентгеновского излучения в [Б1,2,4,5], служит рентгеновское *черенковское излучение* {Cherenkov radiation} и *параметрическое рентгеновское излучение*, ПРИ {parametric X-ray radiation}. Излучение Вавилова – Черенкова возникает при практически равномерном движении очень быстрой заряженной частицы в среде со скоростью, превышающей фазовую скорость распространения электромагнитных волн в этой среде, а ПРИ возникает в анизотропной среде, когда скорость частицы превышает фазовую скорость света хотя бы в одном из главных направлений тензора ее диэлектрической проницаемости.

При упругом рассеянии фотонов видимого диапазона и ультрафиолета на встречных ультрарелятивистских заряженных частицах энергия фотонов может повышаться и переходить в рентгеновский диапазон (*обратный комптон-эффект* {Compton back-scattering}).

Резюмируя сделанные выше замечания, будем называть **рентгеновским ионизирующим излучением любое фотонное излучение с энергией фотонов выше 100**

эВ. Его будем разделять на характеристическое, внешнее тормозное, внутреннее тормозное, синхротронное, ондуляторное, переходное, черенковское, параметрическое, обратное комптоновское ионизирующее рентгеновское излучение.

Синхротронное и ондуляторное излучение, параметрическое излучение имеет квазилинейчатый спектр, что делает его в некоторой степени похожим на характеристическое ионизирующее рентгеновское излучение. Поэтому нельзя определять характеристическое рентгеновское излучение как излучение, имеющее дискретный спектр, а все остальные виды рентгеновского излучения считать имеющими непрерывный спектр.

К *гамма-излучению* в [Б1,2,4,5] относят «фотонное излучение, возникающее в процессе ядерных превращений и аннигиляции частиц». Это не полностью соответствует современному пониманию этих терминов. Исторически термин « γ -излучение» возник по предложению Э.Резерфорда (Ernest Rutherford) по аналогии с открытыми ранее явлениями α - и β -радиоактивности для обозначения не отклоняемого в электрическом и магнитном полях излучения радиоактивными веществами после его открытия в 1900 г. П.Вилларом (Paul Villard)⁹. Позднее было установлено, что это – жесткое фотонное излучение ядер, возникающее при электромагнитных переходах в них¹⁰. Позже жесткое фотонное излучение было обнаружено в явлении *аннигиляции частиц* – превращении частицы и античастицы в пару квантов поля, чаще всего, в два фотона с энергией каждого из них в системе центра инерции, равной энергии покоя аннигилирующих частиц. Сегодня термин «гамма-излучение» трактуется в физической литературе в более широком смысле, охватывая фотоны любого происхождения с энергией, превышающей 6,2 кэВ (длиной волны меньше 0,2 нм) [Б3].

Поэтому **гамма-излучением назовем фотонное излучение, имеющее энергии фотонов выше 6,2 кэВ.** К гамма-излучению будем относить не только фотоны соответствующей энергии, испускаемые возбужденными ядрами и фотоны аннигиляции, но и будем допускать двойное толкование фотонов, генерируемых по механизмам генерации рентгеновского излучения. Например, фотоны тормозного излучения, испускаемые электронами в линейном ускорителе на 15 МэВ при их столкновении с анодом, могут иметь энергии вплоть до 15 МэВ и могут называться либо рентгеновскими квантами, либо гамма-квантами. Все гамма-излучение будем относить к жесткому фотонному излучению по аналогии с данной выше классификацией диапазонов рентгеновского излучения (см. более подробно в п. 2.2.5).

Корпускулярное ионизирующее излучение

Корпускулярное излучение делится на

- *заряженные частицы {charged particles}* и
- *незаряженные частицы {uncharged particles}*.

К заряженным частицам относятся электроны, позитроны, другие лептоны, заряженные мезоны, барионы, атомные ядра и ионы. К незаряженным частицам относятся нейтрино, нейтральные мезоны, нейтроны, нейтральные атомы и молекулы.

⁹ Понятие «ядро атома» было введено Резерфордом позднее, лишь в конце 1911 г.

¹⁰ Не любое фотонное излучение ядер можно отнести к гамма-излучению. Энергетические уровни ядер могут иметь сложную колебательно-вращательную структуру, переходы внутри которой могут давать электромагнитное излучение, лежащее в СВЧ-диапазоне.

Заряженные частицы

Заряженные частицы, в свою очередь, делятся на *легкие* и *тяжелые заряженные частицы* {*light* и *heavy charged particles*}. К легким заряженным частицам относятся электроны и позитроны. Далее по величине массы следуют мюоны (примерно 207 масс электрона, m_e), заряженные пионы ($\sim 273m_e$) протоны ($\sim 1836m_e$), таоны ($> 3470m_e$), а другие заряженные частицы еще тяжелее [Б16]. Т.о., тяжелые заряженные частицы – это частицы, имеющие массу, намного превышающую массу электрона. Промежуточных по массе элементарных частиц нет.

Существенное различие в массах легких и тяжелых заряженных частиц обуславливает данную классификацию. Ее правомерность подкрепляется вытекающими из столь большого различия масс особенностями взаимодействия легких и тяжелых заряженных частиц с веществом в наиболее интересной с точки зрения большинства практических случаев применения области кинетических энергий частиц в пределах от нескольких сотен эВ до нескольких десятков (для электронов и позитронов – сотен) МэВ. В этой области кинетических энергий преобладающими процессами взаимодействия заряженных частиц с веществом оказываются процессы упругого рассеяния на электронах вещества. Нижняя граница этого диапазона определяется способностью заряженных частиц эффективно ионизировать вещество (см. Приложение А). Верхняя граница устанавливается для протонов, т.к. линейные размеры области локализации первичных протонов с кинетической энергией в 10 МэВ согласно (Б1.9), (Б1.10) становятся сравнимы с линейными размерами области локализации протона или нейтрона в ядре. В этом случае вклад реакций упругого рассеяния протонов на электронах и ядрах атомов снижается, а в игру вступают иные ядерные реакции.

При упругом рассеянии на электронах вещества лёгкие и тяжёлые заряженные частицы ведут себя совершенно по-разному. Легкие частицы резко меняют направление своего движения (угол разлёта частиц одинаковой массы при нецентральной упругой ударе равен 90°) и значительно изменяют свою кинетическую энергию. Тяжёлые частицы при взаимодействии с электронами практически не меняют направление своего движения и почти не теряют энергию. Основные потери ими энергии приходятся на их столкновения с ядрами атомов вещества.

Из всего разнообразия заряженных ионизирующих частиц выделяют [Б2] *протонное излучение* {*proton radiation*}, *альфа-излучение* {*alpha-radiation*} и *электронное излучение* {*electron radiation*}, из которого выделяются по механизму своего возникновения *бета-излучение* {*beta-radiation*}, *фотоэлектроны* {*photoelectrons*}, *конверсионные электроны* {*conversion electrons*}, *комптоновские электроны* {*Compton electrons*}, *электроны Оже* {*Auger electrons*}. В этот перечень не вошло образование электрон-позитронных пар фотонным излучением в поле ядра или электрона, которые тоже необходимо отнести к корпускулярному ионизирующему излучению.

Электроны и позитроны, разгоняемые на ускорителях до значений энергий, при которых они способны ионизировать вещество, отдельным термином не именуется. Иногда просто говорят: ускоренные электроны и позитроны {*accelerated electrons and positrons*}. В [Б1] это разнообразие разновидностей электронного излучения исключено, исчезло и само понятие электронного излучения, а оставлено только определение бета-излучения. В результате остальные, перечисленные виды электронного излучения оказались формально не подпадающими под действие стандарта [Б1].

Приведём здесь определения перечисленных выше видов корпускулярного ионизирующего излучения, в основном, следуя [Б2], сопроводив их при необходимости соответствующими комментариями.

Протонное излучение – «корпускулярное излучение, состоящее из ядер ^1H » [Б2].

Альфа-излучение – корпускулярное излучение, состоящее из альфа-частиц, ядер ^4He . В [Б1,2] дана немного другая формулировка: «альфа-излучение – «корпускулярное излучение, состоящее из альфа-частиц, испускаемых в ядерных превращениях». Но альфа-частицы, способные ионизировать вещество, могут быть получены не только в ядерных превращениях, но и в ядерных реакциях, и ускорены в ускорителях ионов. Термин «альфа-излучение» возник исторически во время исследования радиоактивных превращений ядер. Реакции с образованием альфа-частиц, технологии их ускорения были открыты позже. Но термин «альфа-частица» прочно закрепился за ядрами ^4He независимо от природы их появления, и сегодня не приводит к недоразумениям.

Электронное излучение – «корпускулярное излучение, состоящее из электронов и позитронов» [Б2]. Этот термин, быть может, не совсем соответствует данному определению, но, в конце концов, неважно, какое название дано понятию, а важно, что оно в себе содержит.

Бета-излучение – «электронное излучение, возникающее при бета-распаде ядер или нестабильных частиц» [Б2]¹¹. Электроны, появляющиеся в процессе бета-превращений, обозначаются символом β^- , а позитроны – символом β^+ . В англоязычной литературе электрон, испущенный ядром в процессе бета-превращения, называют *негатроном* {negatron} [Бсм, например, [Б6,7,14)] как частицу, противоположную по знаку заряда позитрону.

Таким образом, приставка «бета» связывает происхождение электронов и позитронов с явлениями превращений ядер и частиц. В то же время циклический ускоритель электронов (или позитронов) называется *бетатроном*. Это, тем не менее, не означает, что термин «бета-излучение» переносится на любое электронное излучение. Нельзя называть бетатроном любой ускоритель электронов или позитронов, а только циклический. Поэтому имеет смысл рассматривать другие виды электронного излучения.

Фотоэлектроны – электронное излучение, возникающее при фотоэлектрическом взаимодействии фотонного излучения с веществом. Под словами «фотоэлектрическое взаимодействие» имеется в виду фотоэффект, в котором в веществе поглощается фотон и возникает электрон. Быстрые фотоэлектроны получили название «дельта-электроны { δ -electrons}» [Б4-7]. Говорят, что это название произошло от вида треков, которые оставляют энергичные фотоэлектроны при прохождении фотонного излучения через *камеру Вильсона*.

Комптоновские электроны – «электронное излучение, возникающее при комптоновском (некогерентном) рассеянии фотонного излучения» [Б2]. Когерентное рассеяние фотонов ионизирующего излучения называется релеевским рассеянием и его вклад в ионизацию не превышает, как правило, 1%.

Конверсионные электроны – электронное излучение, возникающее при *внутренней конверсии* гамма-излучения ядер. Эта формулировка отличается от приведенной в [Б2] только добавлением слова «ядер», что связано с изменным выше определением гамма-излучения. **Внутренняя конверсия** – это сложное явление в атоме, содержащем возбужденное ядро, когда вместо испускания ядром фотона испускается электрон с

¹¹В [Б1] в определение бета-излучения оказалось неудачным. Попытка исключить термин «электронное излучение» привела к усложнению формулировки: «корпускулярное излучение, состоящее из отрицательно заряженных электронов и позитронов, возникающее при радиоактивном распаде ядер». Во-первых, пришлось вставлять определение электронного излучения, подчеркнув зачем-то, что электроны имеют отрицательный заряд (как будто бывают другие электроны!). Во-вторых, и это – самое существенное, в отличие от [Б2] нестабильные частицы как источник бета-излучения не упоминаются.

электронной оболочки. Атом при этом «срабатывает», как будто бы он весь в целом находится в возбужденном состоянии.

Электроны Оже – «электронное излучение, возникающее при переходе атомов из возбужденного состояния в более низкое энергетическое состояние, не сопровождаемом испусканием фотонов» [Б2]. Это явление аналогично явлению внутренней конверсии, только теперь первоначально в возбужденном состоянии оказывается не ядро, а электронная оболочка атома¹².

К этому перечню следует добавить электрон-позитронные пары – электронное излучение, порождаемое взаимодействием ионизирующего фотонного излучения с электромагнитным полем ядер или электронов. Среди всех процессов образования электрон-позитронных пар выделяют парную конверсию – результат электронмагнитного перехода в возбужденном ядре. Образование электрон-позитронных пар имеет свой порог энергии: примерно $2m_e c^2$ в поле ядра и ровно $4m_e c^2$ – в поле электрона (см. Приложение А).

Незаряженные частицы с массой

Характер взаимодействия обладающих массой электрически нейтральных частиц с веществом существенно отличается от взаимодействия с ним заряженных частиц. Среди них выделяются нейтрино, которые обладают очень небольшой массой (< 2 МэВ [Б16]), крайне слабо взаимодействуют с веществом, и, в результате, их ионизирующее действие становится заметным (и регистрируемым) лишь в достаточно больших объемах материи.

Нейтронное излучение {neutron radiation} – «корпускулярное излучение, состоящее из нейтрино» [Б2].

Незаряженные частицы практически «не замечают» атомарных электронов, если только речь не идет об их взаимодействии с атомами, молекулами или ионами «в целом», т.е. с составляющими их ядрами и электронами как целостной системой (например, дифракция нейтронов). Исключением можно считать, например, появление протонов отдачи при прохождении быстрых нейтронов через водородосодержащее вещество, т.к. протон может рассматриваться как ион водорода, появление которого в веществе происходит непосредственно в результате рассеяния нейтронов на ядрах атомов водорода.

Нейтронное ионизирующее излучение – «корпускулярное излучение, состоящее из нейтронов» [Б2].

В частности,

– нейтронное излучение, возникающее при делении ядер называют нейтронами деления {fission neutrons};

– нейтронное излучение, возникающее при взаимодействии фотонов с ядрами (ядерный фотоэффект) называются фотонейтронами {photoneutrons}.

Существуют два подхода к разбиению нейтронов по диапазонам их кинетических энергий. Одна классификация опирается на общность физических явлений, которые преобладают в том или ином диапазоне их энергий ([Б11] [Б3]). В ней различают 4 основные группы: *медленные нейтроны {slow neutrons}*, *промежуточные нейтроны {intermediate neutrons}*, *быстрые нейтроны {fast neutrons}* и *сверхбыстрые нейтроны {ultrafast neutrons}*. В [Б2] приведены определения нейтронов, принадлежащих двум различным

¹² По своей исходной сути в определении электронов Оже абсолютно верно говорится о возбуждении атома в целом, но тогда это ничем, в принципе, не отличается от возбуждения атома в целом и при испускании конверсионного электрона. Чтобы отличить эти явления, будем говорить о связи внутренней конверсии с гамма-переходами в ядрах и связи электронов Оже с рентгеновскими переходами в электронных оболочках атомов.

подгруппам группы медленных нейтронов: холодные и тепловые, а также определены промежуточные, быстрые и сверхбыстрые нейтроны.

Согласно другой классификации, применяемой в расчёте защиты от нейтронов [Б6, р. 50], нейтроны, представляющие интерес с точки зрения радиационного воздействия на человека от источников ионизирующего излучения, наиболее часто встречающихся на практике, делятся на

- нейтроны высоких энергий *{high energy neutrons}*: $1 \text{ эВ} < E < 20 \text{ МэВ}$;
- нейтроны низких энергий *{low energy neutrons}*: $E < 1 \text{ эВ}$.

Отсутствие в этом списке нейтронов с энергией выше 20 МэВ объясняется тем, что нейтроны сверхвысоких энергий слабее взаимодействуют с живыми тканями, чем нейтроны более низких энергий, и поэтому их биологическое действие на сегодняшний день еще глубоко не изучено.

[Б11. Классификация нейтронов по энергиям [Б3]

Наименование	Диапазон кинетических энергий E_n , эВ	Скорость, u_n м/с	Длина волны де Бройля, λ_n м	Средняя температура $T_{ср}$, К
<i>Медленные</i>				
Ультрахолодные	$< 10^{-7}$	$< 4,4$	$9 \cdot 10^{-8}$	$< 1,2 \cdot 10^{-3}$
Холодные	$10^{-7} - 5 \cdot 10^{-3}$	$4,4 - 10^3$	$4 \cdot 10^{-10} - 9 \cdot 10^{-8}$	$1,2 \cdot 10^{-3} - 58$
Тепловые	$5 \cdot 10^{-3} - 0,5$	$10^3 - 10^4$	$4 \cdot 10^{-11} - 4 \cdot 10^{-10}$	$58 - 5,8 \cdot 10^3$
Резонансные	$0,5 - 10^4$	$10^4 - 1,4 \cdot 10^6$	$2,9 \cdot 10^{-13} - 4 \cdot 10^{-11}$	$5,8 \cdot 10^3 - 1,2 \cdot 10^8$
<i>Промежуточные</i>	$10^4 - 10^6$	$1,4 \cdot 10^6 - 1,4 \cdot 10^7$	$2,9 \cdot 10^{-14} - 2,9 \cdot 10^{-13}$	$1,2 \cdot 10^8 - 1,2 \cdot 10^{10}$
<i>Быстрые</i>	$10^6 - 2 \cdot 10^7$	$1,4 \cdot 10^7 - 6,1 \cdot 10^7$	$6,4 \cdot 10^{-15} - 2,9 \cdot 10^{-14}$	$1,2 \cdot 10^{10} - 2,3 \cdot 10^{11}$
<i>Сверхбыстрые (релятивистские)</i>	$> 2 \cdot 10^7$	$> 6,1 \cdot 10^7$	$< 6,4 \cdot 10^{-15}$	$> 2,3 \cdot 10^{11}$

Все нейтральные элементарные частицы с массой, за исключением нейтрино, нестабильны, что также необходимо принимать во внимание при рассмотрении их косвенного ионизирующего действия на вещество (см. п. 2.2.3).

Классификация ионизирующего излучения по механизму взаимодействия его частиц с веществом

Согласно [Б1,2,4-6] *непосредственно ионизирующим излучением* *{directly ionising radiation}* называется «излучение, состоящее из заряженных частиц, кинетическая энергия которых достаточна для ионизации при столкновении с атомами вещества».

В противоположность непосредственно ионизирующему излучению *косвенно ионизирующим излучением* *{indirectly ionising radiation}* называется «излучение, состоящее из незаряженных частиц, взаимодействие которых со средой приводит к возникновению заряженных частиц, способных непосредственно вызывать ионизацию».

В такой трактовке под непосредственно ионизирующее излучение попадает излучение, состоящее только из заряженных частиц, а незаряженные частицы (электрически нейтральные частицы с массой и фотоны) оказываются косвенно ионизирующими.

С точки зрения определений непосредственной и косвенной ионизации, данных в п. 2.1, приведённые выше определения непосредственно и косвенно ионизирующего излучения [Б1,2,4-6] нуждаются в некотором разъяснении.

С одной стороны, если принять, что процесс ионизации может быть рассмотрен двояко – и как процесс отрыва электрона (электронов), и как процесс отрыва иона (ядра) от атома или молекулы, то к непосредственно ионизирующему излучению необходимо относить и нейтронное излучение, порождающее в веществе протоны отдачи. Комптон-эффект на атомарных электронах также может рассматриваться как непосредственное действие фотонного излучения. И нейтроны, и фотоны являются электрически нейтральными частицами, и, следовательно, не подпадают под определение непосредственно ионизирующего излучения, данное в [Б1,2,4-6].

С другой стороны, заряженные частицы, имеющие достаточно высокую энергию, могут вызывать ядерные реакции, в результате которых на месте старого ядра может возникнуть новое ядро (при делении ядра – 2 и более ядер), и, следовательно, возникают ионы и, возможно, заряженные элементарные частицы, которые способны непосредственно ионизировать вещество. Такие процессы следует относить к косвенной ионизации.

Таким образом, как незаряженные частицы могут непосредственно вызывать ионизацию, так и заряженные частицы могут оказывать косвенное ионизирующее действие на вещество. Использование определений непосредственно и косвенно ионизирующего излучения, приведённых выше, будет достаточно корректным, если совершить оговорку, что в них речь идёт о наиболее вероятных, или преобладающих в некотором диапазоне энергий его частиц механизмах взаимодействия с веществом видов излучения, рассмотренных в п. 2.2.2.

Чтобы привести процитированные выше определения непосредственно и косвенно ионизирующего излучения в соответствие с определениями непосредственной ионизации и косвенной ионизации, сформулированными в п. 2.1, их необходимо переформулировать следующим образом:

Непосредственно ионизирующее излучение – излучение, которое приводит к ионизации вещества путем рассеяния частиц излучения на частицах вещества;

Косвенно ионизирующее излучение – излучение, взаимодействие которого с веществом порождает непосредственно ионизирующее излучение.

Непосредственно ионизирующее излучение, состоящее из частиц с массой, для каждого конкретного вещества может быть охарактеризовано *линейной тормозной способностью вещества, ЛТС* {stopping power, SP} и *линейной передачей энергии, ЛПЭ* {linear energy transfer, LET} [Б4,6,7,15,17]. Строго говоря, понятие средней энергии возбуждения и средней энергии, затрачиваемой излучением на образование одной пары, введенные в п.2.1, применимы только к непосредственно ионизирующему излучению. Все эти понятия применимы, строго говоря, только в той мере, в которой вероятность рассеяния заряженных частиц на частицах вещества существенно преобладает над другими допустимыми процессами.

Понятия ЛТС и ЛПЭ могут быть строго введены лишь в рамках т.н. *приближения непрерывного замедления* {continuous slowing-down approximation, csda}. В приближении непрерывного замедления вещество рассматривается как сплошная среда, а взаимодействие частиц с веществом считается происходящим непрерывно. Частицы ионизирующего излучения представляются точечными и движутся по определённым траекториям. На элементарном участке траектории dl частица излучения теряет в среднем¹³ энергию δE , которая, согласно [Б4], может быть разбита на следующие составляющие:

$$\delta E = \delta E_A + \delta E_{\leq \Delta} + \delta E_{> \Delta} + \delta E_{\gamma}, \quad (B2.5)$$

¹³ Усреднение ведется по всем возможным актам рассеяния частиц излучения в элементарном объеме вещества с линейными размерами dl . При этом предполагается, что потери энергии в элементарном [2.9]

где δE_A – средние потери энергии, локализованные непосредственно в точке A среды, через которую проходит частица (в зависимости от энергии налетающей частицы в δE_A входят: энергия возбуждения, энергия отрыва частицы от ядра, энергия возбуждения атомов или ядер, энергия отдачи ядра или иона); $\delta E_{\leq \Delta}$ – часть средней энергии, переданная вторичным частицам, движущимся в веществе с кинетической энергией, не превышающей некоторую *пороговую энергию* {cut-off energy [Б14]) Δ ; $\delta E_{>\Delta}$ – часть средней энергии, переданная вторичным частицам, движущимся в веществе с кинетической энергией, превышающей пороговое значение Δ ; δE_γ – потери энергии на фотонное излучение первичной частицей (причём, это фотонное излучение не обязательно должно быть ионизирующим).

С помощью вводимых в (Б2.5) величин можно более детально разобраться в смысле различий между средней энергией возбуждения и средней энергией, затрачиваемой частицей излучения на образование одной пары ионов. Величина средней энергии возбуждения учитывается в слагаемом δE_A . На её значение для конкретной среды обращают внимание и при установлении пороговой величины Δ для кинетической энергии электронов, высвобождаемых из атомов. В качестве порогового значения Δ часто берут величину $\Delta = 100$ эВ, что по порядку величины соответствует средней энергии возбуждения азота, кислорода и ряда других элементов (см. п. 2.1). В этом случае $\delta E_{\leq \Delta}$ учитывает кинетическую энергию части вторичных электронов, которые не будут способны вызывать дальнейшую ионизацию вещества.

В рамках модели приближения непрерывного замедления можно ввести понятие *дифференциальной средней энергии, затрачиваемой* частицей ионизирующего излучения *при создании одной пары ионов в среде* {differential mean energy expended to create a ion pair}:

$$\bar{w} = \frac{\delta E}{dN}, \quad (\text{Б2.6})$$

где dN – число пар ионов, образующихся в элементарном объёме среды, а δE описывается выражением (Б2.5). При этом не обязательно, чтобы вся энергия (Б2.5), приходящаяся на одну частицу ионизирующего излучения, передавалась веществу в данном элементарном объёме.

Можно связать величину энергии, затрачиваемой в среднем частицей излучения на образование одной пары ионов в среде, $\bar{W}$, с дифференциальной величиной $\bar{w}$ следующим образом:

$$\bar{W} = \frac{E}{\int_{E_0}^E \frac{dE'}{\bar{w}(E')}}, \quad (\text{Б2.7})$$

где E_0 – минимальное значение кинетической энергии частицы непосредственно ионизирующего излучения, при которой ионизация среды еще может быть эффективной (Приложение А).

Перейдём теперь к определению ЛТС и ЛПЭ. В соответствии с [Б4,6,7,15,17] линейная тормозная способность вещества определяется как средняя энергия, передаваемая ионизирующим излучением веществу, отнесённая к единице длины траектории первичной частицы:

$$S = \frac{\delta E}{dl}. \quad (\text{B2.8})$$

Эта величина имеет ещё и другие названия: *удельные потери энергии* {specific energy loss} [Б15,18], или – «мощность» потерь энергии {“rate” of energy loss} [Б15]. В ряде книг среднюю потерю энергии δE обозначают как $-dE$, имея в виду среднюю убыль энергии частицы E за счёт всех процессов. Такое обозначение не всегда удобно применять, что станет ясно из дальнейшего.

В структуре потерь энергии (Б2.5) первые 3 слагаемых объединяют под одним названием. В русскоязычной литературе [Б4,5,18] эту часть средних потерь принято называть *ионизационными потерями энергии*. В англоязычной литературе [Б6,7,14,15] ее называют *столкновительными потерями энергии* {collisional energy loss [Б6,7,15]}. Последний термин представляется более уместным, т.к. в δE_A дают вклад, как явления ионизации атомов, так и явления возбуждения атомов или ядер, а также потери энергии при упругом рассеянии частиц излучения на частицах вещества. Поэтому первые три слагаемых в (Б2.5) сгруппируем под названием «элементарные столкновительные потери энергии»:

$$(\delta E)_c = \delta E_A + \delta E_{\leq \Delta} + \delta E_{> \Delta}, \quad (\text{B2.9})$$

а второе слагаемое и в русскоязычной, и в англоязычной литературе традиционно называется *радиационными потерями энергии* {radiative energy loss}:

$$(\delta E)_r = \delta E_\gamma. \quad (\text{B2.10})$$

Такое представление элементарных потерь энергии непосредственно ионизирующим излучением приводит к соответствующему представлению линейной тормозной способности в виде суммы столкновительной и радиационной частей:

$$S = S_c + S_r. \quad (\text{B2.11})$$

Радиационные потери энергии должны всегда учитываться для легких первичных частиц. Они возникают из-за столкновения легких частиц с электронами среды, в результате которых легкие частицы резко изменяют кинетическую энергию и направление своего движения. Легкие первичные частицы, пролетая вблизи ядер атомов среды, также могут значительно изменить направление своего движения. Для легких частиц соотношение между столкновительной и радиационной частями ЛТС может быть установлено с помощью следующего эмпирического выражения

$$\frac{S_c}{S_r} = \frac{b}{EZ}, \quad (\text{B2.12})$$

где E – кинетическая энергия первичной частицы, Z – средний порядковый номер вещества, а b – постоянная, для которой в литературе приводятся различные значения. Так, если E измеряется в МэВ, то $b = 700$ МэВ [Б7, с. 36], $b = 750$ МэВ [Б14, с. 89], $b = 800$ МэВ [Б19, с. 444].

В то же время первичные тяжёлые ионизирующие частицы, значения кинетической направления движения в среде, т.к. рассеиваются, в основном, на электронах. Поэтому потери их энергии в каждом акте рассеяния ничтожны. Для ультрарелятивистских тяжёлых частиц вероятность их рассеяния на ядрах вещества становится сравнимой с вероятностью

рассеяния на электронах. Поэтому только при достаточно высоких кинетических энергиях тяжёлых частиц радиационные потери при их прохождении через вещество становятся существенными [Б18].

Кроме разбиения (Б2.11) ЛТС представляют также в виде суммы электронной и ядерной частей

$$S = S_e + S_N. \quad (\text{Б2.13})$$

Электронная часть ЛТС, S_e , включает в себя среднюю энергию возбуждения и ионизации атомов или молекул вещества в элементарном объёме, среднюю кинетическую энергию вторичных электронов, образующихся в результате ионизации в этом объёме, а также средние радиационные потери первичной частицей при столкновении с электронами вещества. Для тяжёлых частиц этот вид радиационных потерь не учитывается при любых значениях их энергии. Ядерная часть ЛТС, S_N , содержит вклад рассеяния на ядрах частиц первичного излучения в среднюю потерю ими энергии, включая радиационные потери при взаимодействии первичных частиц с ядрами.

Ограниченная линейная передача энергии {restricted linear energy transfer} – это часть средней энергии, которую ионизирующая частица передает частицам вещества на единице длины своей траектории путем рассеяния при условии, что кинетическая энергия вторичных частиц не превышает наперед заданного значения Δ :

$$L_{\Delta} = \frac{\delta E_{c\Delta}}{dl}, \quad (\text{Б2.14})$$

где

$$(\delta E)_{c\Delta} = \delta E_A + \delta E_{\leq \Delta} \quad (\text{Б2.15})$$

– т.н. *локальные потери энергии {local energy loss}*. В противоположность этому выражению оставшаяся часть суммы в (Б2.5), $\delta E_{>\Delta} + \delta E_{\gamma}$, называется *нелокальными потерями энергии {non-local energy loss}*.

Если порог Δ принять равным ∞ , то в этом случае L_{∞} совпадает со столкновительной тормозной способностью вещества:

$$L_{\infty} = S_c. \quad (\text{Б2.16})$$

В дальнейшем неограниченную ЛПЭ будем обозначать просто L и называть просто ЛПЭ. Некоторые авторы включают в полную ЛПЭ и радиационную часть (см., например, [Б6,14]). Единицы измерения линейной тормозной способности и ЛТС и ЛПЭ в СИ – Дж/м. Чаше применяются внесистемные единицы – кэВ/мкм.

При прохождении через вещество корпускулярного ионизирующего излучения, состоящего из стабильных и долгоживущих частиц, потери ими энергии приводят к *термализации {thermalisation}* этих частиц: они становятся участниками теплового движения частиц вещества. Электроны тепловых энергий становятся частью вещества – захватываются ионами, либо становятся электронами проводимости. Термализованные позитроны аннигилируют с электронами вещества. Ядра атомов и ионы захватывают электроны (*перезарядка – recharging*) и, в конце концов, так же, как и электроны, становятся частью вещества. В отличие от заряженных частиц термализованные нейтроны остаются способными вызывать ядерные реакции, и через них косвенно ионизировать вещество, но

потери их энергии при рассеянии уже отсутствуют, т.к. термализованные, или *тепловые* нейтроны участвуют в хаотическом движении атомов и молекул всей среды¹⁴. Основным процессом распространения тепловых нейтронов в веществе становится диффузия. Для тепловых нейтронов понятия ЛТС и ЛПЭ становятся бессмысленными.

Термины «приближение непрерывного замедления», «линейная тормозная способность», «линейная передача энергии» неприменимы к безмассовым частицам, фотонам, т.к. скорость их движения всегда равна электродинамической постоянной c . Поэтому даже в области энергий, в которой эффект Комптона на электронах вещества является преобладающим, и в которой такое фотонное излучение можно было бы считать непосредственно ионизирующим, говорить о линейной тормозной способности, да и о линейной передаче энергии физически бессмысленно.

Короткоживущие нейтральные частицы, например, нейтральные пионы π^0 , среднее время жизни которых имеет порядок 10^{-17} с, не успевают термализоваться. Даже ультррелятивистские нейтральные пионы с учетом относительности одновременности успевают испытать лишь считанные столкновения с частицами вещества, что не приводит к его заметной ионизации. Они испытывают превращения и тем самым порождают ионизирующее излучение. Поэтому действие на вещество короткоживущих нейтральных частиц следует отнести к косвенно ионизирующему излучению.

По-видимому, все сформулированные выше оговорки о применимости понятия ЛПЭ послужили причиной отнесения нейтральных частиц, включая нейтроны, и фотонного ионизирующего излучения к косвенно ионизирующему излучению в [Б1,2,4-6], хотя это прямо не следует из приведенных процитированных в начале этого пункта формулировок. Как уже отмечалось выше, заряженные частицы тоже могут производить косвенную ионизацию. В этом случае понятие ЛПЭ для них теряет свой физический смысл. Поэтому даже в рамках определений [Б1,2,4-6] было бы неправомерно относить быстрые заряженные частицы только к непосредственно ионизирующему излучению.

Итак, в случае косвенно ионизирующего излучения частиц с массой и любого фотонного ионизирующего излучения приближение непрерывного замедления и связанные с ним понятия ЛТС и ЛПЭ становятся физически бессмысленными. Однако, поскольку ионизация вещества при действии косвенно ионизирующего излучения производится главным образом за счёт непосредственного действия порождаемого им вторичного ионизирующего излучения (см. п. 2.2.4), то ЛПЭ этого вторичного ионизирующего излучения, состоящего из заряженных частиц, представляет интерес с точки зрения их связи с биологическими эффектами ионизирующего излучения [Б7]. В связи с этим ЛПЭ, среднюю энергию, и среднюю дифференциальную энергию, затрачиваемую частицей на образование одной пары ионов вторичным ионизирующим излучением приписывают порождающему его косвенно ионизирующему излучению. В таблице 2.1 приведены значения ограниченной и неограниченной ЛПЭ для фотонного излучения и заряженных частиц, испускаемых некоторыми источниками.

[Б11. Примеры значений ЛПЭ в жидкой воде для некоторых случаев косвенно и непосредственно ионизирующего излучения [Б14, с. 92].

Излучение	Δ , эВ	L_{Δ}	Излучение	Δ , эВ	L_{Δ}

¹⁴ Можно сказать, что термализованные, или *тепловые нейтроны* образуют в веществе газ, находящийся в термодинамическом равновесии с ним. Т.к. нейтроны между собой практически не взаимодействуют, то этот нейтронный газ можно считать идеальным газом и применять к нему распределение Максвелла.

		(кэВ/мкм)			(кэВ/мкм)
Гамма-излучение ^{60}Co	∞	0,239	Электроны 2 МэВ	100	0,20
	10000	0,232	200 кВп рентгеновские лучи	100	1,7
	1000	0,230	бета-излучение ^3H	100	4,7
	100	0,229	50 кВп рентгеновские лучи	100	6,3
0,22 МэВ рентгеновские лучи (^{55}Fe)	100	0,19	Альфа-частицы 5,3 МэВ	100	4,3

Для вычисления ЛПЭ косвенно ионизирующего излучения необходимо знать кинетическую энергию создаваемых им в веществе вторичных электронов. Этому служит выделение в (Б2.5) слагаемого $\delta E_{>\Delta}$, которое служит источником формирования исходных данных для расчёта ЛПЭ вторичного непосредственно ионизирующего излучения, созданного косвенно ионизирующим излучением. С формулами для расчёта ЛПЭ можно ознакомиться в [Б3-7,14,15,17-19] и на [Портале ядерных знаний](#).

Классификация ионизирующего излучения по его особенностям распространения в веществе

Электрически нейтральные частицы слабо взаимодействуют с веществом, Поэтому они могут проникать в вещество на значительную глубину. В отличие от заряженных частиц их невозможно остановить. Фотоны не могут двигаться со скоростью, отличной от скорости света. Нейтроны, термализуясь, способны диффундировать сквозь вещество, сохраняя способность к его косвенной ионизации. Поэтому ионизирующее излучение, состоящее из незаряженных частиц, называется *сильнопроникающим ионизирующим излучением* {*strongly penetrating ionising radiation*}.

Заряженные частицы, имеющие не очень большую кинетическую энергию, относят к *слабопроникающему ионизирующему излучению* {*weakly penetrating ionising radiation*}.

Более строгие определения сильнопроникающего и слабопроникающего излучения [Б7-11] опираются на характеристики радиационного воздействия на биологические ткани, о которых речь пойдёт в другом разделе Портала.

Слабопроникающее излучение будет характеризоваться низкой ЛПЭ, а сильнопроникающее излучение – высокой ЛПЭ. Поэтому слабопроникающее излучение ещё называют *излучением с низкой ЛПЭ* {*low-LET radiation*} [Б7-11], или *мягким излучением* (ср. с п. 2.2.2.1) а слабопроникающее излучение – *излучением с высокой ЛПЭ* {*high-LET radiation*} [Б7-11], или *жёстким излучением* (ср. с п. 2.2.2.1). Данные, приведённые в Таблице 2.1, дают представление о том, какие значения ЛПЭ могут считаться низкими, а какие – высокими. Так, ограниченная ЛПЭ для альфа-частиц с кинетической энергией 5,3 МэВ при пороговой энергии $\Delta = 100$ эВ почти в 20 раз превышает ЛПЭ с той же пороговой энергией для электронов с кинетической энергией 2 МэВ и гамма-квантов со средней энергией 1,25 МэВ, испускаемых ^{60}Ni , образующимся в радионуклидном источнике ^{60}Co в результате бета-превращения.

Повышение «степени жёсткости» с убылью ЛПЭ, L , для различных видов ионизирующего излучения можно качественно представить в виде диаграммы (Рисунок 2.2).

Для заряженных частиц может быть введено понятие *пробега* $\{range\}$. Пробегом называется среднее расстояние, которое проходит заряженная частица до момента, пока ее кинетическая энергия не снизится до уровня, при котором эффективная ионизация вещества невозможна. Пробег сильно зависит от величины начальной кинетической энергии частицы и плотности среды, ее среднего порядкового номера. Средние значения пробегов в воздухе альфа-частиц от радионуклидных источников составляют несколько сантиметров (при нормальных условиях), а электронов – несколько десятков сантиметров. В более плотных веществах пробеги альфа-частиц могут составлять доли миллиметра и даже всего десятки микрометров. В зависимости от модели рассматривают различные виды пробегов – *полный пробег*, *средний пробег*, *экстраполированный пробег* (для легких частиц) и флуктуации пробега (*стрегглинг пробега*). [БЗ-7,14,15,17-19] и на Портале ядерных знаний. По величине пробега можно судить о проникающей способности непосредственно ионизирующего излучения.

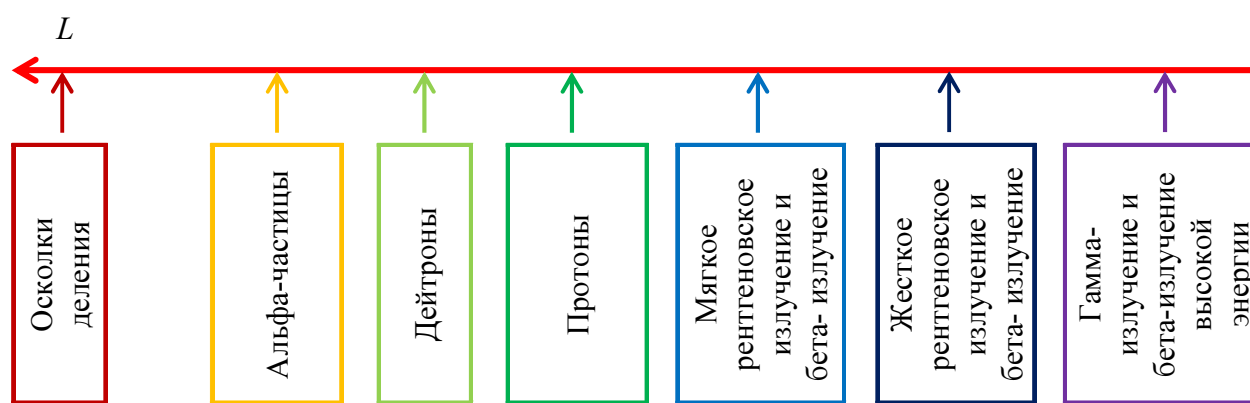


Рисунок 2.2. Изменение ЛПЭ и проникающей способности, или жесткости ионизирующего излучения для разных видов ионизирующего излучения в диапазоне энергий, даваемых наиболее распространёнными источниками излучения (согласно [Б14, с. 92])

Классификация ионизирующего излучения по характеристикам движения его частиц

К характеристикам движения частиц ионизирующего излучения относятся их энергия (кинетическая, или полная – для фотонного излучения), направление движения, состояние поляризации, длительность процесса излучения.

По энергии частиц, составляющих ионизирующее излучение, выделяют [Б1,2]:

Моноэнергетическое ионизирующее излучение $\{monoenergetic\ ionising\ radiation\}$ – «излучение, состоящее из фотонов одинаковой энергии или частиц одного вида, имеющих одинаковую кинетическую энергию»;

Немоноэнергетическое ионизирующее излучение $\{polienergetic\ ionising\ radiation\}$ – «излучение, состоящее из фотонов одинаковой энергии или частиц одного вида, имеющих различную кинетическую энергию».

По направлению движения частиц отличают:

Направленное ионизирующее излучение $\{directional\ ionising\ radiation\}$ – «излучение с выделенным направлением распространения» [Б1,2];

Диффузное ионизирующее излучение {diffusion ionising radiation} – «излучение, не имеющее выделенного направления распространения» [Б2].

Направленное ионизирующее излучение характеризуется ограниченным телесным углом, или группой телесных углов, сходящихся к одной точке, в пределах которых происходит движение частиц излучения. В частности, рассматривают модель однонаправленного излучения {unidirectional ionising radiation}, в которой все частицы движутся в одном направлении.

Частным случаем диффузного ионизирующего излучения является изотропное ионизирующее излучение {isotropic ionising radiation} – «излучение, для которого все направления распространения которого равноценны» [Б1].

Другие случаи направленного и диффузного ионизирующего излучения требуют непосредственного определения характеристик ионизирующего излучения. Эти определения рассматриваются в разделе 4.

По длительности процесса излучения ионизирующее излучение делят на [Б1]:

Непрерывное ионизирующее излучение {continuous ionising radiation} – «излучение, длительность которого больше времени наблюдения»;

Импульсное ионизирующее излучение {pulse ionising radiation} – «излучение, длительность которого меньше времени наблюдения».

По состоянию поляризации частиц ионизирующее излучение делят на поляризованное ионизирующее излучение {polarised ionising radiation} – «ионизирующее излучение, состоящее из частиц с определенной ориентацией спинов и(или) фотонов с определенной ориентацией электрического вектора» [Б2], и

неполяризованное ионизирующее излучение {unpolarised ionising radiation} – ионизирующее излучение со случайным распределением состояний поляризации его частиц.

Эти два понятия используются, чаще всего, в физике высоких энергий, а также в другом крайнем случае – при прохождении холодных и ультрахолодных нейтронов через кристаллы.

Радиационный фон

Согласно [Б1,2], «Фон (ионизирующего излучения): ионизирующее излучение, состоящее из естественного радиационного фона {natural radiation background} и ионизирующего излучения посторонних источников излучения {radiation sources}».

А естественным радиационным фоном называется «ионизирующее излучение, состоящее из космического излучения {cosmic radiation} и ионизирующего излучения естественно распределенных природных радиоактивных веществ» [Б2].

В такой формулировке понятие фона является общим, применимым к любым ситуациям, включая ситуации облучения на космических объектах. Понятие «источник ионизирующего излучения» будет сформулировано в разделе 3.

Космическое излучение, в свою очередь, по отношению к объектам на Земле определяется как «ионизирующее излучение, состоящее из первичного излучения, поступающего из космического пространства (первичное космическое излучение {primary cosmic radiation}), и вторично ионизирующего излучения (вторичное космическое излучение {secondary cosmic radiation}), возникающего в результате взаимодействия первичного ионизирующего излучения со средой» [Б2].

В составе первичного космического излучения подавляюще преобладают протоны с энергией, достигающей значений порядка 1 Дж! Средняя энергия космических протонов

лежит в области 1 ГэВ. Эти протоны порождают в плотных слоях атмосферы множество частиц, прежде всего, электронов, а также пионов, которые, тормозясь и распадаясь в атмосфере, испускают мюоны, электроны и нейтрино; выбиваемые из ядер молекул воздуха протонами высокой энергии нейтроны могут, в свою очередь, выбивать протоны из других ядер. В результате этих и многочисленных других реакций первичное и вторичное космическое излучение приводит к образованию в атмосфере, гидросфере и литосфере множества радионуклидов, среди которых выделяются наиболее долгоживущие, такие, как ^3H , ^{14}C , ^{32}P и др. [Б3]. Космическое излучение поддерживает определенный изотопный баланс некоторых элементов в земной коре (например, соотношение между ^6Li и ^7Li). Радионуклиды, появившиеся на Земле благодаря космическому излучению, называются *космогенными* {*cosmogenic*}. Более подробно о космическом излучении читайте на Портале.

ОБЩАЯ СПЕЦИФИКАЦИЯ ИСТОЧНИКОВ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Что является источником ионизирующего излучения

Источником ионизирующего излучения {*ionising radiation source*, часто просто *radiation source* [Б8-11]} согласно [Б2] является «объект, содержащий радиоактивный материал, или устройство, испускающее или способное в определенных условиях испускать ионизирующее излучение».

В [Б1] общее определение источника ионизирующего излучения уже не включено, а рассматриваются различные их виды (Раздел 6 [Б1]).

В Законе о радиационной безопасности Республики Беларусь [Б20]:

«источник ионизирующего излучения – радиоактивное вещество или устройство, испускающее или способное испускать ионизирующее излучение сверх уровней, установленных нормативными правовыми актами, в том числе техническими нормативными правовыми актами, либо устройство, содержащее или использующее в работе радиоактивное вещество».

В Глоссарии МАГАТЭ [Б7,8] и в основных документах по радиационной безопасности [Б9,10] источник ионизирующего излучения именуется просто источником. Им называется

«Все, что может вызвать радиационное облучение при испускании ионизирующего излучения или выбросе радиоактивных веществ или материалов и может рассматриваться как единый объект для целей обеспечения защиты и безопасности».

Таким образом, источники, создающие ионизирующее излучение на уровне, не имеющем значение с точки зрения радиационной безопасности, в современных нормативно-правовых документах не относят к источникам ионизирующего излучения¹⁵.

¹⁵ Из приведённого выше определения источника ионизирующего излучения в Законе [Б20] вытекает, что любой радиоактивный материал Законом относится к источнику ионизирующего излучения.

Ниже рассматриваются различные критерии классификации источников по их физическим свойствам. Классификация источников с точки зрения радиационной безопасности будет рассмотрена в другом разделе Портала.

Классификация источников ионизирующего излучения

Источники могут быть классифицированы по различным признакам, полный перечень которых выходит за рамки предмета физики. Эти признаки можно разбить на следующие группы:

- происхождение источников;
- вид(ы) испускаемого ионизирующего излучения;
- физические принципы возникновения ионизирующего излучения;
- агрегатное состояние радиоактивного материала;
- конструктивные особенности устройства источника, препятствующие или не препятствующие распространению материала источника в окружающей среде;
- режим работы источника;
- назначение и функции источника;
- геометрическая модель источника;
- направление движения и энергия частиц, испускаемых источником;
- категории радиационной опасности источников.

Классификация источников по категориям с точки зрения их радиационной опасности требует определения меры радиационного воздействия и будет рассматриваться в другом разделе Портала.

По своему происхождению источники ионизирующего излучения делятся на *природные*, или *естественные* {*natural*} и *искусственные* {*man-made* or *artificial*}.

В [Б1,2] не содержится определения искусственного источника. Однако, используя частное определение [Б2] для искусственного аэрозольного источника (см. ниже классификацию по агрегатному состоянию), можно сформулировать определение искусственного источника следующим образом:

Искусственный источник ионизирующего излучения – это источник, «образовавшийся в результате деятельности человека» [Б2].

Природные источники ионизирующего излучения создают естественный радиационный фон. Природный источник ионизирующего излучения, согласно [Б10,11], это – «возникший естественным путём источник излучения, такой, как солнце и звезды (*источники космического излучения* {*sources of cosmic radiation*}), а также скальные породы и грунт (*наземные источники излучения*, {*terrestrial radiation sources*}), или любой другой материал, радиоактивность которого при всех целях и путях применения этого материала создаётся только радионуклидами природного (естественного) происхождения¹⁶ ...».

К природным источникам ионизирующего излучения относят *радиоактивные материалы природного происхождения* (РМПП) {*naturally occurred radioactive materials (NORM)*}, которые вошли в состав изделий из природного сырья, например, строительные материалы или калийные и фосфатные удобрения. Из их числа исключают и переводят в разряд искусственных источников «радиоактивный материал для использования в ядерной установке и радиоактивные отходы, образовавшиеся в такой установке» [Б7-11].

¹⁶ Перевод, приведённый в [Б11], несколько искажает смысл английского текста [Б10]. В него здесь внесены исправления.

Некоторые радионуклиды в земной коре имеют т.н. *зачаточное*, или *первобытное* {*primordial*} происхождение. К ним относятся долгоживущие радионуклиды, образовавшиеся в период формирования земной коры и сохранившиеся в ней до настоящего времени, а также их дочерние радионуклиды. Это, например, ^{232}Th с периодом полураспада 14 млрд. лет, ^{238}U с периодом полураспада 4,5 млрд. лет, ^{40}K , половина ядер которого испытывает различные бета-превращения в среднем в течение 1,25 млрд. лет, тогда как возраст Земли оценивается в 5 млрд. лет. Другие естественные радионуклиды во всех стратах имеют космогенное происхождение.

Приведённая выше формулировка определения природных источников с последующими комментариями является слишком громоздкой и имеет явную «привязку» к планете Земля. Поэтому по аналогии с данным выше определением искусственного источника назовём **природным (естественным) источником ионизирующего излучения любой источник, который не является результатом человеческой деятельности.**

Эта формулировка учитывает наличие природных источников во всех стратах Земли. В нее вполне вписываются находящиеся в любых изделиях, товарах и сооружениях и т.п. радиоактивные материалы, переходящие в них при переработке первичного природного сырья, либо аккумулированные в них в контакте с окружающей средой (например, ^{14}C , радон и его дочерние продукты), т.к. создание этих изделий не приводит к увеличению естественной концентрации радионуклидов. Под нее не подпадает, теперь уже без оговорок, *свежее ядерное топливо* {*fresh nuclear fuel*}, даже, если оно изготовлено на природном уране, т.к. ядерное топливо предназначено для последующего использования его ядерных свойств и сопряжено с созданием искусственных источников ионизирующего излучения, в частности, отработавшего ядерного топлива {*spent nuclear fuel*}. В рамках предлагаемого выше определения в природные источники нельзя «записать» грибы, аккумулировавшие радионуклиды после глобальных выпадений, связанных с испытаниями ядерного оружия в атмосфере, либо с радиационными авариями, такими, как, например, аварии в Чернобыле и на Фукусиме.

По видам испускаемого ионизирующего излучения все источники делятся на источники рентгеновского и гамма-излучения; источники бета-излучения; ускорители электронов и позитронов, радионуклидные источники альфа-частиц, реже протонов, еще реже дейтронов, тритонов, кластеров – более тяжелых ионов, образующихся в результате радиоактивного распада сверхтяжелых ядер; ускорители протонов и более тяжелых ионов и т.д. Любая ядерная реакция и любая реакция с элементарными частицами, в которых происходят рождение частиц, все радиоактивные превращения ядер и превращения нестабильных элементарных частиц, являются источниками ионизирующего излучения и благодаря этому поддаются исследованию.

По физическим принципам производства ионизирующего излучения источники делятся на:

- радионуклидные источники {*radionuclide sources*};
- генераторы {*generators*} – устройства или объекты, генерирующие ионизирующее излучение.

Эта классификация обычно применяется только к искусственным источникам ионизирующего излучения. Ее, однако, можно распространить и на природные источники, если несколько переформулировать определения, принятые в нормативной литературе [Б1,2,20].

Радионуклидными источниками называются любые материалы и изделия, объекты окружающей среды, в которых содержится радиоактивный материал. Радионуклидные источники могут относиться как к естественным, так и к искусственным

источникам ионизирующего излучения. Так, ^{14}C может быть космогенным радионуклидом, а может и порождаться в ядерных реакциях, протекающих в созданных человеком устройствах.

Радионуклидный источник обычно называют именем материнского радионуклида, входящего в его состав. Например, ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{226}Ra , ^{252}Cf . Радионуклидные источники являются, как правило, источниками смешанного излучения. Так, препарат, содержащий ^{137}Cs , является источником β - и γ -излучения, т.к. γ -излучение возникает при β -превращении ядра ^{137}Cs в ядро метастабильного бария ^{137m}Ba . В то же время его обычно используют как источник γ -излучения, т.к. β -излучение эффективно поглощается стенками оболочки, в которую заключен радиоактивный материал. В другом примере ^{226}Ra сам по себе является α -распадчиком, но его многочисленные дочерние элементы оказываются в возбужденном состоянии. После перехода на нижележащие уровни они также претерпевают α - и β -превращения, сопровождаемые гамма-излучением дочерних радионуклидов. Из-за возникновения большого количества разнообразных радиоактивных превращений в препарате, содержащем ^{226}Ra , в 50-е годы прошлого столетия отказались от его использования в медицине. Противоположный пример являет собой ^{90}Sr , дающий вместе со своим дочерним ^{90}Y исключительно β -излучение. Чистым радионуклидным источником тормозного рентгеновского излучения является упоминавшийся в п. 2.2.2.1 изотоп ^{55}Fe . Термин «чистый» здесь применяется без учета антинейтрино или нейтрино, возникающих при бета-превращениях, т.к. нейтрино очень слабо взаимодействует со средой. Следует также иметь в виду, что в источнике, содержащем любое радиоактивное вещество, возникают вторичные эффекты, порождающие ионизирующее излучение, например, рентгеновская флуоресценция в ионах дочерних изотопов, тормозное излучение вторичных электронов, выбитых первичным излучением из атомов материала источника и др. Однако, как правило, характеристики этого вторичного излучения (см. раздел 4) имеют гораздо более низкие значения, чем характеристики излучения, возникающего в первичных процессах без учета взаимодействия со средой источника. Обычно используется только один из видов ионизирующего излучения радионуклидного источника. По этому виду излучения источники и делят на источники альфа-, бета-, гамма-излучения и т.д.

Радионуклидные источники, действие которых основано на реакциях (α, n) или (γ, n) , называют именами двух изотопов: достаточно долгоживущего материнского радионуклида и стабильного элемента, на ядрах которого идут реакции с образованием нейтрона. Например, плутоний-бериллиевый источник, $^{239}\text{Pu} + \text{Be}$, основанный на реакции (α, n) , и $^{116m}\text{In} + \text{Be}$, основанный на реакции (γ, n) . Существуют и радионуклидные источники, в которых нейтроны порождаются реакциями обоих типов, например, это $^{226}\text{Ra} + \text{Be}$ (см., например, [Бб, с. 88,89]).

Отличительной чертой радионуклидных источников является то, что первичным процессом, приводящим к возникновению ионизирующего излучения является явление радиоактивности, представляющее собой спонтанный процесс. В отличие от радионуклидных источников в генераторах первичным процессом создания ионизирующего излучения является реакция, которая, впрочем, нередко приводит к образованию радиоактивных элементов, вносящих свой вклад в излучение такого источника. В [Б1] дано следующее определение генератора ионизирующего излучения.

«Устройство [Источник], генерирующее ионизирующее излучение: Электрофизическое устройство, в котором ионизирующее излучение возникает за счет изменения скорости заряженных частиц, их аннигиляции или ядерных реакций».

Под это определение подпадают источники только тормозного рентгеновского и синхротронного излучения, но не переходного, черенковского, параметрического и характеристического видов рентгеновского излучения; под него не подпадают ядерные и

термоядерные реакторы, и, тем более, природные ядерные реакторы¹⁷ и звезды, т.к. это, в принципе, – не электрофизические устройства; реакции с элементарными частицами, и продукты их превращений как источники ионизирующего излучения, за исключением процессов аннигиляции, вообще не подпадают под определение, данное в [Б1].

Поэтому предложим следующее определение.

Генератор ионизирующего излучения – устройство или объект, в котором ионизирующее излучение инициируется посредством ядерных реакций, а также реакций с элементарными частицами и их превращений.

Например, в рентгеновской трубке или линейном ускорителе электронов (электрофизическое устройство) пучок ускоренных электронов (элементарные частицы) тормозится анодом (реакции рассеяния электронов), в результате чего образуется тормозное излучение. При достаточно высокой энергии электронов тормозное излучение способно выбивать из ядер анода нейтроны (реакции (γ, n)). Такие устройства могут рассматриваться как источники нейтронов.

В обычном генераторе нейтронов ускоренные дейтроны производят на тритиевой мишени реакцию $d(t, n)^4\text{He}$, в которой возникают нейтроны.

Реактор как источник ионизирующего излучения – устройство, в котором ионизирующее излучение возникает как результат самоподдерживающихся реакций деления $\{fission\}$, либо синтеза $\{fusion\}$ ядер. Различают *ядерные реакторы $\{nuclear\} reactors\}$* , основанные на цепных реакциях деления сверхтяжелых ядер нейтронами, и термоядерные реакторы *$\{thermonuclear, or\} fusion\} reactors\}$* , в которых протекают реакции синтеза легких ядер (более подробно – в другой статье Портала). Кроме ядерных реакций деления, или синтеза, образующиеся в реакторах изотопы могут претерпевать радиоактивные превращения, что вносит дополнительный вклад в ионизирующее излучение реактора. Поэтому реактор как источник ионизирующего излучения можно было бы отнести к гибриднему варианту. В нем можно найти как признаки генератора, так и радионуклидного источника. Гибридным источником следует признать и отработавшее топливо, в котором продолжают реакции деления, а также происходят радиоактивные превращения наработанных в реакторе нуклидов. Тем не менее, все гибридные источники вполне укладываются в предложенное выше определение генератора. Любые реакторы являются источниками смешанного излучения, но существуют способы выделения в реакторах одного вида излучения, чаще всего, нейтронного, и использования его в научных и практических целях (исследовательские реакторы, реакторы медицинского назначения и т.п.).

Ионизирующее излучение генерируется и в так называемых AD-системах (ADS – Accelerator Driven Systems), в которых нейтроны возникают из ядер некоторого материала под воздействием либо самих ускоренных частиц, либо созданного их торможением фотонного излучения, а затем используются для поддержания цепной реакции деления в подкритической системе, доводя его до критического состояния. Ведется разработка проектов, в которых источником нейтронов служит термоядерный реактор, например, с дейтерий-тритиевой плазмой.

Под сформулированное выше определение генератора ионизирующего излучения подпадают и явления превращения нестабильных частиц в элементарные частицы, поскольку подавляющее большинство из них являются короткоживущими и не могут образовать отделяемый от генератора источник, в котором ионизирующее излучение возникает благодаря спонтанным процессам.

¹⁷ В местечке Окло, в Габоне, 500 млн. лет назад «работал» такой природный реактор (ссылка на статью на Портале).

Источники первичного космического излучения еще до конца не ясны, т.к. неясен механизм образования этого излучения, в частности, в ядрах галактик. Источниками первичного космического излучения являются не только звезды и туманности, но и другие астрофизические объекты, например, газовые планеты и т.п. Нельзя исключить и возможный вклад в первичное космическое излучение частиц, испускаемых при радиоактивных превращениях ядер в составе газо-пылевых фракций хвостов комет и т.п. Поэтому космическое излучение невозможно однозначно отнести ни к генераторам, ни к радионуклидным источникам.

Агрегатное состояние радиоактивного материала, из которого состоит источник, может быть *твёрдым* {solid}, *жидким* {liquid} и *газообразным* {gaseous}, а также среда, содержащая радионуклид, может находиться в многофазном, в частности, в дисперсном состоянии (*аэрозоли* {aerosols}). В последнем случае говорят о *радиоактивном аэрозоле* {radioactive aerosol} [Б1,2], или радионуклидном источнике аэрозольного происхождения {airborne radionuclide source}. Чаще всего источники делят по агрегатному состоянию в тех случаях, когда необходимо оценить его способность к распространению в окружающей среде.

По конструктивным особенностям, препятствующим или не препятствующим распространению радиоактивного материала в окружающей среде, радионуклидные источники делят на *закрытые* {sealed} и *открытые* {unsealed¹⁸}.

Согласно [Б1] **«радионуклидный закрытый источник: Радионуклидный источник, конструкция которого гарантирует отсутствие загрязнения окружающей среды и оборудования при использовании его в предусмотренных условиях эксплуатации».**

В то же время **«радионуклидный открытый источник: Радионуклидный источник, конструкция которого не исключает возможности загрязнения оборудования и окружающей среды».**

Эти определения сформулированы применительно только к искусственным источникам ионизирующего излучения.

Закрытый источник может быть в любом агрегатном состоянии. Главное его свойство состоит в том, что в нем радиоактивное вещество помещено в соответствующую герметичную капсулу (ампулу, цангу и т.п.), которая при стандартных условиях эксплуатации не теряет своей герметичности. Исключение составляют альфа-источники, в которых из-за низкой проникающей способности альфа-излучения одна из стенок капсулы изготавливается достаточно тонкой, чтобы, предотвращая контакт радиоактивного материала с окружающей средой, не препятствовать выходу альфа-излучения. Если в закрытый источник помещен радионуклид, в цепочке радиоактивных превращений которого появляются радиоактивные инертные газы (например, ²²⁶Ra, дочерним элементом которого является ²²²Rn), то этот инертный газ способен диффундировать через тонкую стенку капсулы в окружающую среду. Концентрации радона от таких альфа-источников, как правило, невелики, и он быстро распадается вместе со своими дочерними радионуклидами. Но при обращении с источником альфа-излучения на основе ²²⁶Ra след принимать во внимание возможность выхода радона и его дочерних продуктов и их влияние на результаты измерений характеристик альфа-излучения.

¹⁸ В [Б1] для перевода термина «открытый» применительно к источнику предлагаются слова «bare» – буквально, «голый», и применяемое в быту и художественной литературе слово «open». Однако, чаще всего в англоязычной литературе используется слово «unsealed».

Открытые радионуклидные источники представляют повышенную опасность, т.к. могут вступать в непосредственный контакт с окружающей средой и попадать внутрь живых организмов, прежде всего, человека. Радионуклиды, попавшие в живой организм, называются *инкорпорированными радионуклидами* {*incorporated radionuclides*}. Они могут иметь естественное происхождение (природные радионуклиды), или поступить из открытых источников, созданных деятельностью человека. Таковыми, например, являются радионуклиды, попавшие в окружающую среду в результате ядерных аварий.

По **режиму работы** источники ионизирующего излучения делят на *непрерывные* {*continuous*} и *импульсные* {*pulse*} [Б1,2], *стабильные*, или *стационарные* {*stable*} и *нестабильные*, или *нестационарные* {*unstable*} [Б2].

Определения непрерывных и импульсных источников ионизирующего излучения аналогичны определениям непрерывного и импульсного видов ионизирующего излучения (см. п. 2.2.5) и приводятся здесь в соответствии с [Б2] (за исключением непрерывного источника):

Непрерывный источник – источник, не прекращающий работу в течение всего времени наблюдения.

Импульсный источник – «источник ионизирующего излучения, испускающий излучение в течение одного или нескольких интервалов времени, каждый из которых меньше времени наблюдения».

Ключевым моментом в этих определениях является сравнение времени работы источника с временем наблюдения.

Стабильный источник – «источник ионизирующего излучения, испускающий ионизирующие частицы, число которых, отнесённое к единице времени, сохраняется постоянным в требуемых пределах в течение заданного времени наблюдения».

Нестабильный источник – «источник ионизирующего излучения, испускающий ионизирующие частицы, число которых, отнесённое к единице времени, не остаётся постоянным в требуемых пределах в течение заданного времени наблюдения».

Нестабильный источник может быть как импульсным, так и непрерывным. В то же время импульсные источники нельзя отнести к числу стабильных.

Самое большое число видов источников возникает в их классификации **по назначению и выполняемым функциям**. Сюда относятся следующие подгруппы классификационных признаков:

по видам деятельности (отраслям): *энергетические, медицинские, промышленные, сельскохозяйственные, научно-исследовательские, учебные, геофизические, транспортные* и т.п.;

по видам выполняемых работ – *источники лучевой терапии, брахитерапевтические источники, трассеры, радиографические источники, промышленные облучатели, отработавшее ядерное топливо* и т.п.;

по применению в зависимости от выполняемых функций – *эталонные источники, калибровочные источники, контрольные источники, спектрометрические источники, дозиметрические источники и т.п.*; в некоторых случаях источники выполняют несколько функций, например, *спектрометрический эталонный источник, радионуклидный эталонный источник специального назначения и т.п.* (определения см. в [Б1]).

Геометрические модели источников могут быть самыми разнообразными. К простейшим и важнейшим из них относятся:

точечный источник – источник ионизирующего излучения, размеры которого малы по сравнению с расстоянием до точки наблюдения;

линейный источник – источник ионизирующего излучения, непрерывно распределенный по некоторой кривой;

поверхностный источник – источник ионизирующего излучения, непрерывно распределенный по некоторой поверхности;

объемный источник – источник ионизирующего излучения, непрерывно распределенный в некотором объеме.

По направлению движения и энергии частиц, испускаемых источником, различают:

изотропные источники – источники, испускающие частицы одинаково во всех направлениях;

анизотропные источники – источники, испускающие различное число частиц в разных направлениях;

источники мононаправленного (однаправленного) излучения – анизотропные источники, испускающие частицы в одном выделенном направлении;

ламбертовские (косинусные) источники – источники, характеристики которых пропорциональны косинусу угла между направлением движения испускаемых частиц и некоторой выделенной осью, называемой осью источника;

моноэнергетические источники – источники, испускающие частицы с одинаковой энергией;

полиэнергетические источники – источники, испускающие частицы различных энергий, которые, в свою очередь, делятся на

– источники с дискретным спектром, т.е. источники, испускающие частицы, характеризующиеся дискретным рядом значений энергии;

– источники с непрерывным спектром – источники, испускающие частицы с непрерывно меняющимся значением энергии,

– источники со смешанным спектром – источники, в непрерывном спектре которых выделяются отдельные спектральные линии.

В следующем пункте будут рассмотрены в общем виде характеристики источников.

Характеристики источников

Все характеристики источников ионизирующего излучения делятся на *числовые* и *энергетические*. Числовые характеристики связаны с числом частиц, испускаемых источником, а энергетические – с уносимой ими энергией.

Основной числовой характеристикой любого источника ионизирующего излучения является *сила источника* {source strength} [Б6].

Силой источника по данному виду излучения (или просто силой источника) называется число ионизирующих частиц одного вида, испускаемых источником за некоторое время. Сила источника обозначается буквой S , или S_p , где индекс p происходит от слова «particle» – частица для отличия рассматриваемой числовой величины от энергетических величин. Мощностью силы источника называется скорость испускания частиц источником. Она обозначается точкой над буквой S :

$$\dot{S} = \frac{dS}{dt}. \quad (\text{Б3.1})$$

Применительно к радионуклидным источникам величины S и $\dot{S}$ представляют собой ожидаемые значения силы и мощности силы источника. Единицей измерения мощности силы источника в СИ служит 1 эйнштейн (Э, Е) – мощность силы источника, испускающего 1 частиц в 1 с.

Мощность силы радионуклидного (радиоактивного) источника эквивалентно понятию *активность источника*. Активность радионуклидного источника следует отличать от понятия *активности радионуклида*. В нормативной литературе, согласно [Б1,2,21],

«активность радионуклида в источнике; A – отношение числа спонтанных ядерных переходов dN из определённого энергетического состояния ядра радионуклида в источнике за интервал времени dt , к этому интервалу

$$A = \frac{dN}{dt} .» \quad (\text{Б3.2})$$

В СИ активность радионуклида измеряется в бекерелях (Бк, Вк), являющейся одной из основных единиц СИ: 1 распад в секунду,

$$1 \text{ Бк} = 1 \text{ расп/с}. \quad (\text{Б3.3})$$

Широко применяется единица активности – кюри (Ки, Сi).

$$1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк (точно)}. \quad (\text{Б3.4})$$

Раньше 1 Ки определялся как активность 1 г радия-226, находящегося в *переменном равновесии* со своими *дочерними радионуклидами*. Т.к. понятие переменного равновесия точно не определено, то в 1996 г. было принято решение считать (Б3.4) точным равенством и не связывать 1 Ки с радиевым эталоном.

Активность источника также принято выражать в Бк, или в Ки.

Для описания способности источника испускать частицы различных энергий в различных направлениях вводят соответствующие распределения характеристик по энергиям и направлениям. Обозначения подобного рода величин и связь их с интегральными величинами вида (Б3.1) будут подробно рассмотрены в разделе 4.

Объемный источник может быть описан с помощью функции распределения силы источника $S(\vec{r})$ (мощности силы источника, $\dot{S}(\vec{r})$) по точкам области, занимаемой источником. Эта величина может быть определена либо как сила источника, отнесенная к единице массы вещества, m – *удельная мощность силы источника* {*specific source strength*}:

$$\dot{S}_m(\vec{r}) = \frac{d\dot{S}}{dm}, \quad (\text{Б3.5})$$

либо отнесенная к единице объема образца, V – *объемная мощность силы источника* {*volumetric source strength*}:

$$\dot{S}_V(\vec{r}) = \frac{d\dot{S}}{dV}, \quad (\text{Б3.6})$$

либо отнесенная к единице количества вещества ν – *молярная сила источника* {*molar source strength*}:

$$\dot{S}_v(\vec{r}) = \frac{d\dot{S}}{dv}, \quad (\text{Б3.7})$$

где v – среднее количество вещества в источнике. Аналогично определяется *удельная, объемная и молярная активности радионуклидных источников*. Широко распространено применение единиц измерения удельной активности – Бк/кг и объемной активности – Бк/м³. Молярную активность в СИ измеряют в Бк/кмоль. Понятие удельной активности применяют, как правило, к источникам, находящимся в твердом агрегатном состоянии. Понятие объемной активности удобно использовать в случае, когда радионуклиды распределены в слабо сжимаемой жидкости, например, воде. В этом случае широко применяется внесистемная единица измерения объемной активности 1 Бк/л. Объемной активностью также характеризуют и газы, содержащие радионуклиды в молекулярном виде, либо в виде аэрозолей, или частиц пыли. Следует иметь в виду, что введенные выше понятия удельной, объемной и молярной активности применимы только к источнику, но не к радионуклиду.

Источники, распределенные по поверхности, описываются *поверхностной силой источника* {surface source strength}

$$\dot{S}_a(\vec{r}) = \frac{d\dot{S}}{da}, \quad (\text{Б3.8})$$

где da – элемент площади поверхности.

Источники, распределенные по некоторой линии, описываются *линейной силой источника* {linear source strength}

$$\dot{S}_l(\vec{r}) = \frac{d\dot{S}}{dl}, \quad (\text{Б3.9})$$

где dl – элемент длины вдоль кривой, описывающей форму источника.

Аналогично, для радионуклидных источников вводится понятие *поверхностной активности и линейной активности источника*. Поверхностная активность источника измеряется в Бк/м². Для характеристики поверхностного загрязнения радионуклидами больших территорий используется внесистемная единица 1 Ки/км² = 37 кБк/м².

В уравнениях, связывающих характеристики источника с характеристиками поля излучения, везде используются либо удельные, либо объемные величины. При необходимости задать мощность силы поверхностного источника в виде мощности силы объемного источника используют дельта-функцию Дирака. Так, если уравнение поверхности задано в декартовых координатах в неявном виде

$$f(\vec{r}) = f(x, y, z) = 0,$$

то поверхностная сила источника $\dot{S}_a(\vec{r})$ может быть связана с соответствующей объемной характеристикой $\dot{S}_v(\vec{r})$ следующим выражением:

$$S_a(\vec{r}) = S_v(\vec{r})\delta(f(x, y, z)).$$

Аналогично можно связать объемную характеристику линейного источника с его линейной характеристикой.

ПОЛЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

Определение поля ионизирующего излучения

Полем ионизирующего излучения (радиационным полем) в некоторой области пространства называется совокупность частиц этого излучения, которая может оказаться в каждой точке данной области пространства в данный момент времени.

Для определенности будем говорить о поле излучения частиц одного вида (фотонов, нейтронов, электронов, протонов, альфа-частиц и т.п.).

В рассматриваемом понятии поля ионизирующего излучения все его *частицы считаются точечными и не взаимодействующими между собой*. В дальнейшем под точкой пространства понимается сравнительно небольшой объем, называемый *элементарным объемом* {*elementary volume*}. При определении характеристик ионизирующего излучения под элементарным объемом понимается сравнительно малый объем пространства, в котором частицы ионизирующего излучения можно рассматривать как некоторый образуют ансамбль. Этот ансамбль может быть чисто квантовым, например, в вакууме это может быть либо ансамбль Ферми – Дирака для частиц с полуцелым спином, либо ансамбль Бозе – Эйнштейна для частиц с целым спином. Если же в элементарном объеме находится вещество, в котором первичное излучение может произвести ионизацию и другие явления, возникающие при его взаимодействии с веществом, и порождает при этом вторичное ионизирующее излучение, то необходимо говорить о результирующем поле ионизирующего излучения, ансамбль частиц которого будет, вообще говоря, смешанным квантово-статистическим ансамблем. Состояние вещества в пределах элементарного объема должно поддаваться описанию с помощью законов статистической механики, которые наряду с квантовой природой частиц и распределением вероятностей событий взаимодействия ионизирующего излучения с веществом будут определять матрицу плотности. *Характеристики поля излучения* {*radiation field characteristics*} будут рассматриваться как средние величины по этому ансамблю. Как следствие, эти средние величины не должны изменяться в пределах элементарного объема и поэтому могут быть отнесены к одной точке пространства. Т.о. при рассмотрении взаимодействия ионизирующего излучения с веществом элементарный объем представляет собой некоторый макроскопический объем вещества, который достаточно мал, чтобы в его пределах можно было бы считать однородными поле ионизирующего излучения и макроскопические характеристики вещества. Именно в этом смысле элементарный объем здесь и будет пониматься в дальнейшем.

Промежутки времени, которые допустимо рассматривать в этой модели, не могут быть меньше среднего времени пролета частицами ионизирующего излучения через элементарный объем (следовательно, характеристики поля излучения слабо изменяются в пределах рассматриваемых промежутков времени). Только при этих ограничениях обсуждаемые ниже характеристики поля излучения имеют смысл.

В русскоязычной литературе встречаются несколько иные формулировки определения поля ионизирующего излучения, которые с той, или иной степенью полноты отражают данное выше определение. Так, в [Б5] полем ионизирующего излучения называется «Распределение частиц ионизирующего излучения в рассматриваемой среде». В [Б2] уточняется, что речь идет о пространственно-временном распределении ионизирующих частиц в среде. А в [Б4] под полем излучения понимается «область пространства, каждой точке которой поставлены в соответствие физические величины (скалярные и векторные),

являющиеся характеристиками поля излучения. Характеристики поля определяют пространственно-временное распределение излучения в рассматриваемой среде». В последнем уже содержится ссылка на понятие характеристик поля излучения и предложено разделить их на скалярные и векторные величины. Следует отметить, что характеристики поля излучения, определяемые в [Б4-7] как скалярные, на самом деле, могут рассматриваться как временные компоненты некоторых четырехмерных векторов в 4-мерном пространстве-времени. Поэтому необходимо с осторожностью пользоваться терминами «скалярные» и «векторные», оговаривая, в рамках какой модели пространства они определяются. В задачах радиационной безопасности, как правило, не встречаются случаи, где относительность одновременности играла бы роль при измерении характеристик ионизирующего излучения. Релятивистскую механику необходимо здесь учитывать только для отдельных его частиц. Поэтому оставим пока в стороне вопрос о том, как характеристики поля ионизирующего излучения могут быть определены в пространстве-времени Минковского.

Классификация основных характеристик поля ионизирующего излучения

Характеристики поля ионизирующего излучения часто называются *радиометрическими величинами* {*radiometric quantities*}, в отличие от т.н. *дозиметрических величин* {*dosimetric quantities*}, описывающих радиационное воздействие (см. методический материал «Дозиметрические величины»). Все характеристики поля ионизирующего излучения делятся на *числовые* и *энергетические*. Числовые характеристики несут информацию о числе частиц излучения. Энергетические характеристики дают представление о способности поля излучения передать энергию веществу.

Учёт вклада частиц с различными энергиями и направлениями движения возможен путём введения распределений соответствующих характеристик по энергиям и направлениям. Последние выступают в качестве *дифференциальных величин*, интегрирование которых по заданным диапазонам значений позволяет судить о числовых и энергетических *интегральных характеристиках* поля излучения в некотором диапазоне энергий, движущихся в пределах заданного телесного угла. Зависимость энергетического распределения некоторой характеристики поля излучения от энергии называется спектром ионизирующего излучения. Спектры ионизирующего излучения могут быть *линейчатыми, непрерывными* и *смешанными* на заданном интервале (в заданном диапазоне) значений энергии. Спектр называется линейчатым, если распределение характеристики поля ионизирующего излучения по энергии на заданном интервале зависит только от дискретного набора значений. Спектр на заданном интервале называется непрерывным, если распределение характеристики поля ионизирующего излучения непрерывно зависит от энергии его частиц. Спектр называется смешанным, если на заданном интервале он является суммой линейчатого и непрерывного спектров.

Кроме деления на числовые и энергетические, дифференциальные и интегральные величины характеристики поля ионизирующего излучения разделим все характеристики поля ионизирующего излучения на *объемные* и *поверхностные*, а последние – в соответствии с [Б4] – на *поточные* и *токовые величины*.

К *объемным величинам* относятся:

- концентрация частиц ионизирующего излучения;
- число частиц ионизирующего излучения в некоторой области пространства;
- скорость изменения числа частиц ионизирующего излучения в области (поток частиц).

- плотность энергии ионизирующего излучения;
- энергия ионизирующего излучения в некоторой области пространства;
- скорость изменения энергии ионизирующего излучения в области (поток энергии).

К *потокным поверхностным величинам* относятся:

- флюэнс частиц и мощность флюэнса частиц (плотность потока частиц);
- мощность флюэнса энергии (плотность потока энергии, или интенсивность) и флюэнс энергии.

К *токовым поверхностным величинам* относятся:

- ток и мощность тока частиц через заданную поверхность в некоторой ее точке;
- вектор тока частиц и вектор мощности тока частиц (плотности тока частиц);
- сила тока частиц через некоторую поверхность и число частиц, пересекающих поверхность за некоторое время;
- ток энергии и мощность тока энергии через заданную поверхность в некоторой ее точке;
- вектор тока энергии и вектор мощности тока энергии (плотности тока энергии);
- сила тока энергии через некоторую поверхность и энергия, переносимая через данную поверхность за некоторое время.

Суть этих понятий будет раскрыта ниже.

Часто слово «поток» используется для наименования токовых величин. Это в какой-то мере оправдывается двояким смыслом, который вкладывается в слово «поток» в русском языке. С одной стороны, понятие «*поток*» может быть определено в «гидродинамическом смысле» как поток частиц жидкости, имеющий определенное направление или пересекающий некоторую поверхность в некотором направлении по отношению к вектору нормали к этой поверхности. В английском языке ему соответствует слово «*flow*». Такие величины мы вслед за [Б4] будем относить к направленным, или токовым величинам и рассматривать слово «*flow*» синонимом слова «*current*» при переводе на русский язык. С другой стороны, понятие «поток» может рассматриваться в «оптическом» смысле как число частиц или величина энергии, проходящих через данную точку пространства (среды) в единицу времени. В английском языке им соответствуют слова «*flux*», или «*energy flux*». Такого рода величины не связаны с каким-либо направлением движения частиц. Поэтому будем их относить к потокным величинам, понимая здесь под потоком значение слова «*flux*».

Рассмотрим различные характеристики поля ионизирующего излучения с точки зрения трех описанных выше подходов к их классификации. При этом начнем с описания числовых характеристик, привязанных к некоторой точке пространства с радиус-вектором $\vec{r}$ в данный момент времени t .

Объемные характеристики ионизирующего излучения

Число частиц ионизирующего излучения

В этом и других разделах характеристики поля ионизирующего излучения определяются только для одного вида ионизирующего излучения. Общие характеристики поля смешанного ионизирующего излучения, например, экспозиционная доза, рассматриваться здесь не будут.

Пусть в некотором элементарном объеме dV в точке с радиус-вектором $\vec{r}$ в некоторый момент времени t оказалось среднее (ожидаемое) число частиц ионизирующего излучения dN_p . Тогда можно ввести понятие *ожидаемой концентрации этих частиц* в точке $\vec{r}$ в момент t :

$$n(\vec{r}|t) = \frac{dN_p}{dV}. \quad (\text{Б4.1})$$

Она может рассматриваться как некоторое распределение ожидаемого числа частиц ионизирующего излучения в пространстве (по объему) в некоторый момент времени t . В связи с этим вертикальной чертой будем отделять переменные, находящиеся от нее слева, по которым определено распределение.

Величину (Б4.1) можно рассматривать как некоторую характеристику поля ионизирующего излучения.

Интегрируя $n(\vec{r}|t)$ по всему объему, в котором могут находиться частицы ионизирующего излучения, можно получить *ожидаемое число частиц* N_p в рассматриваемом объеме в данный момент времени t :

$$N_p(t) = \int_V dV n(\vec{r}|t). \quad (\text{Б4.2})$$

Если интегрирование в (Б4.2) ведется по всему пространству, где могут находиться частицы, то величина

$$\gamma_p(\vec{r}|t) = \frac{n(\vec{r}|t)}{N_p} \quad (\text{Б4.3})$$

будет иметь смысл *функции распределения ожидаемого числа частиц в пространстве* – доли ожидаемого числа частиц ионизирующего излучения в единице объема в точке $\vec{r}$ в момент времени t .

Для описания распределения частиц ионизирующего излучения по энергиям E и направлениям $\vec{\Omega}$ движения частиц можно ввести функцию распределения $\gamma_p(E, \vec{\Omega}, \vec{r}|t)$, являющуюся величиной (Б4.3), отнесенной к элементарному интервалу энергии dE около значения E и к элементарному телесному углу $d\Omega$ вокруг направления $\vec{\Omega}$. Тогда выражение $\gamma_p(E, \vec{\Omega}, \vec{r}|t)dEd\Omega$ задает долю ожидаемого числа частиц ионизирующего излучения данного вида в точке $\vec{r}$ в момент t в интервале энергии dE около E и в элементарном телесном угле $d\Omega$ около $\vec{\Omega}$. В случае моноэнергетического и однонаправленного излучения с энергией частиц E_0 , движущихся в направлении $\vec{\Omega}_0$, функцию $\gamma_p(E, \vec{\Omega}, \vec{r}|t)$ можно представить в виде

$$\gamma_p(E, \vec{\Omega}, \vec{r}|t) = \gamma_p(\vec{r}|t) \delta(E - E_0) \delta(\vec{\Omega} - \vec{\Omega}_0), \quad (\text{Б4.4})$$

где $\delta(E - E_0)$ – дельта-функция Дирака, а дельта-функция $\delta(\vec{\Omega} - \vec{\Omega}_0)$ определена на единичной сфере:

$$\int_{4\pi} d\Omega \delta(\vec{\Omega} - \vec{\Omega}_0) = 1 \quad (\text{Б4.5})$$

и в переменных ϑ, φ может быть задана через обычные дельта-функции следующим образом:

$$\delta(\vec{\Omega} - \vec{\Omega}_0) = \delta(\omega - \omega_0)\delta(\varphi - \varphi_0). \quad (\text{Б4.6})$$

Здесь $\omega = \cos\vartheta$, $\omega_0 = \cos\vartheta_0$, т.к. интеграл $\int_{4\pi} d\Omega f(\vec{\Omega}) = \int_0^\pi d\vartheta \sin\vartheta \int_0^{2\pi} d\varphi f(\vartheta, \varphi) = \int_{-1}^1 d\omega \int_0^{2\pi} d\varphi f(\omega, \varphi)$ для любой, в т.ч. и обобщенной функции $f(\vec{\Omega}) = f(\vartheta, \varphi) = f(\omega, \varphi)$.

Если все направления движения частиц в каждой точке в любой момент времени равновероятны, то поле ионизирующего излучения называется изотропным. В этом случае

$$\gamma_p(E, \vec{\Omega}, \vec{r}|t) = \frac{1}{4\pi} \gamma_p(E, \vec{r}|t), \quad (\text{Б4.7})$$

где $\gamma_p(E, \vec{r}|t)$ функция распределения частиц по энергиям.

В случае дискретного спектра энергий с линиями, соответствующими энергиям частиц E_i ,

$$\gamma_p(E, \vec{\Omega}, \vec{r}|t) = \sum_i \gamma_{pi}(\vec{\Omega}, \vec{r}|t) \delta(E - E_i), \quad (\text{Б4.8})$$

где $\gamma_{pi}(\vec{\Omega}, \vec{r}|t)$ – распределение по направлениям частиц излучения с энергией E_i .

Величина $n(E, \vec{\Omega}, \vec{r}|t) = N_p \gamma_p(E, \vec{\Omega}, \vec{r}|t)$ будет представлять собой ожидаемое в точке $\vec{r}$ в момент t распределение концентрации частиц ионизирующего излучения по энергиям и направлениям. Для моноэнергетического и однонаправленного излучения в соответствии с (Б4.4) и (Б4.3) $n(E, \vec{\Omega}, \vec{r}|t) = n(\vec{r}|t) \delta(E - E_0) \delta(\vec{\Omega} - \vec{\Omega}_0)$. Для изотропного излучения $n(E, \vec{\Omega}, \vec{r}|t) = \frac{1}{4\pi} n(E, \vec{r}|t)$. В случае дискретного спектра $n(E, \vec{\Omega}, \vec{r}|t) = \sum_i n_i(\vec{\Omega}, \vec{r}|t) \delta(E - E_i)$.

Среднее число частиц ионизирующего излучения в объеме V , имеющих энергии в конечном интервале (E_1, E_2) и движущихся в некотором телесном угле Ω , определится следующим образом:

$$N_p(V; E_1, E_2; \Omega|t) = \int_V dV \int_{E_1}^{E_2} dE \int_{\Omega} d\Omega n(E, \vec{\Omega}, \vec{r}|t). \quad (\text{Б4.9})$$

Отсюда видно, что полное число частиц ионизирующего излучения в объеме V будет равно

$$N_p(V) = N_p(V; 0, \infty; 4\pi|t) = \int_V dV \int_0^\infty dE \int_{4\pi} d\Omega n(E, \vec{\Omega}, \vec{r}|t). \quad (\text{Б4.10})$$

Здесь интегрирование ведется по бесконечному интервалу энергий E от 0 до ∞ , что для некоторых видов ионизирующего излучения, например, для заряженных частиц, может показаться ошибочным, поскольку при низких энергиях такой вид излучения перестает быть ионизирующим. В этом случае ошибка предотвращается обращением в 0 распределения $n(E, \vec{\Omega}, \vec{r}|t)$ в некотором диапазоне энергий. Такой же прием может быть применен, если необходимо «обрезать» верхний предел интегрирования по энергии.

Энергия ионизирующего излучения

Поскольку полная энергия $\mathcal{E}$ системы невзаимодействующих релятивистских частиц равна сумме полных энергий составляющих ее частиц,

$$\mathcal{E} = \sum_i \mathcal{E}_i,$$

то при непрерывном распределении частиц в пространстве и направлениям движения в некоторой инерциальной системе отсчета можно говорить о *средней полной энергии* этих частиц, имеющих кинетические энергии в диапазоне (E_1, E_2) и движущихся в телесном угле Ω :

$$\mathcal{E}(V; E_1, E_2; \Omega | t) = \int_V dV \int_{\Omega} d\Omega \int_{E_1}^{E_2} dE (E + \mathcal{E}_0) n(E, \vec{\Omega}, \vec{r} | t).$$

Так как речь идет о частицах одного вида, то с учетом (Б4.9) можно записать

$$\mathcal{E}(V; E_1, E_2; \Omega | t) = \int_V dV \int_{\Omega} d\Omega \int_{E_1}^{E_2} dE E n(E, \vec{\Omega}, \vec{r} | t) + \mathcal{E}_0 N_p(V; E_1, E_2; \Omega | t). \quad (\text{Б4.11})$$

Первое слагаемое,

$$E(V; E_1, E_2; \Omega) = \int_V dV \int_{\Omega} d\Omega \int_{E_1}^{E_2} dE E n(E, \vec{\Omega}, \vec{r} | t), \quad (\text{Б4.12})$$

назовем *суммарной кинетической энергией частиц излучения* (в случае фотонного излучения – просто *суммарной энергией фотонов*), находящихся в момент времени t в области V и двигающихся в телесном угле Ω с кинетическими энергиями, лежащими в интервале (E_1, E_2) . При упругом рассеянии и при неупругом рассеянии, не приводящем к изменению внутреннего состояния частиц ионизирующего излучения представляет интерес только суммарная кинетическая энергия частиц (Б4.12).

Как видно из формул (Б4.2), (Б4.3), (Б4.9) – (Б4.12), определения всех объемных величин основываются на знании $n(E, \vec{\Omega}, \vec{r} | t)$. На практике трудно измерить ожидаемую концентрацию частиц поля ионизирующего излучения. Поэтому для характеристики поля ионизирующего излучения вместо $n(E, \vec{\Omega}, \vec{r} | t)$ вводят другие величины.

При их формулировке, строго говоря, следовало бы отталкиваться от определения дифференциальных величин, как это предлагается в [Б4], т.к. через них определяются соответствующие интегральные величины. С другой стороны, пока не сформулированы интегральные величины, дающие название соответствующим дифференциальным величинам, невозможно дать определение самих дифференциальных величин. Поэтому при введении новых понятий будем следовать подходу, изложенному в [Б6]. При этом будем делить все вводимые величины на потоковые и токовые в соответствии с классификацией, вводимой в [Б4].

Поверхностные характеристики ионизирующего излучения

Потоковые величины

Флюэнс, мощность флюэнса и их распределения

Существует три определения понятия «*флюэнс частиц ионизирующего излучения*», которые равносильны друг другу и выражают различные подходы к экспериментальному нахождению этой величины. Из них сначала подробнее рассмотрим первые два определения, связанные с т.н. моделью *изотропного или шарового детектора ионизирующего излучения*¹⁹.

Первое определение флюэнса частиц. Флюэнсом Φ частиц *{particle fluence}* или просто *флюэнсом* в точке с радиус-вектором $\vec{r}$ называется предел, к которому стремится отношение числа частиц ΔN_p , попадающих за некоторый промежуток времени внутрь воображаемого шара с центром в данной точке, к площади центральной плоскости шара Δa при стягивании его в точку:

$$\Phi = \lim_{\Delta a \rightarrow 0} \frac{\Delta N_p}{\Delta a}. \quad (\text{Б4.14})$$

Размерность флюэнса – L^{-2} . Применяются единицы m^{-2} , cm^{-2} , mkm^{-2} , $\text{\AA}^{-2}$, fm^{-2} .

Второе определение флюэнса частиц. Флюэнсом в точке $\vec{r}$ называется предел, к которому стремится отношение суммы длин s_i отрезков всех прямолинейных треков частиц, попавших в объем воображаемой сферы с центром в данной точке, к объему ΔV этой сферы при стягивании его в точку

$$\Phi = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\sum_i s_i}{\Delta V}. \quad (\text{Б4.15})$$

На рисунке 2 представлены графические иллюстрации к определению флюэнса частиц в точке. Рисунок 3.1а иллюстрирует первое определение флюэнса, а Рисунок 3.1б – второе. Следует обратить внимание на то, что ориентация поперечного сечения сферы на рисунке 2а не входит в определение флюэнса, который поэтому является скалярной величиной, не зависящей от направления движения частиц.

Часто определение флюэнса (Б4.14) упрощают, записывая его в дифференциальной форме

$$\Phi = \frac{dN_p}{da}, \quad (\text{Б4.16})$$

в которой под dN_p понимается ожидаемое число частиц, попавших внутрь сферы, стягиваемой в точку $\vec{r}$. Такая запись оправдана в рамках допущений, в которых определено понятие поля ионизирующего излучения (см. п. 4.1). Тем не менее она нуждается в некотором уточнении.

¹⁹ Смысл этого понятия выяснится из формулировок, приведенных ниже.

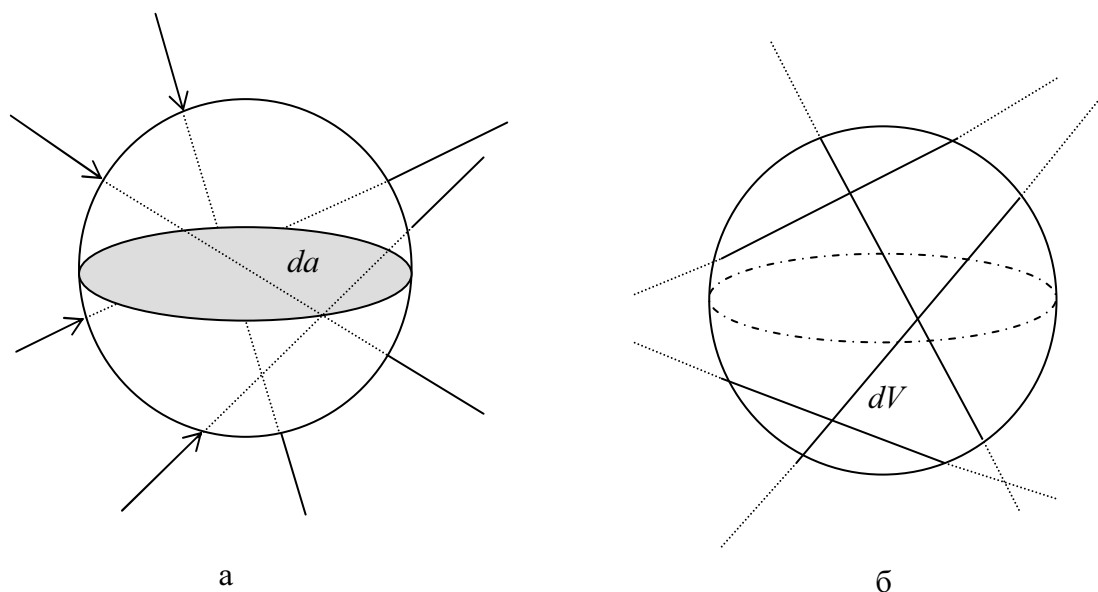


Рисунок 3.1. К определению флюэнса ионизирующего излучения.

Дело в том, что понятие флюэнса зависит от промежутка времени, в течение которого он определяется. Зависимость флюэнса от времени t следует рассматривать как ожидаемое число частиц, и отнесенное к единице площади поперечного сечения шара, которые к моменту времени t прошли через весь объем этого шара, стягиваемого в точку $\vec{r}$. В выражении (Б4.16) в dN_p в этом случае не будут входить частицы, которые к моменту t , быть может, и вошли в элементарный объем в точке $\vec{r}$, но еще не вышли из него. Поэтому запись (Б4.16) необходимо уточнить, представив ее в виде

$$\Phi = \frac{\delta N_p}{da}, \quad (\text{Б4.17})$$

где δN_p имеет смысл среднего, или ожидаемого числа частиц, которые к моменту t прошли *весь* элементарный объем, входящий в определение флюэнса в точке²⁰. В развитие уточнения к определению поля ионизирующего излучения, сделанного в п. 4.1, следует подчеркнуть, что этот объем должен быть элементарен в физическом смысле, т.е. достаточно мал, чтобы можно было говорить о флюэнсе в точке (что справедливо лишь в том случае, если в его пределах число прошедших через него частиц не варьируется заметно от точки к точке), и в то же время он должен быть таковым, чтобы в нем могло содержаться достаточно большое количество вещества, с которым ионизирующее излучение может взаимодействовать. Эти уточнения важны для метрологии ионизирующего излучения и дозиметрии. Размерность флюэнса – L^{-2} .

Перейдем к доказательству эквивалентности двух, сформулированных выше, определений флюэнса. Рассмотрим шар радиуса R , находящийся в однородном потоке частиц, падающих на ее поверхность (Рисунок 3.2а). С одной стороны, средняя длина хорд, отсекаемых шаром от прямолинейных треков частиц, по определению, равна

²⁰ Здесь можно провести аналогию с зависимостью от времени пути, проходимого материальной точкой, в механике. Флюэнс, как и путь, является накопительным, «аккумулятивным» понятием.

$$\bar{L} = \frac{\sum_i s_i}{\Delta N_p}. \quad (\text{Б4.18})$$

С другой стороны, эта же величина может быть определена как среднее значение длин параллельных хорд шара радиуса R , пересекающих центральную плоскость сферы под прямым углом к ней. Из рисунка 3а видно, что длина одной хорды будет равна

$$L = 2\sqrt{R^2 - r^2}.$$

Тогда ее среднее значение по центральной плоскости с площадью πR^2 определится как интеграл (см. рисунок 3.2б)

$$\bar{L} = \frac{2}{\pi R^2} \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^R r \sqrt{R^2 - r^2} dr,$$

после вычисления которого получаем

$$\bar{L} = \frac{4}{3} R. \quad (\text{Б4.19})$$

Выражая из (Б4.18) сумму длин всех хорд, отсекаемых сферой от треков частиц, с учетом (Б4.6) для параллельного пучка частиц будем иметь

$$\Phi = \lim_{R \rightarrow 0} \frac{\frac{4}{3} R \Delta N_p}{\frac{4}{3} \pi R^3} = \lim_{R \rightarrow 0} \frac{\Delta N_p}{\pi R^2} = \lim_{R \rightarrow 0} \frac{\Delta N_p}{\Delta a},$$

т.е. в случае однонаправленного движения частиц ионизирующего излучения определения (Б4.14) и (Б4.15) эквивалентны.

Легко обобщить этот результат на случай произвольного направления треков частиц, пересекающих объем воображаемого шара. Для этого необходимо разбить все частицы, проходящие через него, на группы частиц, двигающихся в одном направлении. Тогда полный флюэнс будет суммой флюэнсов каждой из групп, так как в знаменателе каждого из выражений, определяющих флюэнс группы, будет стоять одна и та же площадь центрального сечения шара. Таким образом, эквивалентность первого и второго определений флюэнса, приведенных выше, доказана.

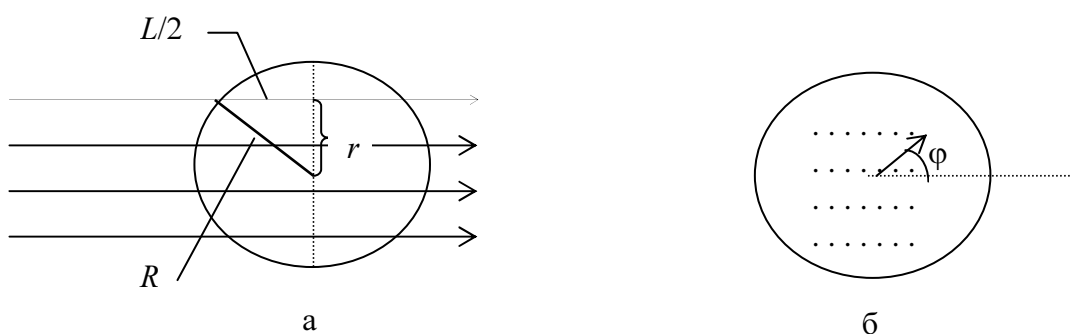


Рисунок 3.2. К доказательству эквивалентности двух определений флюэнса.

В ходе доказательства был получен один интересный с точки зрения других приложений результат, а именно, длина средней хорды в шаре, выражаемая формулой (Б4.19). Ее геометрический смысл состоит в том, что она представляет собой длину образующей воображаемого кругового цилиндра, объем которого равен объему рассматриваемого шара, а площадь основания – площади поперечного сечения этого шара.

Аналогия с цилиндром приводит к третьему определению флюэнса (и позволяет обосновать эквивалентность его двум предыдущим определениям флюэнса), основанном на модели цилиндрического детектора. В этом случае вместо сферически симметричной области, стягиваемой в интересующую нас точку, рассматривается множество цилиндров, образующие которых направлены вдоль всех возможных направлений распространения частиц ионизирующего излучения, и равноправных между собой в том смысле, что вероятность попадания частицы ионизирующего излучения в любой из детекторов, одинакова и не зависит от его ориентации (при стягивании всех цилиндров в точку, к которой относится искомое значение флюэнса). Однако, для того, чтобы ввести третье определение флюэнса частиц, необходимо рассмотреть смысл **мощности флюэнса частиц** {particle fluence rate}.

Мощностью флюэнса частиц в момент t называется предел, к которому стремится отношение приращения флюэнса за время Δt , прошедшее после t , к этому интервалу времени, при стремлении Δt к нулю:

$$\phi = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Phi(t + \Delta t) - \Phi(t)}{\Delta t}. \quad (\text{Б4.20})$$

При этом предполагается, что за время Δt все частицы, вошедшие в определение $\Phi(t + \Delta t)$, прошли элементарный объем, по отношению к которому определен флюэнс Φ как функция времени t , определенная в (Б4.17). Поэтому нельзя определить мощность флюэнса как производную

$$\phi = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{\partial^2 N_p}{\partial a \partial t},$$

потому как, строго говоря, вместо таковой, восходящей к «неосторожной» формуле (Б4.16), надо бы принять следующую, более аккуратную запись, соответствующую (Б4.17):

$$\phi = \frac{\delta \Phi}{dt} = \frac{\delta^2 N_p}{dadt} \quad (\text{Б4.21})$$

с оговоркой, что она применима в те моменты времени t и для тех промежутков времени dt , для которых применимо понятие флюэнса. Размерность мощности флюэнса – $L^{-2}T^{-1}$. Применяются единицы $m^{-2}s^{-1}$, $cm^{-2}s^{-1}$, $mkm^{-2}s^{-1}$, $\text{\AA}^{-2}s^{-1}$, $fm^{-2}s^{-1}$. Мощность флюэнса может рассматриваться как *плотность потока частиц* {particle flux density}, если поток определить в т.н. «оптическом смысле» как число частиц, проходящих через данную точку в единицу времени.

Введем в рассмотрение распределение мощности флюэнса по энергиям и направлениям движения частиц ионизирующего излучения $\phi(E, \vec{\Omega}|\vec{r}, t)$ как мощность флюэнса заданной в точке $\vec{r}$ в момент времени t , отнесенную к единице бесконечно малого интервала энергий dE около значения E и к единице элементарного телесного угла $d\Omega$, охватывающего направление $\vec{\Omega}$. Эта величина будет иметь в СИ размерность $m^{-2}s^{-1}Дж^{-1}ср^{-1}$. Т.к. флюэнс, и, соответственно, мощность флюэнса определяются в точке, то в отличие от $n(E, \vec{\Omega}, \vec{r}|t)$ переменная $\vec{r}$ в $\phi(E, \vec{\Omega}|\vec{r}, t)$ не относится к переменным, по которым рассматривается распределение флюэнса, и в соответствии с введёнными в разделе 2 обозначениями должна быть поставлена справа от вертикальной черты.

Разобьём все частицы ионизирующего излучения на группы сонаправленно двигающихся частиц, имеющих одну и ту же энергию E . Каждая из этих частиц за единицу времени пробегает расстояние $u(E)$. Тогда, как видно из рисунка 4 и вытекает из второго определения флюэнса (Б4.15), для каждого направления движения частиц имеет место связь

$$\phi(E, \vec{\Omega}_1|\vec{r}, t) = \frac{2}{V} u(E), \phi(E, \vec{\Omega}_2|\vec{r}, t) = \frac{3}{V} u(E), \phi(E, \vec{\Omega}_3|\vec{r}, t) = \frac{1}{V} u(E),$$

что может быть обобщено как **третье определение флюэнса частиц** через **мощность флюэнса** в точке $\vec{r}$ к моменту t , записанное в дифференциальной форме:

$$\phi(E, \vec{\Omega}|\vec{r}, t) = u(E)n(E, \vec{\Omega}, \vec{r}|t). \quad (Б4.22)$$

В качестве $u(E)$ для частиц с массой должна использоваться формула (Б1.3), либо в нерелятивистском приближении – формула (Б1.4). В случае фотонного излучения $u = c$.

С помощью дифференциальной величины (Б4.22) строятся соответствующие интегральные величины:

– *энергетическое распределение мощности флюэнса частиц в телесном угле Ω*

$$\phi(E; \Omega|\vec{r}, t) = u(E) \int_{\Omega} d\Omega n(E, \vec{\Omega}, \vec{r}|t) = u(E)n(E, \vec{r}; \Omega|t), \quad (Б4.23)$$

которое совпадает с энергетическим распределением мощности флюэнса при $\Omega = 4\pi$:

$$\phi(E; 4\pi|\vec{r}, t) = \phi(E|\vec{r}, t);$$

– *угловое распределение мощности флюэнса в интервале энергий (E_1, E_2)*

$$\phi(E_1, E_2; \vec{\Omega}|\vec{r}, t) = \int_{E_1}^{E_2} dE u(E) n(E, \vec{\Omega}, \vec{r}|t), \quad (Б4.24)$$

которое сводится к угловому распределению мощности флюэнса

$$\phi(0, \infty; \vec{\Omega} | \vec{r}, t) = \int_0^\infty dE u(E) n(E, \vec{\Omega}, \vec{r} | t) = \phi(\vec{\Omega} | \vec{r}, t);$$

– мощность флюэнса в интервале энергий (E_1, E_2) в пределах телесного угла Ω

$$\phi(E_1, E_2; \Omega | \vec{r}, t) = \int_{E_1}^{E_2} dE u(E) n(E, \vec{r}; \Omega | t), \quad (\text{Б4.25})$$

переходящая просто в мощность флюэнса, если $\Omega = 4\pi$, $E_1 = 0$, $E_2 = \infty$: $\phi(0, \infty; 4\pi | \vec{r}, t) = \phi(\vec{r}, t)$. Если под потоком понимать число частиц, проходящих через данную точку пространства в единицу времени (поток в «оптическом» смысле), то тогда мощность флюэнса можно назвать плотностью потока частиц {flux density}.

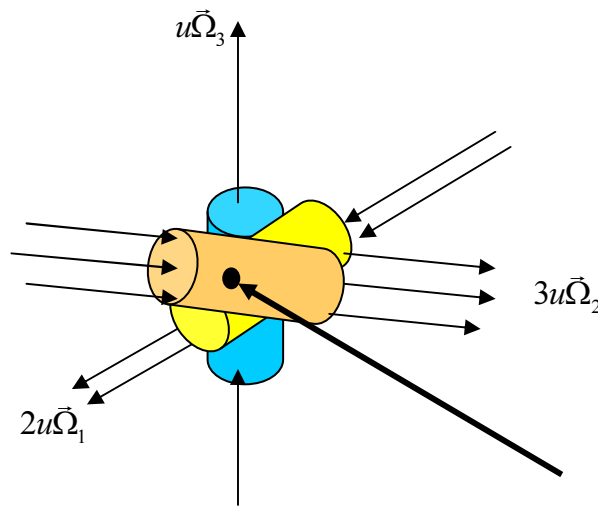


Рисунок 3.3. К третьему определению понятия флюэнса

Переход к величине флюэнса в соответствии с комментарием к определению мощности флюэнса по формуле (Б4.21), осуществляется следующим образом. Флюэнс частиц в точке $\vec{r}$ нужно определять за промежуток времени $t - t_0$, достаточный для того, чтобы понятие флюэнса приобрело смысл:

$$\Phi(\vec{r}, t) = \Phi(\vec{r}, t, t_0) = \int_{t_0}^t dt' \phi(\vec{r}, t'). \quad (\text{Б4.26})$$

Выбор нижнего предела интегрирования в (Б4.13) зависит от конкретной ситуации облучения, но следует иметь в виду, что в момент начала облучения величина $\phi(\vec{r}, t')$ не может быть экспериментально определена. Можно говорить лишь о теоретическом значении этой величины, получаемом путем экстраполяции экспериментальных данных на момент времени t_0 (например, в случае, когда поле излучения создается радиоактивными источниками).

Флюэнс энергии и его мощность

В отличие от понятия флюэнса частиц, или просто флюэнса, понятие флюэнса энергии может быть введено только через распределение флюэнса частиц по энергиям и направлениям их движения. Именно, *флюэнсом энергии* называется величина

$$\Psi(\vec{r}, t, t_0) = \int_{t_0}^t dt' \int_0^\infty dE \int_{4\pi} d\Omega E \phi(E, \vec{\Omega} | \vec{r}, t). \quad (\text{Б4.27})$$

Понятие флюэнса энергии вводится для установления связи между характеристиками поля ионизирующего излучения и характеристиками радиационного воздействия – различными видами доз.

Из (Б4.27) видно, что не существует понятия флюэнса вообще, на основании которого можно было бы формулировать понятия флюэнса частиц и флюэнса энергии. Исходным является понятие флюэнса частиц. Поэтому эту величину часто и называют просто флюэнсом.

Мощность флюэнса энергии естественно определить по формуле

$$\psi(\vec{r}, t) = \int_0^\infty dE \int_{4\pi} d\Omega E \phi(E, \vec{\Omega} | \vec{r}, t), \quad (\text{Б4.28})$$

где угловое и энергетическое распределение мощности флюэнса энергии определяется подынтегральным выражением $\psi(E, \vec{\Omega} | \vec{r}, t) = E \phi(E, \vec{\Omega} | \vec{r}, t)$. С помощью этой величины можно определить флюэнс энергии частиц, движущихся в телесном угле Ω с энергиями, лежащими в интервале (E_1, E_2) по формуле, аналогичной (Б4.25), а также другие интегральные величины – аналоги (Б4.23) и (Б4.24).

Размерность мощности флюэнса энергии $\text{EL}^{-2}\text{T}^{-1}$. Если рассматривать понятие «поток» в «оптическом смысле», то тогда мощность флюэнса энергии можно назвать плотностью потока энергии, либо интенсивностью ионизирующего излучения. Интеграл

$$\psi(\vec{\Omega} | \vec{r}, t) = \int_0^\infty dE E \phi(E, \vec{\Omega} | \vec{r}, t) = I(\vec{\Omega} | \vec{r}, t) \quad (\text{Б4.29})$$

даст угловое распределение интенсивности излучения. В случае поля с осевой симметрией зависимость (Б4.29) можно графически изобразить в виде некоторой *диаграммы направленности*, которая строится в полярных координатах (I, ϑ) .

Понятия «флюэнс частиц» и «флюэнс энергии» носят «накопительный» или «аккумулятивный» характер. Эти величины являются числовой и энергетической характеристикой радиационного поля соответственно, которые отнесены к единице площади. Они, тем не менее, не связаны с ориентацией какой-либо площадки по отношению к направлению движения ионизирующих частиц. Поэтому флюэнс частиц и флюэнс энергии называются *потокowymi величинами* [Б4].

В следующих пунктах рассматриваются величины, характеризующие направление движения частиц ионизирующего излучения.

Токовые величины

Поток частиц через поверхность и его мощность

Результирующим потоком частиц $\{net\ particle\ flow\}$ в точке $\vec{r}$ называется результирующее ожидаемое число частиц, проходящих за определенный интервал времени через единицу площади поверхности в направлении, взятом за положительное.

В этом определении понятие «поток» понимается в «гидродинамическом» смысле.

Пусть ΔM_p^+ – ожидаемое число частиц, пересекающих небольшую плоскую площадку площадью da в положительном направлении, а ΔM_p^- – ожидаемое число частиц, пересекающих данную площадку в отрицательном направлении по отношению к направлению единичного вектора нормали к площадке $\vec{n}$ (Рисунок 3.4). Тогда результирующее число частиц, пересекающих площадку Δa за некоторое время в положительном направлении нормали $\vec{n}$ к этой площадке, определится следующим образом:

$$\Delta M_p = \Delta M_p^+ - \Delta M_p^-. \quad (\text{Б4.30})$$

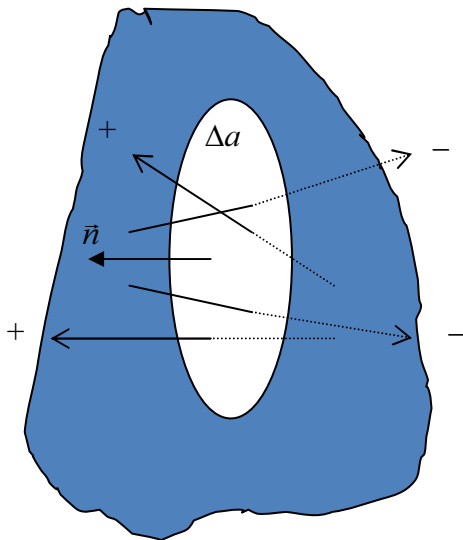


Рисунок 3.4. К определению результирующего потока частиц.

Результирующим потоком частиц в точке некоторой поверхности с радиус-вектором $\vec{r}$ называется величина J_n , определяемая как предел, к которому стремится отношение результирующего числа частиц, пересекающих данную площадку, к площади этой площадки при стягивании ее в точку

$$J_n = \lim_{\Delta a \rightarrow 0} \frac{\Delta M_p}{\Delta a} = \frac{\delta M_p}{da}. \quad (\text{Б4.31})$$

Здесь бесконечно малое результирующее ожидаемое число частиц, проходящих через элементарную площадку, обозначено тем же символом δ , что и в (Б4.17), т.к. рамках допущений, принимаемых при определении понятия поля ионизирующего излучения (см. п. 4.1), в δM_p могут быть включены только частицы, которые полностью проходят через

элементарный объем вблизи элемента поверхности da .

При решении задач теории переноса ионизирующего излучения, дозиметрии и радиационной защиты рассматриваются односторонние потоки частиц

$$J_n^+ = \lim_{\Delta a \rightarrow 0} \frac{\Delta M_p^+}{\Delta a} = \frac{\delta M_p^+}{da}, \quad J_n^- = \lim_{\Delta a \rightarrow 0} \frac{\Delta M_p^-}{\Delta a} = \frac{\delta M_p^-}{da}. \quad (\text{Б4.32})$$

В соответствии с (Б4.30) и (Б4.31)

$$J_n = J_n^+ - J_n^-. \quad (\text{Б4.33})$$

Так же, как и флюэнс частиц, поток частиц является накопительной величиной. Обе величины имеют одинаковые размерности L^{-2} . Главные отличия понятия результирующего потока частиц в точке от флюэнса:

- число частиц ΔM_p , определяющих результирующий поток, не входят частицы, движущиеся вдоль поверхности (поэтому для обозначения числа частиц используется буква M , а не N);
- поток частиц зависит от ориентации площадки, через которую он проходит.

Мощностью результирующего потока частиц {particle flow rate} через некоторую поверхность в точке $\vec{r}$ называется скорость изменения результирующего потока частиц (Б4.31) со временем:

$$j_n = \frac{\delta J_n}{dt}. \quad (\text{Б4.34})$$

Смысл использования символа δ при обозначении бесконечно малых изменений потока сохраняется тем же, что и в формуле (Б4.21) для мощности флюэнса.

Аналогично (Б4.32) могут рассматриваться и мощности односторонних потоков

$$j_n^+ = \frac{\delta J_p^+}{dt}, j_n^- = \frac{\delta J_p^-}{dt}. \quad (\text{Б4.35})$$

В соответствии с (Б4.33)

$$j_n = j_n^+ - j_n^-. \quad (\text{Б4.36})$$

Размерность мощности потока совпадает с размерностью мощности флюэнса и равна $L^{-2}T^{-1}$. Но эта величина, вообще говоря, не совпадает с мощностью флюэнса хотя бы потому, что в нее не вкладывают частицы, движущиеся вдоль поверхности. Поэтому ее нельзя назвать плотностью потока частиц.

Таким образом, результирующий поток (Б4.31), односторонние потоки (Б4.32), а также их мощности (Б4.34), (Б4.35) характеризуют направленность движения частиц. Не смотря на то, что в их названии фигурирует слово «поток», их следует относить к *токовым величинам*.

Распределения потока частиц и мощности потока частиц по энергиям и направлениям движения частиц. Связь с интегральными величинами

Аналогично ранее введенным распределениям для флюэнса и мощности флюэнса по энергиям и направлениям движения частиц излучения можно рассматривать соответствующие распределения токовых величин по энергиям и направлениям $J_n(E, \vec{\Omega}|\vec{r}, t); j_n(E, \vec{\Omega}|\vec{r}, t)$, которые связаны между собой соотношением

$$J_n(E, \vec{\Omega}|\vec{r}, t, t_0) = \int_{t_0}^t dt' j_n(E, \vec{\Omega}|\vec{r}, t'), \quad (\text{Б4.37})$$

где нижний предел интегрирования выбирается в соответствии с замечанием, данным после формулы (Б4.26). На уровне распределений по направлениям можно установить связь между потоком, либо мощностью потока и флюэнсом, либо мощностью флюэнса:

$$J_n(E, \vec{\Omega}|\vec{r}, t, t_0) = \bar{n}\bar{\Omega}\Phi(E, \vec{\Omega}|\vec{r}, t, t_0); j_n(E, \vec{\Omega}|\vec{r}, t) = \bar{n}\bar{\Omega}\phi(E, \vec{\Omega}|\vec{r}, t). \quad (\text{Б4.38})$$

Эта связь вытекает из определений величин $J_n(E, \vec{\Omega}|\vec{r}, t, t_0)$; $j_n(E, \vec{\Omega}|\vec{r}, t)$ и третьего определения флюэнса (см. п. 3.4.1.1, а также Рисунок 3.3).

На основе формул (Б4.38) теперь можно установить связь между токовыми и потоковыми величинами для пучков частиц ионизирующего излучения, движущихся с энергиями в интервале (E_1, E_2) : в пределах телесного угла Ω :

$$J_n(E_1, E_2; \Omega|\vec{r}, t, t_0) = \int_{E_1}^{E_2} dE \int_{\Omega} d\Omega \bar{n}\bar{\Omega}\Phi(E, \vec{\Omega}|\vec{r}, t, t_0); \quad (\text{Б4.39})$$

$$j_n(E_1, E_2; \Omega|\vec{r}, t) = \int_{E_1}^{E_2} dE \int_{\Omega} d\Omega \bar{n}\bar{\Omega}\phi(E, \vec{\Omega}|\vec{r}, t).$$

Подынтегральные выражения в (Б4.39) позволяют ввести понятия *распределения вектора потока частиц излучения по энергиям и направлениям их движения* и *распределения вектора мощности потока частиц по энергиям и направлениям их движения* следующим образом:

$$\vec{J}(E, \vec{\Omega}|\vec{r}, t, t_0) = \bar{\Omega}\Phi(E, \vec{\Omega}|\vec{r}, t, t_0), \vec{j}(E, \vec{\Omega}|\vec{r}, t) = \bar{\Omega}\phi(E, \vec{\Omega}|\vec{r}, t). \quad (\text{Б4.40})$$

Эти величины связаны только с направлением движения частиц, но не с ориентацией площадки, фигурирующей в определении величин (Б4.38). Поэтому их следует признать исходными векторными характеристиками поля излучения — *базовыми числовыми токовыми величинами*.

Из величин (Б4.40) можно построить соответствующие интегральные характеристики: *векторы потока частиц и мощности потока частиц*, движущихся с энергиями в диапазоне от E_1 до E_2 в пределах телесного угла Ω :

$$\vec{J}(E_1, E_2; \Omega|\vec{r}, t, t_0) = \int_{E_1}^{E_2} dE \int_{\Omega} d\Omega \bar{\Omega}\Phi(E, \vec{\Omega}|\vec{r}, t, t_0); \vec{j}(E_1, E_2; \Omega|\vec{r}, t) = \int_{E_1}^{E_2} dE \int_{\Omega} d\Omega \bar{\Omega}\phi(E, \vec{\Omega}|\vec{r}, t). \quad (\text{Б4.41})$$

Интегрируя во всем диапазоне изменений энергий и телесных углов, из (Б4.41) можно получить выражения для *векторов результирующего потока и мощности результирующего потока частиц*:

$$\vec{J}(\vec{r}, t, t_0) = \vec{J}(0, \infty; 4\pi|\vec{r}, t, t_0) = \int_0^\infty dE \int_{4\pi} d\Omega \bar{\Omega}\Phi(E, \vec{\Omega}|\vec{r}, t, t_0); \quad (\text{Б4.42})$$

$$\vec{j}(\vec{r}, t) = \vec{j}(0, \infty; 4\pi|\vec{r}, t) = \int_0^\infty dE \int_{4\pi} d\Omega \bar{\Omega}\phi(E, \vec{\Omega}|\vec{r}, t).$$

Их скалярные произведения на единичный вектор нормали к некоторой поверхности в точке $\vec{r}$ приводят к величинам (Б4.31), (Б4.34).

Второе выражение в (Б4.42) можно было бы назвать вектором результирующей плотности тока частиц. С его помощью можно вычислить *силу тока частиц* через некоторую регулярную поверхность A

$$i(t) = \int_A da \vec{n} \vec{j}(\vec{r}, t). \quad (\text{Б4.43})$$

Для полей заряженных частиц умножением (Б4.43) на величину их электрического заряда можно получить силу электрического тока, создаваемого этими частицами.

С помощью представления (Б4.36) можно ввести в рассмотрение правостороннюю и левостороннюю силу тока частиц:

$$i^+(t) = \int_A da j_n^+(\vec{r}, t), i^-(t) = \int_A da j_n^-(\vec{r}, t). \quad (\text{Б4.44})$$

Из (Б4.43), (Б4.44) непосредственно вытекает второе название мощности потока частиц – *плотность тока частиц*.

Аналогичный (Б4.43) интеграл по поверхности от первого выражения в (Б4.42) даст результирующее число частиц $M(t, t_0)$, прошедших через поверхность A :

$$M(t, t_0) = \int_A da \vec{n} \vec{J}(\vec{r}, t, t_0) = M^+(t, t_0) - M^-(t, t_0). \quad (\text{Б4.45})$$

Значения

$$M^+(t, t_0) = \int_A da J_n^+(\vec{r}, t, t_0), M^-(t, t_0) = \int_A da J_n^-(\vec{r}, t, t_0) \quad (\text{Б4.46})$$

описывают число частиц, протекающих через поверхность по разные стороны от нее.

Векторы потока энергии и плотности тока энергии

По аналогии с материалом, изложенном в пп. 2.2 и 3.2, можно ввести распределения по энергиям и направлениям движения частиц ионизирующего излучения и для токовых величин:

$$\vec{J}_E(E, \vec{\Omega} | \vec{r}, t, t_0) = E \vec{\Omega} \Phi(E, \vec{\Omega} | \vec{r}, t, t_0), \vec{j}_E(E, \vec{\Omega} | \vec{r}, t) = E \vec{\Omega} \phi(E, \vec{\Omega} | \vec{r}, t). \quad (\text{Б4.47})$$

По ним строятся соответствующие интегральные энергетические характеристики поля ионизирующего излучения: *вектор потока энергии*

$$\vec{J}_E(E_1, E_2; \vec{\Omega} | \vec{r}, t, t_0) = \int_{E_1}^{E_2} dE E \vec{\Omega} \Phi(E, \vec{\Omega} | \vec{r}, t, t_0), \quad (\text{Б4.48})$$

и вектор *мощности потока энергии*, или *плотности тока энергии*

$$\vec{j}_E(E_1, E_2; \vec{\Omega} | \vec{r}, t) = \int \int_{4\pi E_1}^{E_2} dE E \vec{\Omega} \phi(E, \vec{\Omega} | \vec{r}, t) \quad (\text{Б4.49})$$

в интервале энергий (E_1, E_2) и в пределах телесного угла Ω в точке $\vec{r}$ к моменту времени t . Для фотонного излучения оба определения в (Б4.48) и (Б4.49) совпадают. С точки зрения электродинамики, величина $\vec{j}_E(\vec{r}, t) = \vec{j}_E(0, \infty; 4\pi|\vec{r}, t)$ представляет собой вектор Умова – Пойнтинга. В связи со сложившейся в электродинамике терминологией, должна бы называться вектором плотности потока (а не тока) энергии. Однако, по смыслу употребления терминов «поток» и «ток» в данном тексте сохраним за выражением (Б4.49) данные здесь названия.

Из сравнения (Б4.49) с (Б4.28) видно, что в общем случае $|\vec{j}_E(E_1, E_2; \Omega|\vec{r}, t)| \neq \psi(E_1, E_2; \Omega|\vec{r}, t)$. Равенство имеет место только для однонаправленного излучения. Это наблюдение дает дополнительные основания отказаться от применения термина «плотность потока энергии» в величине (Б4.49).

ФЛЮЭНС В ДОКУМЕНТАХ МКРЗ И МАГАТЭ

В глоссарии МАГАТЭ [Б8,9] и основном документе по радиационной безопасности, разработанном под эгидой МАГАТЭ [Б10,11] (Дополнение) предложен несколько иной подход к определению флюэнса. Сначала факультативно формулировано *общее определение флюэнса*, под которым понимается мера напряженности поля излучения, а затем даются устанавливаемые документами [Б8-11] определения энергетического флюэнса и флюэнса частиц. Определения мощностей соответствующих величин предложены в справочном варианте только в [Б8,11]. При этом дается ссылка на Публикацию 74 МКРЗ [Б12]. Приведем эти формулировки на языке оригинала, а затем в русском переводе согласно [Б8,9] (символом (i) обозначено информационное примечание, не являющееся определением, которое устанавливается цитируемым документом).

«fluence {флюэнс}

- (i) A measure of the strength of radiation field. Commonly used without qualification to mean particle fluence.

{Мера напряженности радиационного поля. Данный термин обычно применяется без оговорок для обозначения флюэнса частиц.}

energy fluence, Ψ {флюэнс энергии, Ψ }. A measure of the energy density of a radiation field, defined as {Мера плотности энергии радиационного поля, выражаемая формулой}

$$\Psi = \frac{dR}{da} \quad (\text{Б5.1})$$

where dR is the radiation energy incident on a sphere of cross-sectional area da

{где dR – энергия излучения, падающего на сферу с площадью поперечного сечения da .}

- (i) The energy fluence rate {величина флюэнса энергии²¹}

$$\frac{d\Psi}{dt} \quad (\text{B5.2})$$

is denoted by the lowercase ψ {обозначается строчной буквой ψ }).

particle fluence, Φ {флюэнс частиц, Φ }. A measure of the density of particles in a radiation field, defined as {Мера плотности частиц в поле излучения, выражаемая формулой}

$$\Phi = \frac{dN}{da}, \quad (\text{B5.3})$$

where dN is the number of particles incident on a sphere of cross-sectional area da {где dN – число частиц, падающих на сферу с площадью поперечного сечения da }.

- (i) The energy fluence rate {величина флюэнса энергии³}

$$\frac{d\Phi}{dt} \quad (\text{B5.4})$$

is denoted by the lowercase ϕ {обозначается строчной буквой ϕ }.)»

Следует отметить, что в окончательном варианте издания на английском языке из документа [B10] исключены определения мощности флюэнса энергии и флюэнса частиц.

В то же время определение флюэнса согласно публикации МКРЗ [B10], на которую ссылаются в [B8-11],

«Fluence

denoted as Φ is the quotient of dN by da , where dN is the number of particles incident on a sphere of cross-sectional area da , thus {обозначаемый как Φ , есть частное от деления dN на da , где dN – число частиц, падающих на сферу с площадью поперечного сечения da (перевод авт.)}:

$$\Phi = \frac{dN}{da} \text{ »}.$$

Таким образом, МКРЗ ограничивается только определением флюэнса частиц, называя его просто флюэнсом, а само определение, данное МКРЗ, является чисто *операциональным*. В то же время Глоссарий [B8,9] и основной документ по безопасности [B10,11] МАГТЭ предлагают, пусть и факультативно, *онтологическую* трактовку флюэнса частиц и флюэнса энергии как некоторых плотностей энергии и частиц соответственно. При этом говорится о плотности частиц вместо плотности числа частиц (density of particles number)» что приводит к подмене понятий, т.к. термин «плотность частиц» относится к

²¹ Переводчиком в [9] опущено ключевое слово rate – скорость изменения; в данном случае необходимо говорить о мощности флюэнса энергии (прим. авт.).

плотности материи, из которой состоят частицы, а для описания поля излучения следовало бы говорить о плотности числа частиц, которые должны рассматриваться как точечные объекты и к которым понятие плотности составляющей их материи неприменимо.

Понятия флюэнса частиц (Б5.3), вводимое в [Б8-11], на первый взгляд, совпадает с определением (Б4.27). Но в формулировке [Б8-11] не оговаривается, что частицы обязательно должны пересечь всю сферу и по прямолинейным траекториям. Число частиц dN определяется как число частиц, падающих на сферу. Поэтому эти определения не идентичны. Те же замечания касаются и определений флюэнса энергии (Б5.1) и (Б4.27). Кроме того, в определении (Б5.1) не указывается, о какой именно энергетической характеристике частиц излучения идет речь – кинетической энергии, или полной энергии, включая энергию покоя.

В [Б8-11] вводится в рассмотрение, пусть и факультативно, онтологическое определение флюэнса вообще. Это определение содержит заимствованное из электродинамики понятие «напряженность поля», которое в случае радиационного поля, или поля ионизирующего излучения требует уточнения. Понятие напряженности поля строго применимо лишь к векторным и тензорным полям. Значит, чтобы иметь право применять его, необходимо ввести соответствующую силовую векторную характеристику поля излучения. Мощность флюэнса частиц можно было бы рассматривать как временную компоненту четырехмерного вектора среднего тока частиц (Б4-тока частиц), который, тем не менее, не может служить величиной, трактуемой как напряженность радиационного поля, т.к. ни флюэнс, ни вектор плотности тока частиц не определяют силовое воздействие радиационного поля. Аналогично можно объединить мощность флюэнса энергии вместе с вектором среднего тока энергии (Б4.49) в один 4-вектор тока энергии. Однако, и эта величина не может претендовать на роль силовой характеристики радиационного поля. Да и, в принципе, обсуждать силовое, механическое действие поля ионизирующего излучения на макроскопические тела вряд ли возможно хотя бы в силу его проникающей способности. Поэтому использование термина «напряженность поля» применительно к полю ионизирующего излучения нельзя считать оправданным.

Список использованных источников

- Б1. Излучения ионизирующие и их измерения. Термины и определения. Рекомендации по межгосударственной стандартизации РМГ 78-2005. М.: Стандартинформ, 2006.
- Б2. Излучения ионизирующие и их измерения. Термины и определения. ГОСТ 15484-81.
- Б3. Физическая энциклопедия / Под ред. А.М.Прохорова. Тт. 1–5. М.: «Большая Российская энциклопедия», 1998.
- Б4. Иванов, В.И. Курс дозиметрии. 4-е изд. перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1988.
- Б5. Гусев, Н.Г. Защита от ионизирующих излучений. Т.1. Физические основы защиты от излучений. / Н.Г.Гусев, В.А.Климанов, В.П.Машкович, А.П.Суворов. М.: Энергоатомиздат, 1989.
- Б6. Shultis, J.K. Radiation shielding. / J.K.Shultis, R.E.Faw. Prentice Hall, PTR, 1996.
- Б7. Sabol, J. Radiation protection dosimetry. / J.Sabol, P.S.Weng. World Scientific, Singapore e.a., 1995.
- Б8. IAEA Safety Glossary. Terminology, used in nuclear safety and radiation protection.2007 Eddition. Vienna, IAEA, 2007.
- Б9. Глоссарий МАГАТЭ по вопросам безопасности. Терминология, используемая в области ядерной безопасности и радиационной защиты. / Издание 2007 года. Вена: МАГАТЭ, 2007.

- Б10. Radiation protection and safety of radiation sources: International basic safety standards. General safety requirements, Part 3. / Jointly Sponsored by EC, FAO, IAEA, ILO, OECD/NEA, PAHO, UNEP, WHO. Vienna: IAEA, 2014
- Б11. Радиационная защита и безопасность источников излучения: Международные основные нормы безопасности (промежуточное издание). Общие требования безопасности. Серия норм МАГАТЭ по безопасности, № GSR Part 3 (Interim) / Вена: МАГАТЭ, 2011.
- Б12. International Commission on Radiological Protection. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation / ICRP Publication 74, Annals of the ICRP Volume. Oxford and New York: Pergamon Press, 1997.
- Б13. Физические величины. Справочник. / Под ред. И.С.Григорьева, Е.З.Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991.
- Б14. Handbook on radioactivity analysis / Second Edition. Ed. by M.F.L'Annunziata. Oxford: Elsevier Science, 2003.
- Б15. Knoll, G.F. Radiation detection and measurement / Glenn F. Knoll – 3rd ed. Hoboken: J.Wiley and Sons, 1999.
- Б16. Particle Data Group. Annual report. 2015
- Б17. Taylor, L.S. Linear energy transfer / L.S.Taylor, M.Tubiana, H.O.Wyckoff, A.Allisy, J.W.Boag, R.H.Chamberlain, E.P.Cowan, F.Ellis, J.F.Fowler, H.Fränk, F.Gauwerky, J.R.Greening, H.E.Johns, K.Lidén, R.H.Morgan, V.F.Petrov, H.H.Rossi, A.Tsuya. ISRU Report 16. Washington, D.C.: International Commission on Radiation Units and Measurements, 1970.
- Б18. Батурицкий, М.А. Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом / Батурицкий, И.Я.Дубовская. Минск: РИВШ, 2010.
- Б19. Широков, Ю.М. Ядерная физика. / Широков Ю.М., Юдин Н.П. М.: Наука, 1980.
- Б20. Закон о радиационной безопасности населения. Закон Республики Беларусь № 122-З от 05 января 1998 с изменениями и дополнениями от 21 декабря 2005 г. № 72-З и от 6 ноября 2008 г. № 440-З.
- Б21. Санитарные нормы и правила «Требования к радиационной безопасности». Постановление Министерства здравоохранения от 28.12.2012, № 213.

Оценка нижнего порога энергии частиц ионизирующего излучения

Ионизация атомов и молекул является эндоэнергетической реакцией. Энергия этой реакции, Q -фактор, отрицательна: $Q < 0$, рассчитывается по формуле

$$E_{thr} = |Q| \left(1 + \frac{M_{pr}}{M_t} + \frac{|Q|}{2M_t c^2} \right), \quad (\text{БА.1})$$

где M_{pr} – масса налетающей частицы, M_t – масса частицы вещества, с которой происходит взаимодействие. Формула (А.1) справедлива для любых видов частиц, движущихся с любыми энергиями. Она дает возможность установить нижний порог энергии частиц, выше которого эти частицы можно было бы относить к ионизирующему излучению. Результаты расчетов при этом будут несколько отличаться в зависимости от вида процесса, по которому идет ионизация.

Непосредственная ионизация.

Если в результате рассеяния налетающей заряженной частицы, P , на нейтральном атоме (молекуле) X образуется положительно заряженный ион X^+ и электрон,



то Q -фактор такой реакции равен энергии возбуждения, взятой со знаком минус:

$$Q = (M(X) - M(X^+) - M_e)c^2 = -I, \quad (\text{БА.3})$$

где $M(X)$ и $M(X^+)$ – массы нейтрального атома (молекулы) и образовавшегося иона соответственно, а M_e – масса электрона. Во всех случаях $I \ll M(X)$. Поэтому нижнее значение кинетической энергии ионизирующей заряженной частицы, согласно (БА.1), (БА.3) для реакции (БА.2) может быть оценено величиной

$$E_0 = \bar{I} \left(1 + \frac{M_{pr}}{M(X)} \right). \quad (\text{БА.4})$$

Для оценок в (БА.4) достаточно подставлять средние значения энергий возбуждения. Второе слагаемое в скобках в (БА.4) существенно отличает E_0 от средней энергии возбуждения лишь при сравнимых массах налетающих частиц и атомов (молекул). Для легких ионизирующих частиц с хорошей степенью точности $E_0 = \bar{I}$. Это равенство остается справедливым для мюонов и пионов, например, но может уже не выполняться для таонов и тяжелых мезонов.

Если тяжелая заряженная, или нейтральная (например, нейтрон) частица P выбивает из атома (молекулы) X ядро, или ион X^{n+} с кратностью ионизации $n > 1$, то такую реакцию можно записать в виде.



и для энергии Q этой реакции получим выражение

$$Q = (M(X) - M(X^{n+}) - nM_e)c^2, \quad (\text{БА.6})$$

которое сводится к величине средней энергии возбуждения, умноженной на кратность ионизации, если в ионе X^{n+} оставшиеся электроны занимают те же уровни энергии, что и в исходном атоме (молекуле):

$$Q \approx -n\bar{I}. \quad (\text{БА.7})$$

Тогда подстановка (БА.7) в (БА.1) для наименьшей возможной энергии налетающей частицы P даст следующую оценку

$$E_0 \approx n\bar{I} \left(1 + \frac{M_{pr}}{M(X)} + \frac{n\bar{I}}{2M(X)c^2} \right), \quad (\text{БА.8})$$

При достаточно высокой кратности ионизации n последним слагаемым в скобках в (БА.8) уже пренебрегать нельзя.

При рассеянии фотонов на электронах атома



энергия реакции имеет вид (БА.3), а формула (БА.4) переходит в равенство

$$E_0 = \bar{I}, \quad (\text{БА.10})$$

которая выполняется с той же степенью точности. Т.о. при рассеянии фотонов на электронах атомов (молекул) азота наименьшая энергия частиц фотонного ионизирующего излучения будет иметь порядок 100 эВ. Для определенности условный порог энергии для фотонного ионизирующего излучения в силу (Б1.3), (Б1.4) можно принять равным 124 эВ.

Косвенная ионизация.

Типичным косвенным процессом является атомарный фотоэффект. В этом случае фотон поглощается, а вылетает электрон



Выражение для наименьшей энергии, которой должен обладать фотон, чтобы происходила ионизация, определяется тем же равенством (БА.10).

Образование электрон-позитронных пар в веществе является другим случаем косвенного процесса, приводящего к возникновению непосредственно ионизирующего излучения. Энергия реакции образования электрон-позитронной пары $Q = -2M_e c^2$. Энергия налетающего фотона, согласно (БА.1) должна быть не меньше

$$E_{e^+e^-} = 2M_e c^2 \left(1 + \frac{M_e}{M_t} \right). \quad (\text{БА.12})$$

Если электрон-позитронная пара образуется при взаимодействии налетающего фотона с виртуальным фотоном из поля ядра, то M_I в (БА.12) есть масса ядра, которая примерно в $1840A$ раз больше массы электрона, если A – массовое число ядра. Поэтому порог образования электрон-позитронной пары в поле ядра, $E_{e^+e^-,N}$, в хорошем приближении можно считать равным модулю энергии реакции:

$$E_{e^+e^-,N} = 2M_e c^2. \quad (\text{БА.12})$$

Если же пара образуется в поле атомарного электрона, то из (БА.12) следует, что

$$E_{e^+e^-,e} = 4M_e c^2. \quad (\text{БА.13})$$

В отличие от (БА.12) равенство в (БА.13) – строгое.

Если частица вызывает ядерную реакцию, то, в зависимости от вида этой реакции могут возникать различные процессы с рождением новых частиц и ядер. Заряженные частицы, например, пионы, порожденные взаимодействием протонов первичных космических лучей с ядрами атомов азота, уже оказывают непосредственное ионизирующее действие на вещество, если обладают достаточной для этого кинетической энергией, ниже значение которой будет по-прежнему оцениваться формулой $E_0 = \bar{I}$. Но эти пионы могут также превратиться в мюоны и соответствующие нейтрино, а мюоны, в свою очередь, с электроны и антинейтрино электронные. А уже образовавшиеся мюоны и электроны могут непосредственно ионизировать вещество. Учитывая, что массы нейтрино очень малы, можно с хорошей степенью точности принять и в этом случае, что $E_0 = \bar{I}$.

Фотоны, возникающие в реакциях радиационного захвата ядрами, например, нейтронов, (n,γ) , как правило, имеют достаточную энергию для эффективной ионизации вещества. Здесь величина минимальной энергии фотонов также определяется условием (БА.10).

А вот при делении ядер нейтронами возникающие осколки деления обладают высокой кинетической энергией (десятки и сотни МэВ) и способны ионизировать вещество. Пороговое значение энергии для осколка деления, при которой его следует относить к ионизирующему излучению, может быть рассчитано по формуле (БА.4).

ДОЗИМЕТРИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

В данном материале, подготовленном для Портала ядерных знаний, предлагается краткое изложение принятых на сегодняшний день терминов и определений в области дозиметрии ионизирующего излучения (в дальнейшем будем сокращенно писать «Дозиметрия»). При этом внимание сосредоточено на формулировках основных понятий и представлений, общих для всех дозиметрических методов измерений, либо расчетных методов. Определения ряда понятий и представлений основываются на нормативном документе [B1] и предшествовавшем ему документе [B2]. Используются также определения, приведенные в статьях Физической энциклопедии [B3] и в научно-методической и учебной литературе [B4-9]. В некоторых случаях предлагаются уточненные формулировки, подкрепляемые соответствующими рассуждениями. В случае существенного отличия даваемого здесь определения от нормативного, дается соответствующий комментарий.

Система обозначений, принятая в данном тексте, подробно описана в материале «Ионизирующее излучение. Поле ионизирующего излучения и его характеристики». Ссылки на этот материал будут обозначаться символом [B*].

РАССМАТРИВАЕМЫЕ МОДЕЛИ ПОЛЯ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ВЕЩЕСТВА

Процесс взаимодействия ионизирующего излучения с веществом носит вероятностный характер. Это обусловлено, с одной стороны, тем, что частицы ионизирующего излучения и взаимодействующие с ними ядра атомов, атомы и молекулы являются квантовыми объектами. С другой стороны, на эту квантовую картину свой отпечаток наносит статистический характер поведения атомов и молекул в веществе.

Первичные процессы взаимодействия отдельной частицы ионизирующего излучения с веществом (средой) происходят в пределах одного атома, или молекулы, либо в пределах только одного ядра атома, и характеризуются определенным средним временем реакции τ . Каждый такой микроскопический процесс описывается вероятностью в единицу времени, определяющей микроскопическое сечение реакции. Из отдельных процессов на ядерном и атомно-молекулярном уровнях в некотором объеме вещества формируется т.н. отклик среды на действие ионизирующего излучения, который можно просто назвать *радиационным откликом* {*radiation response*}, или *радиационным воздействием* {*radiation impact*}. Общей мерой радиационного отклика может служить энергия, переданная веществу в некотором его объеме, либо электрический заряд ионов одного знака, порожденных ионизирующим излучением, в течение определенного промежутка времени Δt , значительно превышающего среднее время реакции τ и время пролета данного объема частицами ионизирующего излучения.

Выбор рассматриваемого объема зависит от модели поля ионизирующего излучения и модели вещества, в соответствии с которой изучается действие на него ионизирующего излучения. В данном материале будет рассматриваться модель, в которой поле излучения может быть описано с помощью распределения флюэнса частиц $\Phi(E, \vec{\Omega} | \vec{r}, t)$, либо мощности флюэнса частиц, $\phi(E, \vec{\Omega} | \vec{r}, t)$, по энергиям, E , и направлениям движения частиц, задаваемых

единичным вектором $\vec{\Omega}$ (т.н. дважды дифференциального распределения), рассматриваемых в виде непрерывных функций координат точек пространства, собранных в радиус-вектор $\vec{r}$, и времени, t [В*]. Под точкой пространства в дозиметрии понимается элементарный объем, определенный в [В*], п. 4.1, как некоторый макроскопический объем вещества, который достаточно мал, чтобы в его пределах можно было бы считать однородным поле ионизирующего излучения и макроскопические характеристики вещества. В этом случае переданную энергию также можно относить к точке вещества, которое рассматривается как сплошная среда.

В сплошной среде все величины относят к элементарному объему вещества, dV , либо к элементарной массе вещества dm .

Промежутки времени, которые допустимо рассматривать в этой модели, должны быть намного больше среднего времени пролета частицами ионизирующего излучения через элементарный объем (следовательно, характеристики поля излучения слабо изменяются в пределах рассматриваемых промежутков времени). Только при этих ограничениях обсуждаемые ниже дозиметрические характеристики имеют смысл.

МИКРОДОЗИМЕТРИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

Предметом микродозиметрии является статистические закономерности передачи энергии, либо образования зарядов в веществе ионизирующим излучением. Как уже говорилось в п. 2.1, статистическая природа взаимодействия ионизирующего излучения с веществом обусловлена:

- 1) квантовой природой частиц излучения и вещества, взаимодействие которых описывается вероятностью взаимодействия в единицу времени;
- 2) статистическим характером поведения микрочастиц вещества.

Поэтому микродозиметрические величины рассматриваются как случайные величины, описываемые некоторым законом распределения. Этот закон распределения, строго говоря, должен был бы устанавливаться как результат некоторого сочетания соответствующих квантовых и статистических распределений, что представляет значительную трудность. Вместо этого литературе обычно рассматриваются различные гипотезы, основанные на тех или иных предположениях. В частности, предполагается, что отдельные события взаимодействия ионизирующего излучения с веществом независимы друг от друга, локализованы вдоль треков частиц, и вероятности их возникновения распределены по Пуассону (см., например, [В4]).

К микродозиметрическим величинам относятся [В4,6,8]:

переданная энергия, ϵ {energy imparted};

линейная энергия, y {lineal energy};

удельная энергия, z {specific energy}.

Переданная энергия (энерговыведение) – случайная величина, равная энергии ионизирующего излучения, фактически поглощенной в заданном элементарном объеме.

Под действием ионизирующего излучения в элементарном объеме вещества возникает не только ионизация и возбуждение молекул и могут инициироваться ядерные реакции, но и возникает изменение внутренней энергии элементарного объема, связанное с изменением структуры вещества, возбуждением атомов и молекул, инициированием

химических реакций, приобретением атомами и молекулами вещества кинетической энергии, которая первоначально превышает среднюю кинетическую энергию теплового движения и в результате столкновений переходит, в конечном счете, в тепловую энергию, и т.п. В связи с этим энергия ионизирующего излучения, фактически поглощенная веществом в элементарном объеме, ε , может быть определена как разность суммарных энергий частиц ионизирующего излучения (за вычетом энергий покоя этих частиц), вошедших в элементарный объем r_{in} , и вышедших из него, r_{out} , к которой следует добавить сумму Q -факторов всех реакций, произошедших в элементарном объеме [В6-9]:

$$\varepsilon = r_{in} - r_{out} + \sum Q. \quad (B3.1)$$

В сумму в правой части (B3.1) могут входить и Q -факторы химических реакций, инициированных излучением. Учет тех, или иных эффектов может представлять интерес с точки зрения биологических и медицинских последствий действия ионизирующего излучения на организм человека, и в зависимости от этого энергию химических реакций, вызванных в веществе ионизирующим излучением, можно включать, либо не включать в определение переданной энергии.

Определение переданной энергии как случайной величины, можно давать по-разному. С одной стороны, величина переданной энергии, отнесенной к одному и тому же элементарному объему среды, в постоянном поле ионизирующего излучения принимает случайные значения для различных равных между собой промежутков времени ее измерения. С другой стороны, можно говорить о разбросе значений переданной энергии за один и тот же промежуток времени, определенных в одинаковых, но различных по расположению элементарных объемах однородной среды в однородном постоянном поле излучения. Предполагается, что усреднение в обоих случаях приводит к одному и тому же результату (эргодическая гипотеза).

Линейная энергия – переданная энергия, отнесенная к единице средней длины хорды рассматриваемого элементарного объема $\bar{l}$:

$$y = \frac{\varepsilon}{\bar{l}}. \quad (B3.2)$$

Иногда ее определяют только для одного акта взаимодействия (см., например, [В4]), беря в числителе (B3.1) вместо ε величину ε_1 – энергии, передаваемой в одном акте взаимодействия. В этом случае величина (B3.2) будет описываться распределением вероятностей ее значений, аналогичным распределению, описывающему статистическое поведение однократного энерговыделения ε_1 .

Удельная энергия – переданная энергия $d\varepsilon$, отнесенная к единице массы, dm , вещества в элементарном объеме:

$$z = \frac{d\varepsilon}{dm}. \quad (B3.3)$$

Значения линейной энергии и удельной энергии подчиняются тем же законам распределения, что и значения переданной энергии.

Средние значения микродозиметрических величин связаны с основными дозиметрическими величинами (см. раздел 4).

ОСНОВНЫЕ (БАЗОВЫЕ) ДОЗИМЕТРИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

К основным (базовым) дозиметрическим величинам относятся [B7]:

- поглощенная доза;
- керма;
- экспозиционная доза.

Основные дозиметрические величины являются результатом усреднения микродозиметрических величин и поэтому относятся к классу *детерминированных величин*.

К основным дозиметрическим величинам также относят линейную передачу энергии (ЛПЭ) [B6-9], (см. также определение ЛПЭ в [B*]), и недавно стали относить величину коэффициента линейной передачи энергии косвенно ионизирующим излучением [B9]. Теория радиационного воздействия косвенно ионизирующего излучения достаточно хорошо развита на сегодняшний день только для фотонного излучения [B7]. Поэтому, по-видимому, пока не имеет особого смысла говорить от коэффициента линейной передачи энергии как о базовой дозиметрической величине.

Характерной особенностью основных дозиметрических величин, что они отнесены к точке среды, т.е. определяются в элементарном объеме (по отношению к массе этого объема – элементарной массе). Можно считать функцией точки и ЛПЭ.

Поглощенная доза

Поглощенной дозой (absorbed dose) называется средняя энергия, передаваемая единице массы вещества в элементарном объеме этого вещества:

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm}, \quad (B4.1)$$

где $d\bar{\epsilon}$ – средняя энергия, а dm – масса элементарного объема вещества.

Предполагается, что определение средней энергии, переданной веществу в элементарном объеме $d\bar{\epsilon}$, не зависит от того, каким образом происходит усреднение (см. раздел 3).

Поглощенная доза, D , (B4.1) является средним значением удельной энергии (B3.2), определенной в элементарном объеме.

Мощность поглощенной дозы

$$\dot{D} = \frac{\delta D}{dt} \quad (B4.2)$$

устанавливается по накопленной поглощенной дозе δD в элементарном объеме среды за промежутки времени dt , значительно превышающие среднее время взаимодействия частиц с веществом τ и среднее время пролета ими элементарного объема, в течение которых мощность флюэнса поля излучения можно считать постоянной.

Общепринятая единица поглощенной дозы (СИ) – 1 Грэй (Гр, Gy). 1 Гр = 1 Дж/кг. Традиционная единица поглощенной дозы – 1 рад. 1 рад = 100 эрг/г. Т.о. 1 рад = 0,01 Гр = 1 сГр.

Керма

Слово “керма” (*kerma*) является акронимом английской фразы, которая по сути дела является ее определением: kinetic energy released in matter, или, более детально: *средняя кинетическая энергия заряженных частиц, созданных в единице массы вещества* (kinetic energy of radiation produced per unit mass in matter). Понятие “керма” применимо, строго говоря, только к косвенно ионизирующему излучению (в большей степени – к фотонному излучению).

Если $\bar{E}_{ir}$ есть средняя суммарная кинетическая энергия всех заряженных частиц, высвобожденных под действием электрически нейтрального излучения в веществе массы m , то керма

$$K = \frac{d\bar{E}_{ir}}{dm} . \quad (B4.3)$$

Стандартная единица кермы – тоже 1 Гр.

Экспозиционная доза

Экспозиционная доза X (exposure) определяется как *абсолютная величина среднего заряда ионов одного знака, порождаемых фотонным излучением в единице массы сухого воздуха*:

$$X = \frac{d\bar{Q}}{dm} , \quad (B4.4)$$

где $d\bar{Q}$ – средний заряд ионов одного знака, образованных фотонным излучением в элементарной массе dm сухого воздуха.

Стандартная единица экспозиционной дозы – 1 Кл/кг. Широко распространенной внесистемной единицей экспозиционной дозы является 1 рентген (1 Р).

1 рентген – это экспозиционная доза фотонного излучения, под действием которого в 1 см³ сухого воздуха при нормальных условиях (101503 Па, 273,15 К) возникают ионы, с суммарным электрическим зарядом одного знака в 1 ед. СГСЭ = 0,33·10⁻⁹ Кл. Поэтому

$$1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг} . \quad (B4.5)$$

Понятие экспозиционной дозы, вообще говоря, применимо только к фотонному ионизирующему излучению. В случаях других видов излучения нужно либо отказаться от применения этого понятия, либо вводить поправочные коэффициенты, приводящие к устаревшему понятию физического эквивалента рентгена.

Электронное равновесие

Электронное равновесие возникает при условии, что средняя кинетическая энергия, уносимая электронами из элементарного объема, в котором они образовались под действием ионизирующего излучения, равна средней кинетической энергии приходящих в него электронов, образованных ионизирующим излучением вне этого объема. Тогда средняя энергия, передаваемая ионизирующим излучением веществу в элементарном объеме, будет

численно равна средней кинетической энергии электронов, образованных ионизирующим излучением в данном объеме.

Связь между основными дозиметрическими величинами

При наличии электронного равновесия керма и поглощенная доза сравниваются между собой по величине. Возникает возможность измерить керму по поглощенной дозе. В отсутствие электронного равновесия керму измерить нельзя.

В условиях электронного равновесия поглощенную дозу можно количественно связать с экспозиционной дозой. Пусть

$$\bar{w} = \frac{d\bar{\varepsilon}}{dN_i}$$

– средняя энергия ионообразования в элементарном объеме (дифференциальная средняя энергия ионообразования), где dN_i – среднее число ионов одного знака, образованных ионизирующим излучением. Положим, что под действием ионизирующего излучения образуются только однозарядные ионы (ионы с кратностью ионизации 1). Тогда из (B3.1) следует, что

$$D = \frac{d\bar{\varepsilon}}{dm} = \bar{w} \frac{dN_i}{dm} = \frac{\bar{w}}{e} \frac{edN_i}{dm} = \frac{\bar{w}}{e} \frac{d\bar{Q}}{dm} = \frac{\bar{w}}{e} X, \quad (B4.6)$$

где e – элементарный заряд. Величина $\bar{w}/e$ есть средняя энергия ионообразования, выраженная в электронвольтах.

Средняя энергия ионообразования для воздуха – 33,85 эВ. Средняя энергия ионообразования для воды – 36,9 эВ.

Поэтому в случае гамма- и рентгеновского излучения экспозиционной дозе $X = 1$ Кл/кг соответствует $D = 33,85$ Гр в воздухе, 36,9 Гр в биологической ткани при условии возникновения электронного равновесия.

Согласно (B4.5), (B4.6) экспозиционная доза в $X = 1$ Р соответствует $D = 0,873$ рад в воздухе, 0,95 рад в биологической ткани. С погрешностью в 5% экспозиционную дозу в рентгенах и поглощенную дозу в ткани в радах можно считать совпадающими. Этим объясняется удобство использования внесистемных дозиметрических единиц «рентген» и «рад».

Распределение поглощенной дозы по неограниченной ЛПЭ

Величина средней переданной энергии веществу в точке зависит от вида частиц ионизирующего излучения и величины их энергии. Расширение определения понятия неограниченной ЛПЭ, L , на косвенно ионизирующее излучение $[B^*]$ позволяет говорить об этой величине как об универсальной характеристике передачи энергии веществу. Качественные рассуждения наводят на мысль, что, чем выше неограниченная ЛПЭ, тем больше средняя переданная энергия в элементарном объеме вещества. Для одного и того же вида ионизирующего излучения различным ЛПЭ будут характеризоваться фотоны разной энергии. Поэтому вводится понятие распределения дозы по ЛПЭ:

$$D_L = \frac{dD}{dL} = D(L). \quad (B4.7)$$

Отсюда полная доза получается как интеграл по ЛПЭ в точке среды:

$$D(\vec{r}) = \int D(L) dL . \quad (B4.8)$$

ЭКВИДОЗИМЕТРИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

Предмет эквидозиметрии

Эквидозиметрия – раздел дозиметрии, изучающий характеристики ионизирующего излучения с учетом их биологического и медицинского действия на организм человека. Эквидозиметрические величины – расчетные величины, учитывающие выраженность биологических и медицинских эффектов при действии ионизирующего излучения на организм человека. Это действие называется *облучением* {*exposure*}. Облучение человека может происходить как от источников, находящихся вне его – «*внешнее облучение*» (по-английски, внимание! – *external radiation*, а не *external exposure*!), так и источники могут находиться внутри человека – «*внутреннее облучение*» (*internal radiation*, а не *internal exposure*).

Между величиной поглощенной или экспозиционной дозы и биологическим, и, тем более, медицинским эффектом не существует прямой связи. Биологические и медицинские эффекты, являющиеся результатом действия ионизирующего излучения, весьма разнообразны. Сегодня не существует строгой и последовательной теории этих эффектов. Поэтому система величин, применяемая в эквидозиметрии, претерпевает изменения в соответствии с развитием понятий и представлений о биологических и медицинских эффектах ионизирующего излучения. Этим занимается Научный Комитет по Действию Атомной Радиации (НКДАР) {United Nations Scientific Committee on Effects of Atomic Radiation}.

В целях радиационной защиты и безопасности человека выделяют т.н. «тяжелые» эффекты действия излучения на организм человека {*severe health effects*}, развитие которых может привести к преждевременной смерти, либо к серьезному ухудшению состояния здоровья и сокращению продолжительности жизни:

1. Детерминированные эффекты излучения, для которых связь между дозой облучения и развитием эффекта более или менее однозначна, то есть, детерминирована; и
2. Стохастические эффекты излучения, для которых такая связь носит вероятностный, или стохастический характер.

Детерминированные эффекты возникают в короткие сроки после действия ионизирующего излучения. Они отличаются яркой выраженностью и острым течением болезни (лучевая болезнь, локальные лучевые повреждения, радиационные ожоги, катаракта, стерилизация) с частым летальным исходом в зависимости от дозы облучения.

Стохастические эффекты делят, в свою очередь, на раковые и наследуемые (генетические) заболевания. Часто из перечисленных эффектов выделяют стохастические эффекты воздействия ионизирующего излучения на эмбрион и плод. До сих пор не удается однозначно связать радиогенные раки с результатом облучения, т.к. эти заболевания могут возникать совершенно без избыточного воздействия ионизирующего излучения. Поэтому сегодня выделяют

- регистрируемые радиогенные раки и
- не обнаруживаемые стохастические эффекты действия излучения (радиогенные раки и генетические эффекты).

Поглощенная доза на орган (ткань)

Биологическое действие проявляется на молекулярном, субклеточном, клеточном, органном, и организменном уровнях, тогда как медицинские эффекты видны лишь на органном и организменном уровнях. При рассмотрении биомедицинского действия ионизирующего излучения бессмысленно говорить о переданной излучением энергии веществу независимо от вида излучения и вида биологической ткани, или органа.

Между биологическими и медицинскими эффектами есть связь, но она не является прямой и однозначной. Так, после действия ионизирующего излучения молекула ДНК может оказаться поврежденной, но она может быть репарирована «правильной» РНК. Под действием ионизирующего излучения клетка и даже не одна, может испытать мутацию, но на функции органа или ткани (органный уровень) это не проявится.

Поэтому если некоторые биологические эффекты (молекулярные и субклеточные) еще позволительно рассматривать в некотором элементарном объеме, то при наличии медицинских эффектов ионизирующего излучения понятие элементарного объема становится бессмысленным. Можно говорить лишь об объеме органа, или ткани.

В связи с этим вводится понятие *поглощенной дозы для органа, или ткани T , или просто органной дозы $\{organ\ dose\}$* , как поглощенной дозы данного вида излучения R , усредненной по всем точкам органа, или ткани:

$$D_{T,R} = \frac{1}{m} \int D_{T,R}(\vec{r}) dm(\vec{r}), \quad (5.1)$$

где m – масса всего органа, или ткани. Если выразить массу органа, или ткани через ее среднюю плотность и объем органа, или ткани

$$m = \rho V = \int dm(\vec{r}) = \int \rho(\vec{r}) dV,$$

то формулу (5.1) для органной дозы можно преобразовать в интеграл по объему

$$D = \frac{1}{V} \int D(\vec{r}) \frac{\rho(\vec{r})}{\rho} dV = \frac{\int D(\vec{r}) \rho(\vec{r}) dV}{\int \rho(\vec{r}) dV}. \quad (5.2)$$

Органная доза применяется для характеристики детерминированных эффектов облучения.

Эквивалент дозы

Для характеристики стохастических эффектов в органе, или ткани, применяется понятие эквивалента дозы [В8,9]. Эквивалент дозы определяется для органа, или ткани и является расчетной величиной.

Относительная биологическая эффективность

ОБЭ – относительная биологическая эффективность (RBE – relative biological effectiveness) – *отношение поглощенной дозы при стандартном облучении (вызванном рентгеновским излучением при пиковом напряжении на трубке в 250 кВ, либо 200 кВп в странах СНГ) к поглощенной дозе наблюдаемого излучения, порождающего тот же самый биологический эффект, что и стандартное рентгеновское излучение.*

Если D_0 – органный доз стандартного (образцового) излучения, а D – органный доз наблюдаемого излучения, вызывающего тот же самый биологический эффект, что и D_0 , то

$$\text{ОБЭ} = D_0/D. \quad (5.3)$$

ОБЭ зависит от многих факторов:

- физической природы излучения,
- вида биологического материала,
- вида биологической реакции,
- степени ее выраженности,
- мощности дозы или ее распределения в биологическом объекте.

Поэтому понятие ОБЭ сложно применять в практической деятельности.

Коэффициент качества

В 1964 г. МКРЗ введен коэффициент качества – определенным образом усредненная мера ОБЭ.

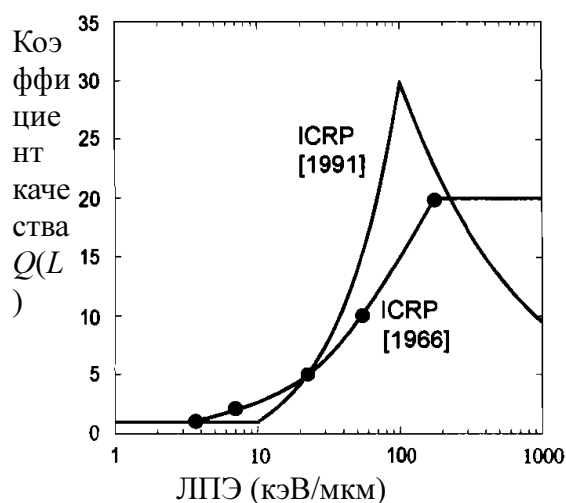
В определении коэффициента качества есть большая доля условности: он определяется по отношению не ко всем биологическим последствиям действия ионизирующего излучения, а только к таким, которые представляют наибольшую опасность, например, рак или наследственные эффекты.

Коэффициент качества, как и поглощенная доза, являются детерминистскими величинами и определены в точке.

Первоначально методы определения коэффициентов качества для различных видов излучения и различных его энергий носили, в основном, субъективный характер. С течением времени субъективность в определении коэффициента качества снизилась по своей степени, но не исчезла. Для косвенно ионизирующего излучения коэффициент качества устанавливается для потоков вторичных заряженных частиц.

Объективной мерой биологических эффектов может служить плотность ионизации вещества вдоль траектории ионизирующей частицы. Она пропорциональна ЛПЭ – L . Так как биологические ткани состоят, в основном, из воды, то считают, что $Q = Q(L)$ для воды.

На рис. 3.1 приведена зависимость коэффициента качества от ЛПЭ для воды в моделях МКРЗ 1966 и 1991 г. В современной Публикации МКРЗ [B10] зависимость, установленная в 1991 г. сохранена. Она задается аналитически следующим образом:



$$Q(L) = \begin{cases} 1 & (L \leq 10); \\ 0,32L - 2,2 & (10 \leq L \leq 100); \\ 300/\sqrt{L} & (L \geq 100). \end{cases} \quad (5.4)$$

Здесь ЛПЭ, L , измеряется в кэВ/мкм.

С помощью распределения поглощенной дозы по ЛПЭ (B4.7) вводят усредненный коэффициент качества

$$\bar{Q} = \frac{1}{D} \int_0^{\infty} dLD(L)Q(L), \quad D = \int_0^{\infty} dLD(L). \quad (5.5)$$

Определение эквивалента дозы

Эквивалентом дозы (dose equivalent) моноэнергетического излучения называется произведение среднего коэффициента качества Q на поглощенную дозу D :

$$H = \overline{Q}D = \int_0^{\infty} dLD(L)Q(L). \quad (5.6)$$

В чистом виде понятие эквивалента дозы обычно не используется. Для решения задач радиационного контроля на его основе вводятся понятия амбиентного эквивалента дозы {ambient dose equivalent} (от англ. «ambient» – всесторонний) и направленного эквивалента дозы {directional dose equivalent}. Эти величины относят к т.н. операционным дозиметрическим величинам {operational dosimetric quantities}. Их описание и применение будет представлено в другом материале.

НОРМИРУЕМЫЕ ДОЗИМЕТРИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

В целях радиационной безопасности в области стохастических эффектов применяют консервативную оценку доз облучения по видам излучения и видам тканей. Для этого вводятся соответствующие взвешивающие коэффициенты [B8 – 10].

Взвешивающий коэффициент излучения

Часто спектральный состав излучения в интересующей области не известен

Поэтому в радиационной безопасности вместо среднего коэффициента качества на орган(ткань) вводят другую величину – взвешивающий коэффициент излучения w_R .

Он устанавливается для каждого вида излучения независимо от его спектрального состава

В отличие от коэффициента качества Q w_R не является функцией точки в дозиметрическом смысле, а распространяется сразу на весь орган или ткань, хотя явно к ним не привязан, так как устанавливается одинаковым для любого органа, ткани или организма в целом:

Вид излучения	Взвешивающий коэффициент излучения
Фотоны	1
Электроны и мюоны	1
Протоны и заряженные пионы	2
Альфа-частицы, осколки деления, тяжелые ионы	20
Нейтроны	Непрерывная функция энергии нейтронов (рис. 6.1)

Все значения даны для излучения, падающего на поверхность тела, или (для источников внутреннего облучения) испущенных инкорпорированными радионуклидами

- Замечание: особый вопрос - воздействие электронов Оже

Для нейтронов

$$w_R = \begin{cases} 2.5 + 18.2e^{-[\ln(E_n)]^2/6} & E_n < 1 \text{ MeV} \\ 5.0 + 17.0e^{-[\ln(2E_n)]^2/6} & 1 \text{ MeV} \leq E_n \leq 50 \text{ MeV} \\ 2.5 + 3.25e^{-[\ln(0.04E_n)]^2/6} & E_n > 50 \text{ MeV} \end{cases}$$

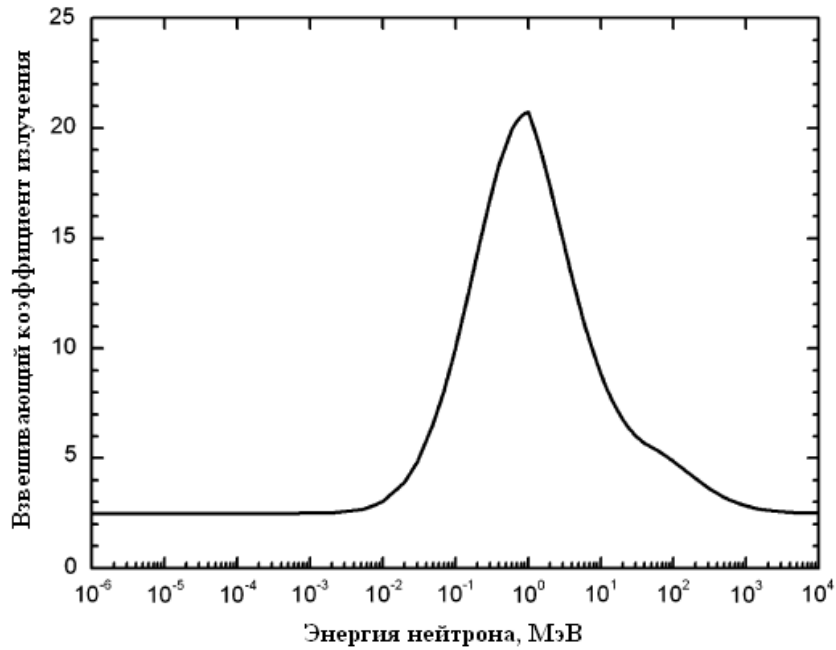


Рисунок 6.1. Взвешивающий коэффициент излучения нейтронов

Эквивалентная доза

Произведение взвешивающего коэффициента излучения w_R на полную поглощенную дозу D дает эквивалентную дозу:

$$H_{T,R} = w_R D_{T,R}. \quad (\text{B6.1})$$

Единица измерения эквивалентной дозы в СИ – 1 Зиверт (Зв, Sv).

БЭР – биологический эквивалент рада – эквивалентная доза, при которой произведение поглощенной дозы на взвешивающий коэффициент излучения равно 100 эрг/г.

1 бэр создает такой же биологический эффект, как и поглощенная доза стандартного рентгеновского или гамма-излучения в 1 рад.

1 бэр = 0,01 Зв.

Для излучения смешанной природы эквивалентная доза будет представлять собой сумму

$$H_T = \sum_R H_{T,R} = \sum_R w_R D_{T,R} \quad (\text{B6.2})$$

Эффективная доза

Для учета радиочувствительности органа или ткани вводится соответствующий взвешивающий коэффициент w_T , который есть усредненная по органу или ткани величина, показывающая при каких эквивалентных дозах биологический эффект будет одинаков для различных тканей.

- Сумма произведений w_T на эквивалентную дозу H_T дает *эффективную дозу*.
- Для учета вклада различных органов и тканей в общую частоту заболеваемости эффективная эквивалентная доза определяется суммой

$$E_{R,T} = \sum_j w_{T,j} H_{R,T,j} \quad (B6.3)$$

Для этого значения w_T устанавливаются из расчета, что сумма w_T для всего организма равна 1. Единицы измерения – Зв.

Таблица В2. Тканевый взвешивающий коэффициент w_T (ICRP, Publ. 103, 2007)

Ткань	w_T	
Костный мозг (красный), толстая кишка, легкие, желудок,	0.12	0.72
Молочная железа, Остальные ткани		
Гонады	0.08	0.08
Мочевой пузырь, Пищевод, Печень, щитовидная железа	0.04	0.16
Поверхность кости, головной мозг, слюнные железы, кожа	0.01	0.04
	Итого	1.00

Список использованных источников

- В1. Излучения ионизирующие и их измерения. Термины и определения. Рекомендации по межгосударственной стандартизации РМГ 78-2005. М.: Стандартинформ, 2006.
- В2. Излучения ионизирующие и их измерения. Термины и определения. ГОСТ 15484-81.
- В3. Физическая энциклопедия / Под ред. А.М.Прохорова. Тт. 1–5. М.: «Большая Российская энциклопедия», 1998.
- В4. Иванов, В.И. Курс дозиметрии. 4-е изд. перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1988.
- В5. Гусев, Н.Г. Защита от ионизирующих излучений. Т.1. Физические основы защиты от излучений. / Н.Г.Гусев, В.А.Климанов, В.П.Машкович, А.П.Суворов. М.: Энергоатомиздат, 1989.
- В6. Shultis, J.K. Radiation shielding. / J.K.Shultis, R.E.Faw. Prentice Hall, PTR, 1996.
- В7. Sabol, J. Radiation protection dosimetry. / J.Sabol, P.S.Weng. World Scientific, Singapore e.a., 1995.
- В8. Величины и единицы в дозиметрии защиты от ионизирующих излучений. Доклад МКРЕ № 51 (перевод). Maeyland: Bethesda, 1993.
- В9. Кутьков В.А. Эволюция системы обеспечения радиационной безопасности в свете новых рекомендаций МКРЗ и МАГАТЭ. АНРИ, 2007, № 1(48), с. 2 – 24.
- В10. Рекомендации Международной комиссии по радиационной защите от 2007 года Публикация 103. // Пер с англ./под общей ред. М.Ф.Киселева и Н.К.Шандалы. М.: Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009.

Краткие сведения о ядерной физике и ядерной спектрометрии

Радиоактивность и источники ионизирующего излучения

Радиоактивность – это процесс самопроизвольного преобразования ядра с испусканием одной или большего числа частиц.

Известны три основных вида радиоактивного распада : α -(альфа), β - (бета) и γ - (гамма). Есть ядра, которые одновременно подвержены всем трем видам распада.

α - частицы представляют собой прочно связанную систему из двух протонов и двух нейтронов. Это - ядра атомов гелия ${}^4_2\text{He}$. α - частицы, испускаемые данным типом ядер, имеют определенную кинетическую энергию (дискретный энергетический спектр).

β - частицы - это электроны e^- или позитроны e^+ , рождающиеся в момент β - распада. Они могут иметь любую кинетическую энергию от нуля до максимальной E_{max} , равной энергии β - распада, поэтому говорят о непрерывном энергетическом спектре электронов β -распада. Это объясняется тем, что при β - распаде одновременно с электроном ядро испускает еще одну частицу – нейтрино (ν).

γ - кванты - это жесткое электромагнитное излучение с длиной волны в сотни тысяч раз меньшей, чем у фотона видимого диапазона спектра. γ - кванты испускаются ядрами через малую долю секунды после α или β - распада и в этом смысле являются вторичными. γ - кванты распада имеют дискретный энергетический спектр.

Наблюдения за радиоактивными превращениями ядер показали, что распады происходят случайно во времени, и все моменты времени равноправны. Радиоактивные ядра одного и того же вида, только что возникшие и давно существующие, имеют одинаковую вероятность распасться в ближайший интервал времени Δt . В этом смысле радиоактивные ядра не имеют возраста. Ввиду случайности радиоактивного процесса он должен рассматриваться на языке вероятностей и средних значений.

Вероятность — степень возможности наступления события. Например, если бросать кубик, имеющий 6 граней с цифрами 1,2,3,4,5,6, то вероятность выпадения цифры 2 (как и любой другой цифры) равна 1/6. Итак, вероятность события А – это отношение числа m благоприятных исходов события к общему числу всех возможных исходов этого события.

Основной характеристикой радиоактивного распада является вероятность распада ядра в единицу времени (постоянная распада λ), которая не зависит ни от времени, ни от агрегатного состояния вещества, ни от его химического состава. Часто для характеристики процесса радиоактивного распада ядер удобно пользоваться периодом полураспада $T_{1/2}$. Период полураспада численно равен интервалу времени, за которое число ядер в результате радиоактивного распада уменьшается в два раза. Период полураспада связан с постоянной распада соотношением $T_{1/2} = \ln 2 / \lambda$.

Для изучения процессов, связанных с радиоактивными распадами и прохождением ионизирующего излучения через вещество необходимо использовать источники излучений. По своим геометрическим параметрам источники могут быть объемными и близкими к точечным. Первые характеризуются объемным распределением радиоактивного вещества. Точечные источники представляют собой крупинку радиоактивного вещества, помещенную в защитную пленку.

При выполнении данного цикла лабораторных работ в качестве источников ионизирующего излучения использовались: радиоактивные изотопы радия ${}^{226}\text{Ra}$, плутония ${}^{239}\text{Pu}$ и америция ${}^{241}\text{Am}$ как источники α -излучения, радиоактивный изотоп

стронция ^{90}Sr - источник β -излучения и изотопы цезий ^{137}Cs и натрий ^{22}Na в качестве источников γ -излучения.

В обычных условиях все атомные ядра находятся в состояниях с минимальной энергией E_0 . Такое состояние называется основным. В основном состоянии стабильные ядра «живут» бесконечно долго.

В результате α - или β - распада начального (материнского) ядра конечное (дочернее) ядро может оказаться в возбужденном состоянии с энергией E^* большей E_0 . Возбужденные состояния являются короткоживущими. За время порядка 10^{-13} - 10^{-8} с ядро переходит в основное состояние, испуская один или более γ -квантов.

Регистрация ионизирующего излучения сцинтилляционным детектором.

Все три вида излучения, связанных с радиоактивными распадами ядер объединяются термином ионизирующие излучения, так как они приводят к ионизации атомов вещества. Именно это свойство излучений лежит в основе их регистрации. Частицу можно зарегистрировать только в том случае, если она передаст свою энергию регистрирующему устройству - детектору. При этом не обязательно передается вся энергия, может быть передана любая ее часть.

Рассмотрим подробнее процесс регистрации излучения сцинтилляционным детектором, который использовался при выполнении предлагаемых работ.

Пусть на детектор падает пучок заряженных частиц (электронов или α -частиц). Попадая в сцинтиллятор заряженные, частицы взаимодействуют своим кулоновским полем с электронами атомов среды и передают им часть своей энергии. Результатом этого взаимодействия может стать возбуждение или даже ионизация атомов. Возвращаясь в начальное (основное) состояние атомы сцинтиллятора излучают фотоны, которые поступают на фотокатод ФЭУ (фотоэлектронный умножитель), где в результате фотоэффекта конвертируются опять в электроны. В ФЭУ число электронов многократно увеличивается за счет процесса вторичной электронной эмиссии и на аноде ФЭУ формируется электрический импульс, величина которого однозначно связана с энергией, переданной заряженной частицей веществу сцинтиллятора (см. Рис.1).

Если в детектор влетает γ -квант с определенной энергией, то, взаимодействуя с атомами сцинтиллятора, γ -квант рождает электроны. Например, γ -квант может поглотиться электроном атома (фотоэффект). В этом случае электрон будет иметь энергию равную $E_e = E_\gamma - I$, где I - энергия ионизации атома. Если $I \ll E_\gamma$, то фотоэлектрон будет иметь энергию близкую к энергии γ -кванта. Кроме фотоэффекта γ -квант может испытать комптоновское рассеяние (упругое рассеяние) на атомном электроны и передать ему часть своей энергии. Величина энергии, переданной γ -квантом электрону атома при рассеянии, может принимать любые значения от нуля до некоторой максимальной энергии.

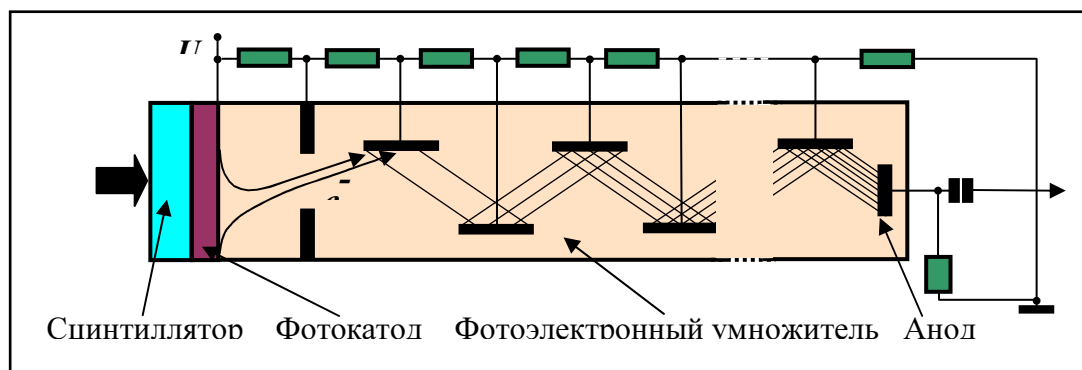


Рис.1

В дальнейшем формирование электрического импульса от γ -кванта происходит путем, описанным выше для заряженных частиц. Важно понимать, что в результате детектирования мы наблюдаем не истинный спектр γ -излучения (энергия γ -кванта E_γ), а распределение по энергиям (спектр) электронов, которые появляются в сцинтилляторе в результате взаимодействия γ -кванта с веществом детектора и имеют непрерывное распределение по энергиям. При попадании в детектор большого числа γ -квантов, каждый приводит к появлению электронов и, следовательно, к формированию электрических импульсов, амплитуда которых определяется энергией, переданной γ -квантом атомам среды при взаимодействии и только электроны фотоэффекта могут иметь энергию близкую к энергии γ -кванта.

Наблюдаемый на эксперименте спектр, представляет собой гистограмму распределения зарегистрированных частиц (отсчетов) по величине потерянной энергии – экспериментальный амплитудный (энергетический) спектр.

Не все частицы, попавшие в детектор, будут им зарегистрированы. Процесс регистрации достаточно сложен и имеет вероятностный характер. Величиной, характеризующей вероятность того, что попавшая в рабочий объем детектора частица будет зарегистрирована, является эффективность детектора ε , равная отношению числа зарегистрированных импульсов к числу частиц, попавших в детектор от источника, за единицу времени. Эффективность зависит от вида и характеристик детектора и от энергии регистрируемых частиц.

Сцинтилляционный спектрометр.

Различные источники излучения характеризуются своим распределением испускаемых частиц по энергии, которое называется энергетическим спектром излучения. Устройство, с помощью которого измеряют спектр излучения, называется спектрометром.

Необходимой составной частью спектрометра является детектор излучения. Если в спектрометре используется сцинтилляционный детектор, то спектрометр называется сцинтилляционным.

Рассмотрим, как работает сцинтилляционный спектрометр (см. рис. 2). При регистрации отдельной частицы излучения (α -частица, β -частица, γ -квант) на выходе сцинтилляционного детектора появляется электрический импульс, амплитуда которого связана с энергией этой частицы. Амплитуда импульса измеряется специальным устройством, которое находится в электронном блоке спектрометра, а результаты измерения в виде цифрового кода пересылаются в компьютер. Там они сортируются и запоминаются.

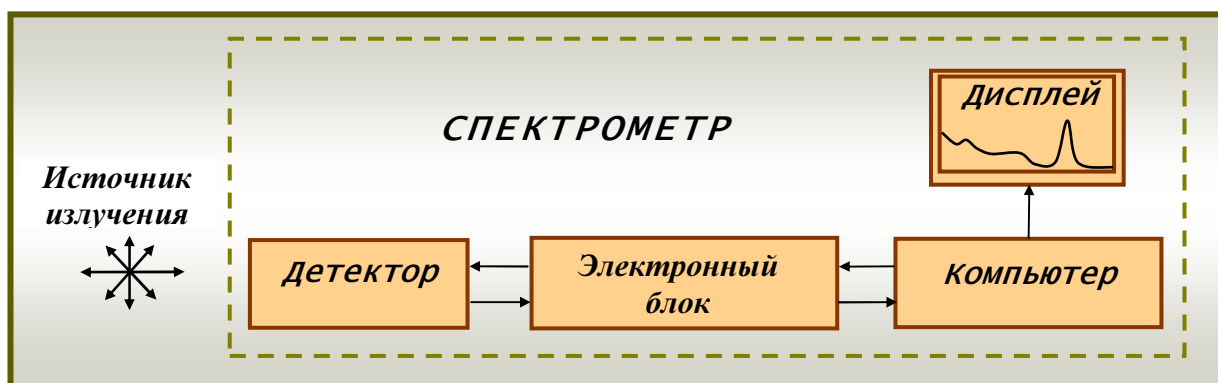


Рис.2. Блок– схема спектрометра.

Таким способом в течение заданного времени измерения регистрируется большое количество импульсов, и, как говорят, набирается спектр излучения.

Результаты сортировки представляются в виде специальной гистограммы, отдельные ступеньки которой называются каналами. Каждый канал соответствует определенному диапазону амплитуд импульсов. Количество зарегистрированных импульсов с амплитудами в этом диапазоне называют содержимым канала. Каналы нумеруются последовательностью целых чисел в порядке возрастания амплитуд импульсов в этих диапазонах. Таким образом, результатом набора спектра будет последовательность целых чисел, являющихся содержимым каналов, а номера членов последовательности совпадают с соответствующими номерами каналов.

Результат измерения – гистограмма – называется аппаратным спектром и представляет распределение импульсов детектора по амплитуде. Это распределение связано с измеряемым энергетическим спектром излучения. Вид связи зависит от особенностей механизма взаимодействия регистрируемого излучения с веществом детектора. Надо знать этот механизм, чтобы уметь «читать» аппаратные спектры и делать правильные выводы об изучаемом энергетическом спектре излучения.

Для анализа аппаратного спектра необходимо выполнить калибровку энергетической шкалы спектрометра, т.е. связать номер каждого канала с энергией, передача которой веществу детектора приводит к появлению импульса в этом канале. Эта связь для сцинтилляционного спектрометра представляется линейной зависимостью

$$E_n = a \cdot x + b,$$

где n – номер канала, E_n – энергия, соответствующая каналу с номером n , а a и b – коэффициенты, которые находят по результатам измерений спектров эталонных источников излучений с известной энергией. Значения коэффициентов a и b зависят от напряжения питания ФЭУ и используемого коэффициента усиления, поэтому их необходимо измерять для каждого используемого режима работы спектрометра независимо.

На рис. 3 приведен аппаратный спектр источника γ -излучения ^{137}Cs . Этот источник испускает моноэнергетические фотоны с энергией 662 кэВ. Несмотря на простоту энергетического спектра источника, его аппаратный спектр достаточно сложен. Во-первых, он уже не дискретный, а непрерывный. Во-вторых, он состоит из нескольких компонент.

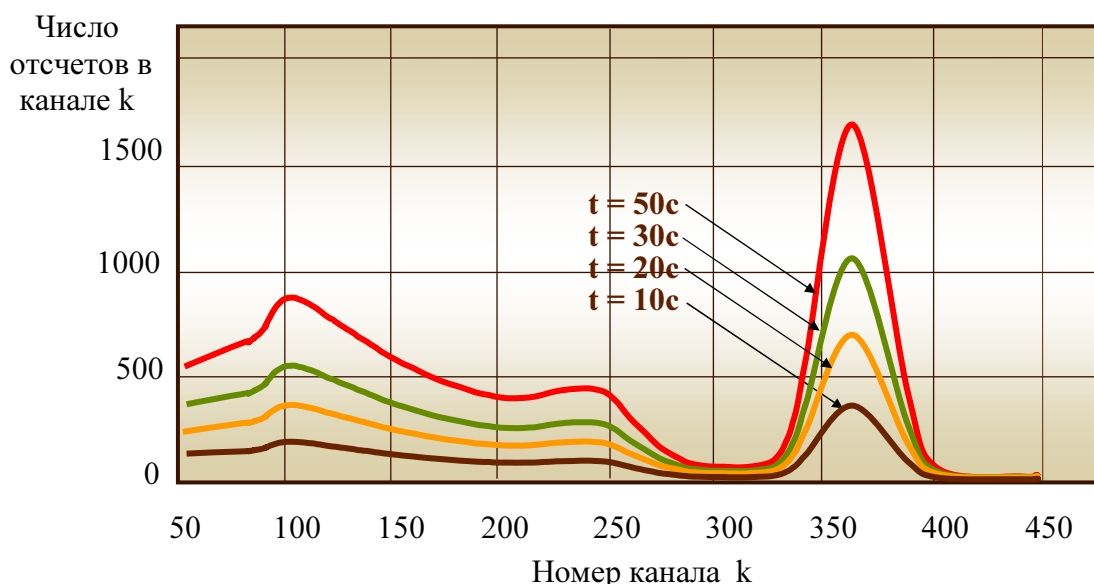


Рис.3. Гамма - спектры ^{137}Cs , измеренные за 10, 20, 30 и 50с.

В правой части спектра хорошо виден так называемый пик полного поглощения, соответствующий полной передаче энергии γ -кванта веществу детектора в процессе фотоэффекта. Следовательно, энергии 662 кэВ приблизительно соответствует 365 канал.

Пик достаточно широкий вследствие случайного характера процесса преобразования энергии при формировании электрического импульса детектора.

В левой части аппаратного спектра виден широкий непрерывный участок, соответствующий комптоновскому рассеянию γ -квантов на электронах вещества детектора. Около 100-го канала виден пик обратного рассеяния, обусловленный регистрацией детектором излучения источника, «отраженного» от окружающих предметов за счет комптоновского рассеяния.

Все спектры, необходимые для выполнения работ данного цикла, сняты на спектрометрах, разработанных на кафедре ядерной физики БГУ. На рис. 4 приведена фотография лабораторного спектрометрического комплекса.

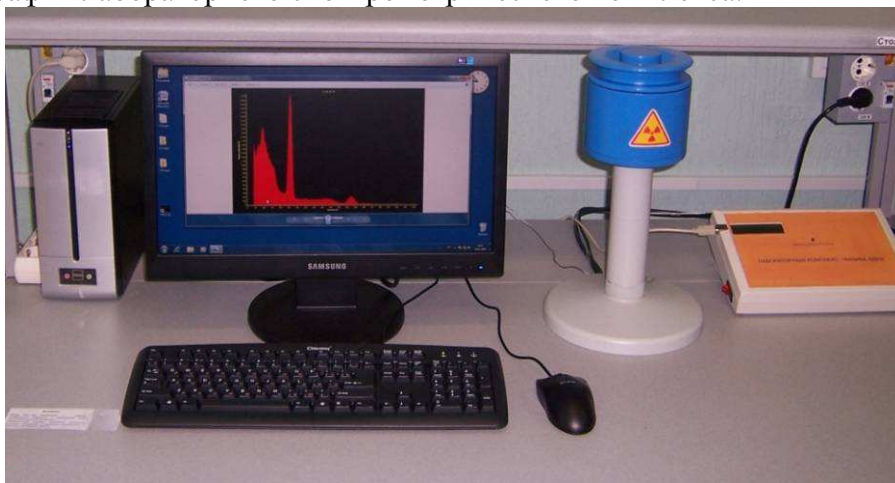


Рис.4.

Из рисунка видно, что спектрометрический комплекс для измерения γ -спектра состоит из детектора излучения с защитой из свинца и указателем радиационной опасности, электронного блока и ЭВМ. Электронный блок содержит источники питания высокого и низкого напряжений, усилителя и цифрового преобразователя, который обеспечивает преобразование амплитуды электрического сигнала в соответствующий цифровой код.

Статистические погрешности при ядерных измерениях

Обычно погрешности измерений связывают с несовершенством измерительной аппаратуры и ошибками в действиях самого экспериментатора. Действительно, такие погрешности существуют, однако в ядерной физике важную роль играют статистические погрешности, которые не связаны с каким-то «несовершенством» выполнения измерений, а связаны со случайной природой измеряемых величин.

Уменьшить такие статистические погрешности можно только увеличением числа зарегистрированных событий, что достигается либо увеличением потока регистрируемых частиц, либо просто увеличением времени измерений.

Рассмотрим некоторые свойства статистических погрешностей. Пусть за какое то время T мы зарегистрировали N событий. Количество отсчетов детектора – случайное целое число. Это означает, что если бы мы повторили измерение при тех же самых условиях, то необязательно снова зарегистрировали бы те же N отсчетов. Результаты повторных измерений группировались бы около некоторого значения $\langle N \rangle$, которое обычно называется «средним», причем это число необязательно будет целым. Разброс отдельных измерений N в первом приближении будет находиться внутри интервала от $\langle N \rangle - \sqrt{\langle N \rangle}$ до $\langle N \rangle + \sqrt{\langle N \rangle}$, поэтому считают, что абсолютная ошибка измерения величины N составляет $\pm\sqrt{\langle N \rangle}$.

Относительная погрешность измерения, связанная со случайным характером измеряемых величин, называемая статистической погрешностью, равна

$$\delta(N) = \frac{1}{\sqrt{N}} \approx \frac{1}{\sqrt{N}}. \quad (1)$$

Обычно используют последнее приближенное равенство, поскольку истинное значение $\langle N \rangle$ неизвестно и вместо него подставляют полученный результат измерения N .

Из (2) видно, что для получения погрешности, например, в 1%, надо набрать 10 000 отсчетов.

Если измеряемая величина X представляет собой произведение двух (и более) случайных величин N_1, N_2 , то относительная погрешность этой величины δX определяется по формуле

$$\delta X = \sqrt{\delta^2(N_1) + \delta^2(N_2)}. \quad (2)$$

При измерении числа частиц от какого то источника детектор обычно регистрирует и «посторонние» частицы – фоновые события, которые вызываются так называемым фоновым излучением. Фоновое излучение порождается естественной радиоактивностью вещества детектора и окружающих его предметов, а также вторичным космическим излучением. Регистрируется всегда суммарный спектр S . Разделение зарегистрированных суммарных $S=N+F$ событий на излучение от источника N и фоновые события F обычно осуществляют следующим образом. Кроме измерения S делают дополнительное отдельное измерение фона, когда за то же самое время и в тех же самых условиях, но уже без изучаемого источника, измеряют количество отсчетов детектора F . Количество отсчетов от источника рассчитывают по формуле

$$N = S - F. \quad (3)$$

Поскольку фоновые отсчеты также являются случайной величиной, погрешность измерения N возрастает, так как погрешности разности случайных величин складывается.

На рис.5 приведена типичная форма аппаратного спектра фонового излучения.

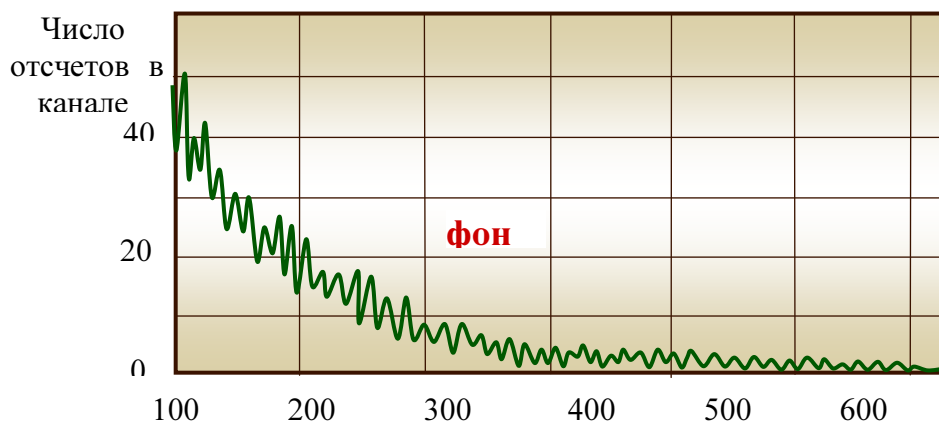


Рис.5. Амплитудный спектр импульсов фона.

Полная погрешность расчетного значения итоговой величины состоит не только из статистических погрешностей регистрируемых событий. В нее надо включить погрешности определения всех других величин, используемых в расчетной формуле, например, погрешности, связанные с измерением толщины поглотителя, расстояния до источника и др.. Дополнительные погрешности возникают также в результате упрощающих предположений, сделанных при выводе расчетной формулы (например, источник излучения считается точечным, пучок частиц – параллельным).

Тест к введению в ядерную физику.

1. Постоянная распада λ это:
 - вероятность распада ядра в единицу времени;
 - вероятность, ядро доживет до момента времени t ;
 - вероятность, что ядро распадется к моменту времени t .
2. Постоянная распада λ зависит от:
 - вида ядер;
 - агрегатного состояния;
 - времени;
 - химического состава вещества.
3. Эффективность детектора зависит от:
 - вида детектора, напряжения питания на детекторе;
 - расположения детектора относительно источника и напряжения питания на детекторе;
 - энергии излучения и напряжения питания на детекторе;
 - времени измерения и вида детектора;
 - напряжения питания на детекторе и времени измерения.
4. Зависимость амплитуды импульса сцинтилляционного спектрометра от энергии регистрируемой частицы:
 - квадратичная;
 - линейная;
 - сложная нелинейная функция;
 - амплитуда не зависит от энергии.
5. Номер канала спектрометра соотносится с:
 - интенсивностью регистрируемых частиц;
 - энергией регистрируемых частиц;
 - видом регистрируемых частиц.
6. Пик полного поглощения в аппаратурном спектре моноэнергетических γ -квантов находится:
 - в начальных каналах спектра;
 - в середине спектра;
 - крайний правый пик в конце спектра.
7. Фоновые импульсы являются следствием:
 - случайного характера процесса радиоактивного распада;
 - космического излучения и естественной радиоактивности окружающих предметов;
 - космического излучения и внутренних шумов ФЭУ;
 - отражения излучения от окружающих предметов.

Лабораторная работа №1

Определение активности источника относительным методом

Цель работы: определить неизвестную активность источника ^{137}Cs относительным методом. Оценить погрешность измерения.

Важной физической характеристикой источника излучений является его активность A . Она определяется как среднее число распадов ядер в единицу времени. Единицей активности в СИ является беккерель. Он соответствует одному распаду в секунду: $1\text{Бк} = 1\text{расп/с}$. До сих пор используется старейшая единица активности – кюри ($1\text{Ки} = 3,7 \cdot 10^{10}\text{расп/с}$). Такую активность имеет 1г радия. Активность зависит от вероятности распада отдельного ядра λ (постоянная распада) и числа радиоактивных ядер.

Величина λ не зависит от времени, от агрегатного состояния вещества, а является характеристикой данного вида ядер.

Число частиц, испускаемых источником, необязательно совпадает с числом распадов в источнике, оно может быть равно, меньше или больше. Это зависит от числа частиц, рождающихся при одном распаде. Активность источника может быть измерена, если вылетающие из источника частицы регистрировать детектором излучений.

Пусть за промежуток времени Δt зарегистрировано N отсчетов. Очевидно, что N будет пропорционально числу распадов за это же время $A \cdot \Delta t$. Можно ввести коэффициент пропорциональности ε между N и $A \cdot \Delta t$ и записать равенство

$$N = \varepsilon \cdot A \cdot \Delta t$$

Коэффициент ε включает в себя несколько факторов, важнейшими из которых являются: вероятность частице попасть в рабочий объем детектора и последующая вероятность ее регистрации в детекторе. Обычно этот коэффициент неизвестен. Однако при наличии источника с известной (эталонной) активностью A_0 можно определить неизвестную активность без вычисления ε . Для этого надо провести измерения в полностью идентичных условиях за одно и то же время для источников с известной A_0 и неизвестной A_X активностями. Необходимо также, чтобы исследуемый источник излучений и эталонный содержали бы один и тот же радиоактивный изотоп и имели одинаковую геометрическую конфигурацию. Только в этом случае ε будет одинаковым в уравнениях

$$N_0 = \varepsilon \cdot A_0 \cdot \Delta t \quad (1)$$

$$N_X = \varepsilon \cdot A_X \cdot \Delta t \quad (2)$$

Здесь N_0 - число зарегистрированных частиц (отсчетов) при измерениях с источником эталонной активности, N_X — с неизвестной. Взяв отношение (1) и (2), получим рабочую формулу для определения неизвестной активности A_X :

$$A_X = (N_X / N_0) \cdot A_0 \quad (3)$$

Таким образом, с помощью экспериментально измеренных чисел отсчетов N_0 и N_X сравниваются источники с неизвестной и «эталонной» активностями. Такой метод измерений называется относительным.

Описание эксперимента.

В данной лабораторной работе относительным методом определяется неизвестная активность A_X объемного источника (сосуд Маринелли), содержащего радиоактивный изотоп ^{137}Cs . Период полураспада этого изотопа составляет около 30 лет.

Для регистрации γ -излучения используется спектрометр, описанный в «Краткие сведения по ядерной физике...». Управление и накопление данных на спектрометре осуществляется с помощью компьютера. Перед началом измерения необходимо на панели спектрометра установить его рабочие параметры: ДНУ-« дискриминации нижний уровень», позволяющий отсеять все шумовые импульсы спектрометра; ДВУ — «дискриминации верхний уровень», обычно 1023, т.е. вся шкала спектрометра; коэффициент усиления; напряжение питания на ФЭУ (для используемого ФЭУ напряжение, как правило, от 500 до 800 В), время измерения спектра. После установки всех параметров спектрометр включается, нажимая клавишу «Старт» и начинается набор спектра.

Процесс установления рабочих параметров и непосредственно набор спектра радиоактивного изотопа ^{137}Cs можно визуально наблюдать, запустив видео файл с расширением «avi», приложенный к лабораторной работе. На панели спектрометра: ось абсцисс — каналы спектрометра, соответствующие энергетическим интервалам, ось ординат — число частиц, имеющих энергию в интервале, соответствующем каналу спектрометра (см. подробнее в «Краткие сведения по ядерной физике...»).

Три экспериментальных спектра, соответствующих фоновому спектру «Фон» и спектрам от источников с неизвестной «CsX» и известной (эталонной) «Cs0»

активностями содержатся в файлах, приложенных к данной работе. При регистрации фонового спектра детектор помещался в сосуд Маринелли, геометрические размеры которого идентичны геометрическим размерам объемных источников. Вещество, которым заполнялся сосуд, по плотности близко к веществу источника, однако не содержит радиоактивных ядер. Спектр фоновых отсчетов содержится в файле «Фон». Интегральное число фоновых частиц F рассчитывается суммированием содержимого каналов файла «Фон» по всему спектру.

В качестве источника с эталонной активностью использовался источник с активностью $2 \cdot 10^3$ расп./с. Измерения всех трех спектров выполнялось в течение 300 секунд. Все отсчеты спектрометра связаны только с регистрацией γ -квантов и фона. Измерения проводились на экспериментальной установке кафедры ядерной физики Белорусского государственного университета. Блок-схема эксперимента показана на рис.1.

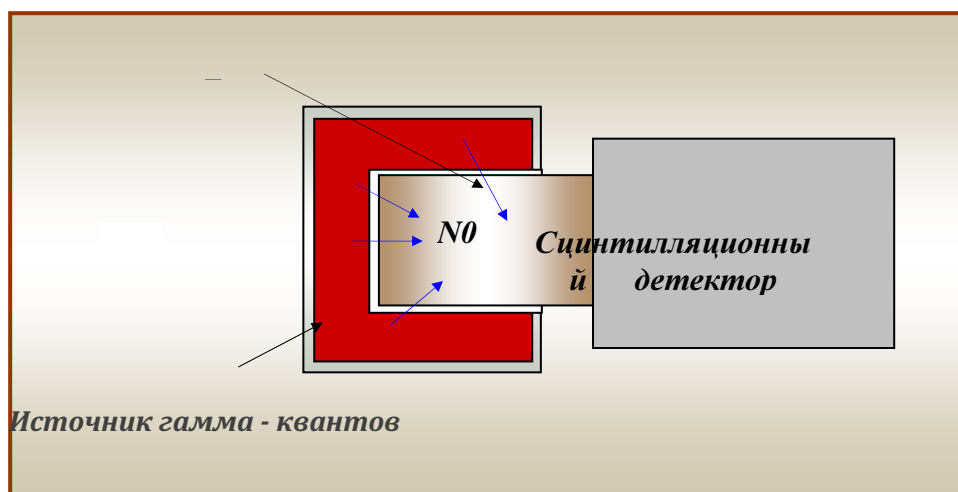


Рис.1 Блок-схема эксперимента.

В формуле (3) $N0$ и NX — суммарное количество отсчетов от эталонного и неизвестного источников, соответственно за вычетом фонового числа частиц F .

Суммарное число частиц, зарегистрированных детектором при наличии источников излучения, находится суммированием содержимого каналов спектров в файлах «Cs0» и «CsX» по всему спектру, т.е..

$$N0 = N0F - F \quad (4)$$

$$NX = NXF - F \quad (5)$$

Для определения неизвестной активности надо подставить (4) и (5) в формулу (3).

На рис.2 показаны аппаратный спектр источника (красный цвет) и аппаратный спектр фона (зеленый цвет).

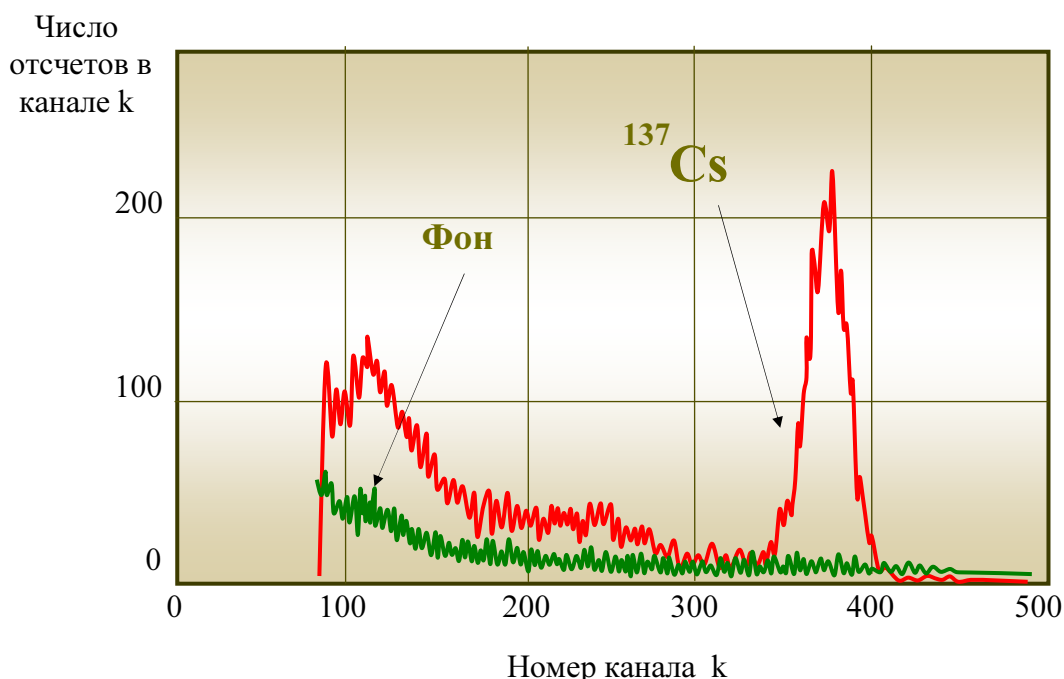


Рис.2. Гамма - спектр цезия и спектр фоновых отсчетов.

Очень важно знать, насколько точно определена неизвестная активность. Для этого следует оценить относительную погрешность ее измерения δAX . Как известно из «Кратких сведений...», δAX определяется относительными погрешностями измерения случайных величин N_0 и N_X и погрешностью определения активности эталонного источника:

$$\delta AX = \sqrt{\delta^2 N_0 + \delta^2 N_X + \delta^2 A_0}, \quad (6)$$

где $\delta^2 A_0$ – относительная статистическая погрешность, с которой известна эталонная активность A_0 .

Если интенсивность фоновых импульсов мала по сравнению с интенсивностью импульсов от источника, для оценки δAX можно пользоваться следующей простой формулой.

$$\delta AX = \sqrt{\frac{1}{N_0} + \frac{1}{N_X} + \delta^2 A_0} \quad (7)$$

Порядок выполнения лабораторной работы

Лабораторная работа выполняется с помощью программы Microsoft Excel Windows или любой другой программы, позволяющей проводить простейшие вычисления и рисовать графики (гистограммы).

1. Загрузит текстовые файлы, содержащие экспериментальные спектры, необходимые для выполнения данной лабораторной работы, в свою рабочую папку.

2. Открыть в Microsoft Excel текстовый файл «Фон» содержащий спектр фоновых импульсов. Порядок открытия: «Данные» - «Из текста» □ «Готово». Способ открытия файлов может отличаться от предлагаемого, но важно, чтобы данные конкретного спектра были представлены в виде столбца.

3. Аналогично открыть файл «Cs0», содержащий спектр источника γ -излучения с эталонной активностью.

4. Повторить аналогичную процедуру для спектра источника с неизвестной активностью, содержащемуся в файле «CsX».

5. Для визуального анализа спектров рекомендуется построить гистограммы распределения импульсов по каналам спектрометра (спектры). Для этого выделить три столбца, содержащих информацию о спектрах, нажать клавишу «Вставка» - «График» и

выбрать верхний левый из предлагаемых графиков. На графике будут показаны все данные, содержащиеся в выделенной области. Если необходимо, операцией «Выбор данных» удалить ряды, содержащие ненужную информацию.

6. Найти интегральное число фоновых импульсов F , а также интегральное число импульсов, зарегистрированных детектором, при наличии неизвестного источника NXF и эталонного источника $N0F$. Для суммирования использовать клавишу «Автосумм» с выделением области суммирования или выбрать в разделе «Формулы» → «Математические формулы», затем в открывающемся окне СУММ и диалоговом окне указать диапазон суммирования, т.е. =СУММ (A1:Ф1023). Каждой формуле (операции) должен предшествовать знак =.

7. Рассчитать интегральное число импульсов от «эталонного» и неизвестного источников, как разницу между импульсами, зарегистрированными детектором при наличии источников, и фоном, т.е. $N0 = N0F - F$ и $NX = NXF - F$.

8. Подставить полученные значения в формулу (3) и найти величину активности неизвестного источника. Эталонная активность $A0$, используемая в данном эксперименте, равна $2 \cdot 10^3$ Бк.

9. Оценить статистическую погрешность измерения δAX по формуле (7), учитывая, что эталонная активность была измерена с погрешностью $\delta A0 = 5 \%$.

10. Проверить правильность полученных результатов и усвоение изученного в лабораторной работе материала, выполнив предлагаемый тест (см. Тест к работе 1).

Тест к работе №1.

1. Активность источника излучения зависит от:
 - количества радиоактивных ядер в источнике и постоянной распада;
 - агрегатного состояния вещества источника и постоянной распада;
 - постоянной радиоактивного распада и химического состава вещества;
 - химического состава вещества источника и количества радиоактивных ядер в источнике.
2. Коэффициент пропорциональности ε между активностью источника и числом зарегистрированных импульсов зависит от:
 - размера источника и вероятности попадания излучения в объем детектора;
 - вероятности попадания излучения и его регистрации детектором;
 - вероятности попадания излучения в рабочий объем детектора и времени регистрации;
 - времени регистрации и вероятности регистрации излучения детектором
3. Условия, которые необходимо выполнять при относительных измерениях:
 - геометрические размеры, форма и энергия неизвестного и эталонного источников должны быть одинаковы;
 - активности неизвестного и эталонного источников должны быть одинаковы;
 - энергии и химический состав излучения неизвестного и эталонного источников должны быть близки по величине;
 - химический состав неизвестного и эталонного источников должен быть одинаков.
4. Активность неизвестного источника равна:
 - $5 \cdot 10^3$ Бк/с;
 - $3 \cdot 10^3$ Бк/с;
 - $2 \cdot 10^4$ Бк/с;
 - $9 \cdot 10^3$ Бк/с.

5. Статистическая погрешность экспериментальных измерений является следствием:

- вероятностного характера процессов радиоактивного распада и погрешностью характеристик детектора;
- вероятностным характером процесса регистрации и радиоактивного распада;
- только погрешности характеристик детектора;
- неопределенности геометрических параметров экспериментальной установки и вероятностным характером радиоактивного процесса.

6. Как следует выбирать время измерений в каждом из трёх экспериментов:

- одинаковым для всех измерений;
- неизвестную активность измерять в два раза дольше;
- фон измерять в два раза дольше;
- может быть различным, но все результаты измерений приведены в единице времени.

7. Какие учёные – первопроходцы в ядерной физике оставили своё имя единицам активности:

- Беккерель и Бор;
- Ферми и Беккерель;
- Кюри и Беккерель ;
- Бор и Кюри.

Лабораторная работа №2

«Поглощение электронов в веществе»

Цель работы: Изучить процессы взаимодействия электронов с веществом. Определить толщину слоя половинного ослабления в алюминии для электронов β -распада стронций-иттриевого источника.

В ближайшие годы в Республике Беларусь будет построена атомная электростанция (АЭС). Основным элементом АЭС является ядерный реактор, где происходит реакция деления ядер урана ($^{235}_{92}\text{U}$). Ядро урана при поглощении нейтрона, как правило, делится на два ядра-осколка сравнимых по массе. Ядра-осколки всегда радиоактивны и испускают в процессе радиоактивных превращений γ -кванты и электроны β -распада (β -электроны).

Рассмотрим как взаимодействуют электроны с веществом и как уменьшается интенсивность β -излучения (электронов) при прохождении через мишень.

Электроны, попадая в вещество, взаимодействуют с атомами среды. Электрон может упруго рассеяться на атоме как целом. Этот процесс приводит, в первую очередь, к отклонению частицы от первоначального направления. В результате пучок электронов, проходя через вещество, становится более широким. Упругое рассеяние на атоме также приводит к потере кинетической энергии электрона, однако эти потери не велики вследствие большой массы атома. Основным механизмом потери энергии является неупругое рассеяние электронов на электронах атомов среды. Атомный электрон, получая энергию при рассеянии, переходит в состояние с более высокой энергией (атом возбуждается) или вообще покидает атом (атом ионизируется).

Потери энергии на ионизацию и возбуждение атомов среды называются ионизационными потерями. Именно ионизационные потери являются основными при прохождении через среду электронов с энергиями меньше 10 МэВ. С ростом энергии

ионизационные потери уменьшаются, что приводит к увеличению длины пробега электронов в среде.

Электроны могут также терять энергию и тормозиться, излучая фотоны. Потери энергии, связанные с излучением фотонов, называются радиационными потерями, а фотоны, излучаемые частицей при торможении, называются тормозным излучением. Радиационные потери энергии электронов растут с ростом энергии электрона и становятся основными для электронов высоких энергий, например, для электронов, получаемых в ускорителях.

При прохождении пучка электронов через вещество частицы в пучке тормозятся, теряя свою энергию на ионизацию атомов и излучение фотонов. Когда кинетическая энергия электронов становится сравнимой с энергией теплового движения окружающих атомов, электрон может продолжить свое хаотическое движение, отдавая или приобретая энергию, может быть захвачен одним из атомов, образуя отрицательный ион. В результате, число частиц в пучке уменьшается как функция толщины слоя вещества-поглотителя.

Зависимость числа прошедших через вещество-поглотитель электронов от толщины слоя поглотителя x называется кривой ослабления электронов $N(x)$. Толщина слоя вещества, при прохождении которого, число электронов, падающих на мишень $N(0)$, уменьшается в два раза, называется толщиной слоя половинного ослабления $\Delta_{1/2}$ т.е.

$$N(\Delta_{1/2}) = N(0) / 2$$

Величина слоя половинного ослабления $\Delta_{1/2}$ зависит от энергии электронов, от плотности и атомного номера вещества. Для конкретного вещества длина половинного ослабления тем больше, чем больше энергия электронов.

Источником электронов могут быть ускорители электронов, а также ядра, испытывающие β -распад. Если ускоритель является источником монохроматических электронов, т.е. электронов, имеющих одинаковую энергию, то при β -распаде вылетающие из ядра электроны могут иметь любую энергию от нуля до некоторой максимальной энергии $E_{\text{макс}}$, характерной для данного β -распада. В этом случае говорят, что электроны β -распада или просто β -электроны имеют непрерывный спектр энергий (см. рис. 1).

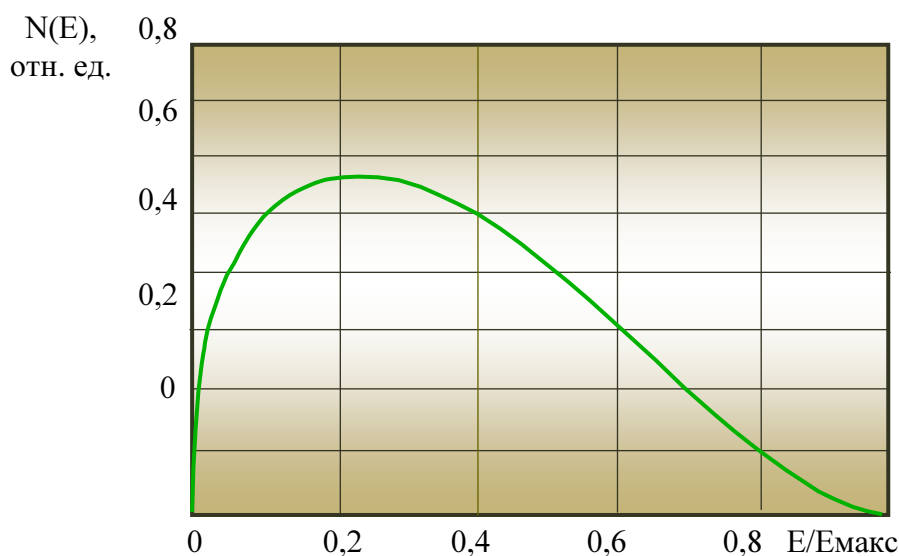


Рис.1 Спектр β -электронов

Рассмотрим в качестве источника электронов стронций-иттриевый источник, где происходят два последовательных β -распада ${}^{90}_{38}\text{Sr} \xrightarrow{\beta} {}^{90}_{39}\text{Y} \xrightarrow{\beta} {}^{90}_{40}\text{Zr}$. Спектр такого источника имеет более сложный вид, так как складывается из двух β -спектров (см. рис.2)

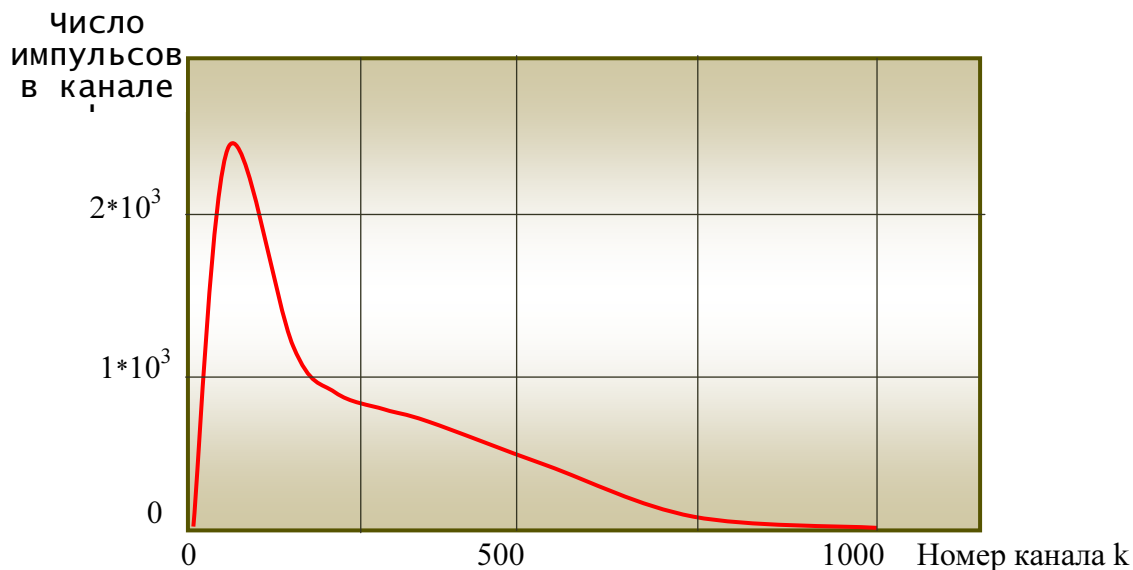


Рис.2 Спектр стронций-иттриевого источника.

Известно, что максимальная энергия электронов первого β -распада ($^{90}_{38}\text{Sr} \xrightarrow{\beta} ^{90}_{39}\text{Y}$) $E_{1\text{макс}}=546\text{кэВ}$, а второго ($^{90}_{39}\text{Y} \xrightarrow{\beta} ^{90}_{40}\text{Zr}$) намного больше — $E_{2\text{макс}} = 2273\text{кэВ}$ (см. схему распада). Электроны первого β -распада полностью поглощаются при толщине слоя алюминиевого поглотителя, равного $0,46\text{ мм}$. Следовательно, можно считать, что через пластинки алюминия, толщина которых больше $0,46\text{ мм}$, проходят только электроны второго β -распада.

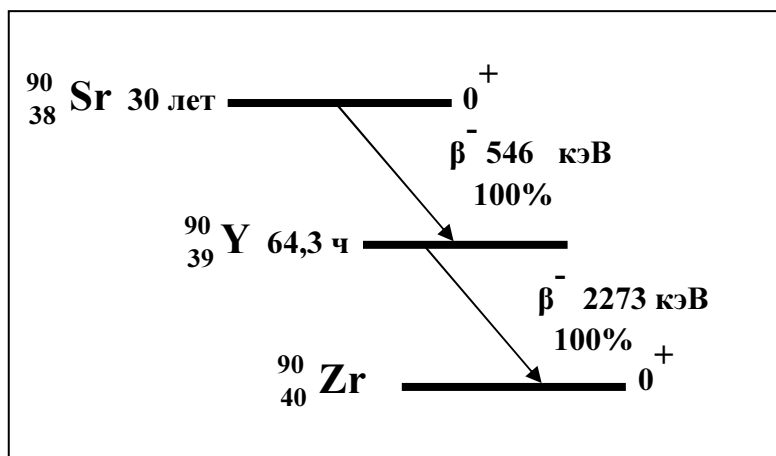


Рис.3 Схема распада ядер стронций - иттриевого источника.

Целью настоящей лабораторной работы является определение толщины слоя половинного ослабления пучка электронов β -распада иттрия, максимальная энергия которого 2273кэВ .

Экспериментально установлено, что кривая ослабления β -электронов достаточно хорошо описывается экспоненциальной функцией, т.е.

$$N(x) = N(0)e^{-\mu x}, \quad (1)$$

где μ – линейный коэффициент ослабления пучка электронов в поглотителе, $N(x)$ и $N(0)$ – число электронов, соответственно, влетающих в поглотитель и прошедших через него. Линейный коэффициент ослабления – величина обратная толщине слоя поглотителя, в котором число электронов уменьшается в ℓ раз. Из выражения (1) нетрудно получить, что толщина слоя половинного ослабления $\Delta_{1/2}$ связана с линейным коэффициентом ослабления пучка, следующим образом:

$$\frac{N(0)}{N(\Delta_{1/2})} = 2 = \ell^{(\mu \cdot \Delta_{1/2})}, \quad \Delta_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} \quad (2)$$

Описание эксперимента.

В данной лабораторной работе экспериментально определяется толщина слоя половинного ослабления β -электронов в алюминии ($Z=13$, $A=27$). Источником электронов является источник на основе стронций – иттрия (см. схему и спектр на рисунках 2 и 3). В данном случае наблюдается два последовательных β -распада. Измеряются количества зарегистрированных импульсов от пучков электронов, прошедших через поглотители двух разных толщин 0,8мм и 1мм. Блок схема эксперимента показана на рис.4.

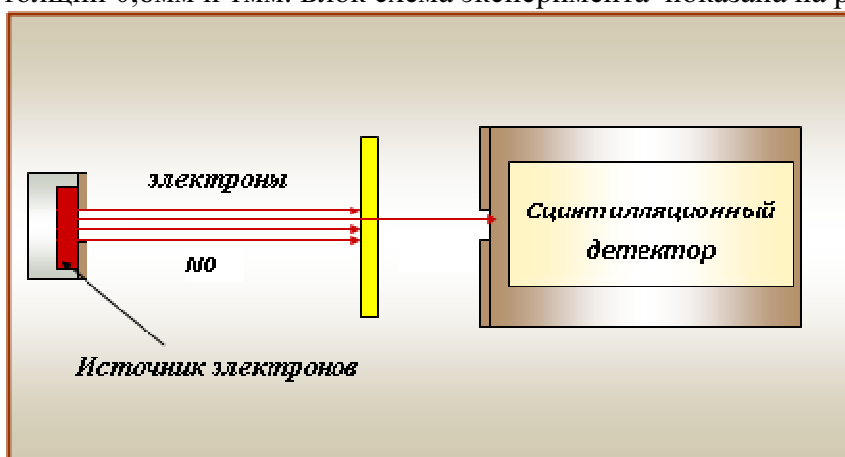


Рис.4 Блок схема эксперимента.

Несмотря на то, что начальный (без поглотителей) спектр электронов содержит два β -спектра. Электроны с энергией меньше чем 546 кэВ имеют длину пробега в алюминии 0,46 мм, следовательно, если толщина поглотителя будет больше чем 0,46 мм, на выходе из мишени будут регистрироваться только электроны, принадлежащие спектру с энергией 2273 кэВ. Доля зарегистрированных детектором частиц практически не зависит от наличия поглотителей, поэтому мы можем отношение числа прошедших частиц заменить отношением зарегистрированных импульсов, то есть:

$$\frac{N_{\text{част}}(L1)}{N_{\text{част}}(L2)} = \frac{N_{\text{имп}}(L1)}{N_{\text{имп}}(L2)} = \frac{N1}{N2} = \frac{N(0) \exp(-\mu L1)}{N(0) \exp(-\mu L2)} = \exp(\mu(L2 - L1)) \quad (3)$$

Логарифмируя (3), получаем:

$$\ln\left(\frac{N1}{N2}\right) = \mu(L2 - L1)$$

Следовательно,

$$\Delta_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{\ln 2 \cdot (L2 - L1)}{\ln\left(\frac{N1}{N2}\right)} \quad (4)$$

Для регистрации β -излучения используется спектрометр, описанный в «Краткие сведения по ядерной физике...». Управление и накопление данных на спектрометре осуществляется с помощью компьютера. Перед началом измерения необходимо на панели спектрометра установить его рабочие параметры: ДНУ – « дискриминации нижний уровень», позволяющий отсеять все шумовые импульсы спектрометра; ДВУ – «дискриминации верхний уровень», обычно 1023, т.е. вся шкала спектрометра; коэффициент усиления; напряжение питания на ФЭУ (для используемого ФЭУ напряжение, как правило, от 500 до 800 В), время измерения спектра. После установки всех параметров спектрометр включается, нажимая клавишу «Старт» и начинается набор спектра.

Процесс установления рабочих параметров и непосредственно набор спектра радиоактивных изотопов можно визуально наблюдать, запустив видео файл с расширением «avi», приложенный к лабораторной работе. На панели спектрометра: ось абсцисс — каналы спектрометра, соответствующие энергетическим интервалам, ось ординат — число частиц, имеющих энергию в интервале, соответствующем каналу спектрометра (см. подробнее в «Краткие сведения по ядерной физике...»).

Порядок выполнения лабораторной работы.

Лабораторная работа выполняется с помощью программы Microsoft Excel Windows или любой другой программы, позволяющей проводить простейшие вычисления и рисовать графики (гистограммы).

1. Загрузит текстовые файлы, содержащие экспериментальные спектры, необходимые для выполнения данной лабораторной работы, в свою рабочую папку.

2. Открыть в Microsoft Excel текстовый файл «Фон» содержащий спектр фоновых импульсов. Порядок открытия: «Данные» - «Из текста» → «Готово». Способ открытия файлов может отличаться от предлагаемого, но важно, чтобы данные конкретного спектра были представлены в виде столбца.

3. Аналогично открыть файл «Sr08», содержащий спектр электронов, прошедших через поглотитель толщиной 0,8 мм.».

4. Повторить аналогичную процедуру для файла «Sr10», содержащего спектр электронов, прошедших через поглотитель толщиной 1 мм.

5. Для визуального анализа спектров рекомендуется построить гистограммы распределения импульсов по каналам спектрометра (спектры). Для этого выделить столбцы, содержащие информацию о спектрах, нажать клавишу «Вставка» - «График» и выбрать верхний левый из предлагаемых графиков. На графике будут показаны все данные, содержащиеся в выделенной области. Если необходимо, операцией «Выбор данных» удалить ряды, содержащие ненужную информацию.

6. Найти интегральное число фоновых импульсов F , а также интегральные числа импульсов, зарегистрированных детектором, при наличии поглотителя с толщиной 0,8 мм $N1F$ и толщиной 1 мм – $N2F$. Для этого в свободной ячейке установить курсор, записать =, выбрать из раздела «формулы» «математические формулы», найти в открывающемся окне «СУММ», а затем ввести в диалоговом окне диапазон суммирования, например, =СУММ(A1:A1023). Результатом вычисления будут величины $N1F$ и $N2F$, соответственно.

7. Рассчитать интегральное число импульсов при наличии двух различных поглотителей за вычетом фоновых импульсов, $N1 = N1F - F$ и $N2 = N2F - F$.

8. Подставить полученные значения $N1$ и $N2$ в формулу (4) и найти значение слоя половинного ослабления электронов с энергией β -спектра, равной 2273 кэВ.

9. Оценить статистическую погрешность эксперимента δX по формуле

$$\delta X = \sqrt{\frac{1}{N1} + \frac{1}{N2}}.$$

10. Рассчитать толщину защиты из алюминия, обеспечивающую уменьшение числа падающих на защиту электронов стронций - иттриевого источника в 64 раза, используя найденное в лабораторной работе значение толщины слоя половинного ослабления.

11. Проверить правильность полученных результатов и усвоение изученного в лабораторной работе материала, выполнив предлагаемый тест (см. Тест к работе 2).

Тест для 2 работы.

1. Толщина слоя половинного ослабления пучка электронов стронций – иттриевого источника с энергией 2273 кэВ равна:

- 0,08 см;
- 0,07 см;
- 0,06 см;
- 0,045 см.

2. Для ослабления потока падающих электронов от стронций – иттриевого источника в 64 раза необходима защита из алюминия толщиной:

- 1 см; 5,1 см; 0,56 см; 0,36 см; 0,76 см.

3. Какие потери энергии называются ионизационными?

- Только потери энергии, которые приводят к ионизации атомов вещества;
- Потери энергии, приводящие к ионизации и возбуждению атомов вещества;
- Потери энергии вследствие упругого рассеяния на ядрах атомов вещества;
- Потери энергии, идущие на увеличение энергии теплового движения атомов вещества.

4. Спектр электронов β -распада и спектр электронов в ускорителе характеризуются:

- Спектр электронов β -распада имеет непрерывный характер от 0 до некоторой максимальной энергии, а электроны в ускорителе характеризуются определенной энергией с небольшим разбросом по энергии.

- Спектр электронов β -распада, как и электронов в ускорителе, имеет непрерывный спектр от 0 до некоторой максимальной энергии, но энергии электронов в ускорителе выше, чем у электронов β -распада;

- Спектр электронов β -распада, как и электронов в ускорителе, характеризуется определенной энергией с небольшим разбросом по энергии.

- В зависимости от вида источников β -частиц и вида ускорителя спектры частиц могут иметь непрерывный характер от 0 до некоторой энергии или дискретный, т.е. иметь определенную энергию.

5. Как меняется толщина необходимой защиты от β - электронов при увеличении их максимальной энергии?

- Толщина не зависит от максимальной энергии;
- Толщина защиты возрастает с ростом максимальной энергии β -электронов;
- Толщина защиты уменьшается с ростом максимальной энергии β -электронов;

6. Какая зависимость описывает ослабление интенсивности пучка β -электронов от толщины мишени при прохождении через вещество?

- Линейная функция;
- Квадратичная функция;
- Экспоненциальная функция;
- Полином четвертой степени.

Лабораторная работа №3.

«Изучение поглощения γ -излучения в различных веществах»

Цель работы: Ознакомиться с процессами взаимодействия γ – излучения с веществом.

Сравнить проникающую способность частиц γ – излучения изотопа $^{137}_{55}\text{Cs}$ в различных веществах.

Прохождение γ – излучения через вещество

Известно, что γ – излучение может оказывать вредное влияние на здоровье человека. Тем не менее, высокая проникающая способность γ – излучения используется для решения различных практических задач в медицине, промышленности, геологии, и многих других областях. В связи с развитием атомной энергетики знание свойств γ – излучения и способов защиты от его вредного воздействия приобретает особую актуальность. Так, например, в ядерном реакторе атомной электростанции имеются значительные потоки различных ионизирующих излучений, в том числе и γ – излучения. Чтобы ясно представлять степень биологической опасности γ – излучения и применять эффективные меры защиты, важно знать свойства этого излучения, и, в первую очередь, механизмы его взаимодействия с веществом.

Взаимодействие γ -излучения осуществляется с отдельными атомами вещества. γ -квант (фотон) может пройти достаточно большое расстояние в веществе, прежде чем произойдет взаимодействие. Существует два результата взаимодействия γ – излучения с любым веществом: поглощение и рассеяние. При поглощении γ -квант исчезает, а его энергия передается веществу. При рассеянии γ -квант не исчезает, а меняет направление распространения.

При не очень больших энергиях γ -квантов основным видом поглощения является фотоэлектрическое поглощение (фотоэффект). Явление фотоэффекта состоит в поглощении γ – кванта атомом вещества; при этом фотон исчезает, а один из электронов оболочки (*фотоэлектрон*) поглощает его энергию и выбрасывается за пределы атома. Энергия γ – кванта почти вся передается выбитому фотоэлектрону – лишь некоторая ее часть расходуется на отрыв электрона от атома.

Основной вид рассеяния γ – излучения носит название *эффект Комптона*. В результате этого процесса γ – квант, как и при фотоэффекте, выбивает из атома электрон, который называется *комптоновским* электроном. Но, в отличие от фотоэффекта, взаимодействующий γ – квант не исчезает, а уменьшает свою энергию и меняет направление распространения. Причем, в отдельных актах рассеяния энергия рассеянного кванта а, следовательно, и комптоновского электрона может приобретать разное значение в зависимости от угла, на который рассеивается γ - квант.

Рассмотрим параллельный пучок γ – квантов с энергией E_γ , падающий на поглотитель в виде пластинки толщиной L из какого-нибудь вещества, расположенной перпендикулярно пучку. За пластинкой располагается детектор, регистрирующий фотоны, которые прошли вещество не испытав ни одного взаимодействия, и, следовательно, не изменив свою энергию и направление (см. рис.1). Процессы взаимодействия с веществом (поглощение и рассеяние) приводят к выбыванию γ – квантов из параллельного пучка. Как следствие, число частиц в пучке уменьшается с ростом толщины L поглощающего слоя вещества.

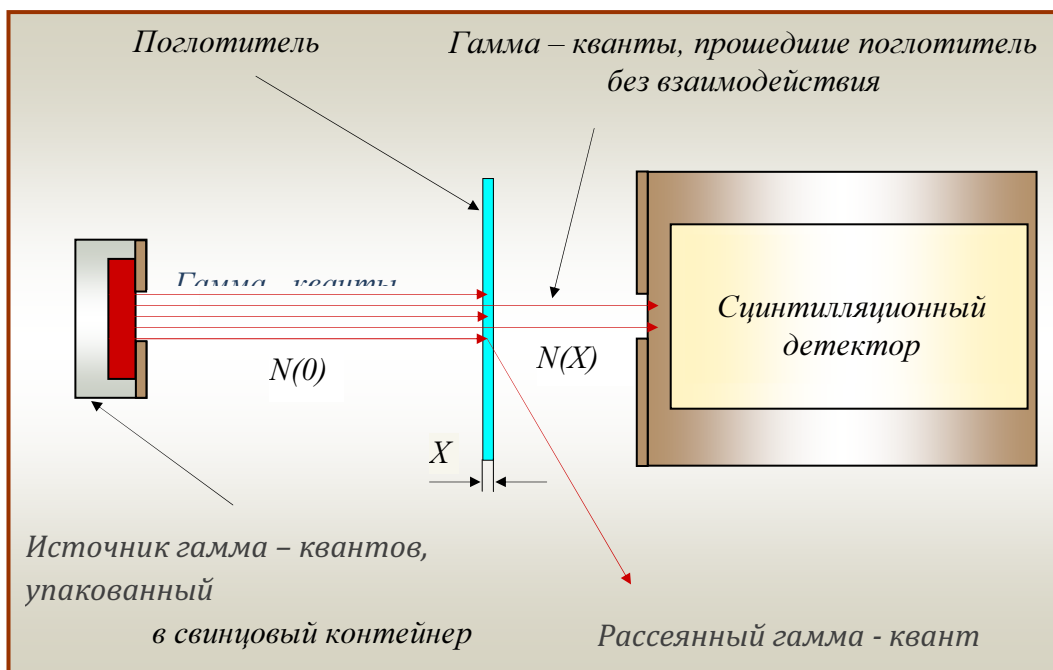


Рис. 1. Схема прохождения пучка γ – квантов через поглотитель

Обозначим через $N(0)$ число γ – квантов, которые зарегистрировал детектор за промежуток времени t при отсутствии поглотителя. После размещения поглотителя толщиной L на пути пучка, детектор будет регистрировать за это же время уже другое количество квантов излучения. Обозначим это число через $N(L)$. Величина $N(L)$ будет меньше $N(0)$ вследствие процессов поглощения и рассеяния γ – квантов в веществе поглотителя.

В случае параллельного узкого пучка γ – квантов с одинаковой энергией E_γ зависимость числа прошедших квантов $N(L)$ от толщины поглотителя L (закон ослабления) имеет следующий вид:

$$N(L) = N(0) \cdot \exp(-\mu L) \quad (1)$$

где μ носит название линейного коэффициента ослабления и характеризует интенсивность взаимодействия излучения с веществом; размерность коэффициента ослабления – $1/\text{см}$. Величина μ зависит от энергии квантов излучения E_γ и от вещества поглотителя – его атомного номера Z и его плотности.

Слой поглотителя, после прохождения которого число γ – квантов уменьшается вдвое, называется слоем половинного ослабления. Его толщина $\Delta_{1/2}$ по определению удовлетворяет соотношению:

$$N(\Delta_{1/2})/N(0) = \exp(-\mu \Delta_{1/2}) = 1/2, \quad (2)$$

Отношение

$$\eta(L) = N(L)/N(0) \quad (3)$$

мы будем называть коэффициентом пропускающей способности поглотителя толщиной L из данного вещества.

Таким образом, если нам известен коэффициент пропускающей способности $\eta(L)$ для поглотителя толщиной L мы можем воспользоваться соотношением (1) и рассчитать линейный коэффициент ослабления μ по формуле

$$\mu = -\frac{\ln(\eta(L))}{L}. \quad (4)$$

Из соотношения (2) получаем формулу для расчета толщины слоя половинного ослабления

$$\Delta_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} = - \frac{\ln 2 \cdot L}{\ln(\eta)} \quad (5)$$

Описание эксперимента.

В эксперименте изучается поглощение γ -излучения радиоактивного изотопа цезия $^{137}_{55}\text{Cs}$ с энергией γ -квантов $E_\gamma = 662$ кэВ в различных поглотителях. Поглотители представляют собой алюминиевую, железную, оловянную и свинцовую пластинки толщиной 1,0 см, которые поочередно помещаются между источником излучения и сцинтилляционным детектором на пути пучка γ -квантов (см. рис.1).

Для регистрации γ -излучения используется спектрометр, описанный в «Краткие сведения по ядерной физике...». Управление и накопление данных на спектрометре осуществляется с помощью компьютера. Перед началом измерения необходимо на панели спектрометра установить его рабочие параметры: ДНУ-« дискриминации нижний уровень», позволяющий отсечь все шумовые импульсы спектрометра; ДВУ –«дискриминации верхний уровень», обычно 1023, т.е. вся шкала спектрометра; коэффициент усиления; напряжение питания на ФЭУ (для используемого ФЭУ напряжение, как правило, от 500 до 800 В), время измерения спектра. После установки всех параметров спектрометр включается, нажимая клавишу «Старт» и начинается набор спектра.

Процесс установления рабочих параметров и непосредственно набор спектра радиоактивного изотопа $^{137}_{55}\text{Cs}$ можно визуально наблюдать, запустив видео файл с расширением «avi», приложенный к лабораторной работе. На панели спектрометра: ось абсцисс — каналы спектрометра, соответствующие энергетическим интервалам, ось ординат — число частиц, имеющих энергию в интервале, соответствующем каналу спектрометра (см. подробнее в «Краткие сведения по ядерной физике...»).

Для каждого поглотителя за время $t = 300$ с регистрировалось прошедшее через, него излучение. Полученные четыре спектра записаны в файлы под именами CsAl, CsFe, CsSn и CsPb. Также измерен спектр излучения источника за это же время без какого либо поглотителя и записан под именем Cs0.

Во всех полученных спектрах присутствует фоновая компонента, происхождение которой связано с естественным радиационным фоном окружающей среды и, в меньшей степени, с космическим излучением. Чтобы оценить вклад фонового излучения, дополнительно за время $t = 300$ с был измерен спектр излучения при отсутствии источника и поглотителей. Полученный таким образом спектр был записан под именем Фон.

Порядок выполнения лабораторной работы.

Лабораторная работа выполняется с помощью программы Microsoft Excel Windows или любой другой программы, позволяющей проводить простейшие вычисления и рисовать графики (гистограммы).

Загрузит текстовые файлы, содержащие экспериментальные спектры, необходимые для выполнения данной лабораторной работы, в свою рабочую папку.

1. Открыть в Microsoft Excel текстовый файл «Фон» содержащий спектр фоновых импульсов. Порядок открытия: «Данные» - «Из текста»→ «Готово». Способ открытия файлов может отличаться от предлагаемого, но важно, чтобы данные конкретного спектра были представлены в виде столбца.
3. Аналогично открыть файлы «Cs0», «CsAl», «CsFe», «CsSn» и «CsPb», содержащие спектры γ -квантов цезиевого источника, зарегистрированные без поглотителя и при помещении между источником и детектором поглотителей с толщиной 1см, сделанных их четырех различных элементов - алюминия, железа, олова и свинца.

4. Сделать вычитание фоновых импульсов из спектра цезия «Cs0». Для этого выбрать ячейку свободного ряда и записать операцию, например, «=B1-A1», если в ячейке А помещены данные спектра фоновых импульсов, а в ячейке В суммарный спектр источника с фоновыми импульсами. Затем захватив курсором крестик, расположенный в правом нижнем углу выбранной ячейки, протянуть курсор по всему столбцу. В результате, в выбранном столбце окажется спектр источника ^{137}Cs без фоновых импульсов.

5. Аналогично вычесть фоновые импульсы из спектров «CsAl», «CsFe», «CsSn» и «CsPb».

6. Для визуального анализа спектров и оценки величины вклада фонового излучения рекомендуется построить гистограммы распределения импульсов по каналам спектрометра (спектры). Для этого выделить столбцы, содержащих информацию о спектрах, полученных путем вычитания, нажать клавишу «Вставка» → «График» и выбрать верхний левый из предлагаемых графиков. На графике будут показаны все данные, содержащиеся в выделенной области. Можно операцией «Выбор данных» удалить ряды, содержащие суммарные спектры, если они будут представлены на графике.

7. Визуально на графике выбрать область пика полного поглощения для полученных спектров цезия. Она должна быть одинаковой для всех спектров, чтобы сравнение было корректным.

8. Рассчитать суммарное число импульсов во всех спектрах в выбранном интервале каналов. Для этого в свободной ячейке установить курсор, записать «=», выбрать из раздела «формулы» → «математические формулы», найти в открывающемся окне «СУММ», а затем ввести в диалоговом окне диапазон суммирования, например, «=СУММ(A230:A340)». Результатом вычисления будут величины $\text{NCs}(0)$ и $\text{NAl}(L)$, $\text{NFe}(L)$, $\text{NSn}(L)$ и $\text{NPb}(L)$, соответственно.

9. Рассчитать коэффициенты проникающей способности γ -квантов η по формуле (3) для алюминия, железа, олова и свинца.

10. Оценить относительные статистические погрешности измерения коэффициентов проникающей способности по формуле

$$\delta_{\eta} = \sqrt{1/N(L) + 1/N(0)}. \quad (6)$$

Однако следует иметь в виду, что влияние фона вносит дополнительную статистическую погрешность в измерения. Формула (6) дает лишь оценку нижней границы погрешности.

11. Рассчитать толщины слоев половинного ослабления для различных поглотителей, используя формулы (4) и (5).

12. Внести полученные значения в таблицу и сделать заключение о изменении проникающей способности γ -квантов в различных веществах и о зависимости проникающей способности от атомного номера элемента.

Имя спектра	Вещество поглотителя	Z	N(0)	N(L)	η	δ_η	$\Delta_{1/2}$
Cs0	Без поглотителя	-			1	0	
CsAl	Алюминий	13					
CsFe	Железо	26					
CsSn	Олово	50					
CsPb	Свинец	82					

13. Проверить правильность полученных результатов и усвоение изученного в лабораторной работе материала, выполнив предлагаемый тест (см. Тест к работе 3).

Тест к работе №3.

1. Измеренные коэффициенты проникающей способности равны:
 - для Al – 0,8; Fe – 0,6; Sn -0,6; Pb – 0,3;
 - для Al – 0,8; Fe – 0,4; Sn -0,6; Pb – 0,1;
 - для Al – 0,6; Fe – 0,6; Sn -0,6; Pb – 0,3;
 - для Al – 0,8; Fe – 0,4; Sn -0,6; Pb – 0,1.
2. Максимальная проникающая способность гамма-излучения цезия в:
 - Алюминии;
 - Железе;
 - Олове;
 - Свинце.
3. Наиболее эффективна защита от гамма-излучения, сделанная из:
 - Алюминия;
 - Железа;
 - Олова;
 - Свинца.
4. При комптоновском рассеянии гамма излучения на атомном электроны происходит следующее:
 - гамма-квант увеличивает свою энергию;
 - гамма-квант расходится в разные стороны от атома;
 - из атома выбивается электрон;
 - гамма-квант меняет направление движения.
5. Коэффициент проникающей способности зависит от:
 - энергии излучения, геометрии эксперимента и от толщины поглотителя;
 - плотности вещества и толщины поглотителя и от энергии излучения;
 - толщины и температуры поглотителя и энергии излучения;
 - температуры и толщины поглотителя.
6. При прохождении слоя половинного ослабления:
 - половина гамма квантов в пучке теряет половину своей энергии;
 - каждый гамма квант теряет половину своей энергии;

- количество гамма квантов в пучке уменьшается наполовину;
- половина квантов в пучке теряет свою энергию.

Лабораторная работа №4 **«Изучение проникающей способности γ – квантов различных энергий»**

Цель работы: сравнить проникающую способность γ – излучения радиоактивных изотопов натрия ^{22}Na и цезия ^{137}Cs .

При прохождении γ - квантов через вещество их число убывает в результате процессов поглощения электронами атомов среды (фотоэффект) и рассеяния на атомных электронах с передачей им части своей энергии (комптоновское рассеяние). Вероятности этих процессов зависят от энергии γ - квантов. Один и тот же слой вещества может полностью поглотить γ -кванты низких энергий (десятки кэВ), но быть прозрачным для жестких квантов (область энергий порядка нескольких МэВ). Увеличение проникающей способности γ -квантов с ростом их энергии объясняется зависимостью вероятности взаимодействия γ -квантов с атомами вещества от энергии. Вероятности процессов фотоэффекта и комптоновского рассеяния уменьшаются с ростом энергии γ -кванта. Вероятность фотоэффекта зависит от энергии как $E_\gamma^{-7/2}$, а вероятность комптоновского рассеяния как $1/E_\gamma$. Как результат, чем выше энергия γ -кванта, тем больше проникающая их способность и тем толще должна быть защита для безопасной работы с источниками.

В активной зоне реактора в результате деления ядер и дальнейшего β -распада осколков деления возникают интенсивные потоки γ -излучения в широком диапазоне энергий вплоть до 15 МэВ. Очень важно иметь представление о проникающей способности γ - излучения разных энергий для того, чтобы правильно оценивать возможности защиты от него.

Характеристикой проникающей способности γ - квантов может служить относительное число γ - квантов, прошедших через поглотитель. Это число зависит от энергии γ - квантов, плотности и зарядового числа вещества, а также от толщины поглотителя. В данной работе изучается только энергетическая зависимость.

Для удобства анализа введем коэффициент проникающей способности η , равный отношению к числу γ - квантов (доли γ - квантов) с энергией E_γ , прошедших поглотитель толщиной L , т.е.

$$\eta = N(L) / N(0), \quad (1)$$

где – $N(0)$ и $N(L)$ – количество γ -квантов, падающих на поглотитель и прошедших через него.

Описание эксперимента.

В данной работе используются точечные γ - источники ^{22}Na с активностью $A_{\text{Na}} = 10^3$ Бк и ^{137}Cs с активностью $A_{\text{Cs}} = 2 \cdot 10^4$ Бк. Схемы распадов этих изотопов показаны на Рис.1.

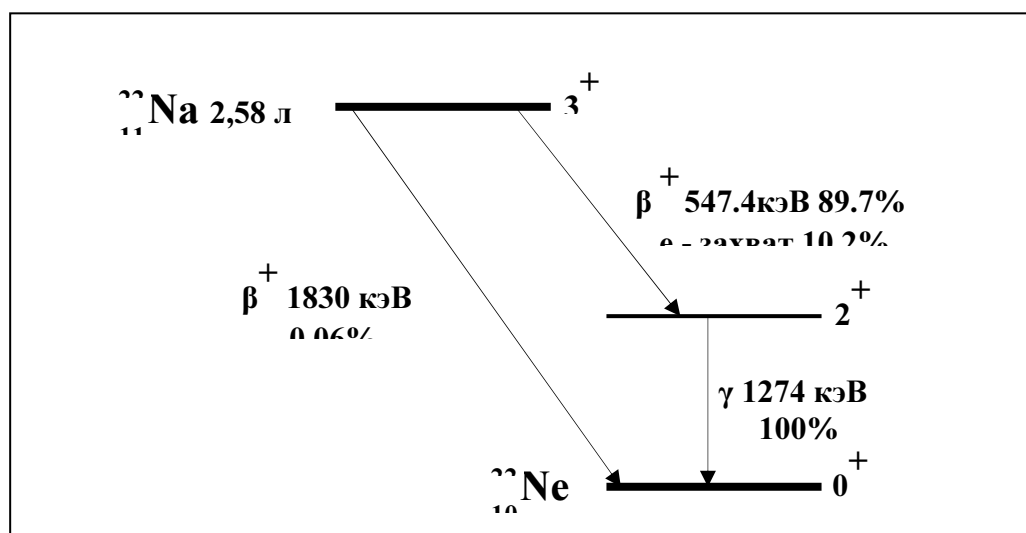
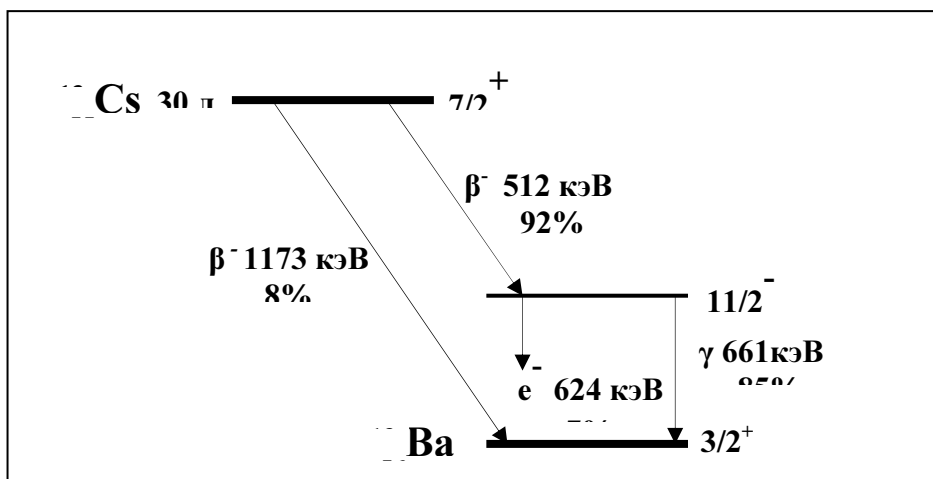


Рис.1. Схемы распада.

Их схем распада видно, что изотоп ^{137}Cs излучает γ -квант с энергией 662 кэВ и, следовательно его экспериментальный спектр содержит один пик полного поглощения, расположенный на правой границе спектра.

Что касается изотопа ^{22}Na , то при β - распаде его дочернее ядро испускает γ -кванты только с энергией 1270 кэВ. Однако в спектре наблюдаются два пика полного поглощения (см. рис.2).

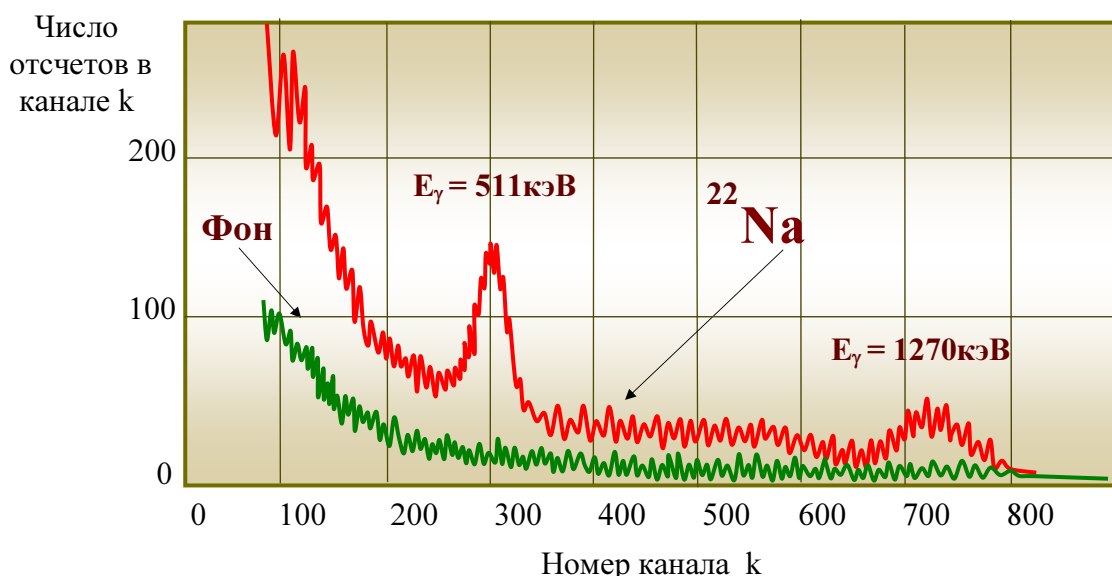


Рис.2. γ -спектр ^{22}Na и спектр фоновых частиц

Согласно рисунку максимум первого пика находится в области 300-го канала. Этот пик соответствует энергии 511 кэВ. Каково его происхождение?

Все дело в том, что ^{22}Na при β^- - распаде испускает позитроны e^+ . Это античастицы в нашем мире. При встрече позитрона с электроном окружающего вещества происходит аннигиляция этой пары в два γ -кванта:

$$e^+ + e^- = \gamma + \gamma.$$

Поскольку энергия покоя электрона (позитрона) равна 511 кэВ, при аннигиляции образуются два γ -кванта именно с такой энергией. Далее, в результате фотоэффекта в сцинтилляторе эти кванты теряют всю энергию, и в спектре наблюдается соответствующий пик полного поглощения, который называется аннигиляционным. Этот пик оказывается преобладающим в спектре не только потому, что рождаются 2 γ -кванта на один испущенный позитрон, но, главным образом, потому, что вероятность регистрации γ -квантов в этой области энергий выше, чем в области энергии 1274 кэВ.

В качестве поглотителя γ -квантов выбирается свинцовая пластинка такой толщины, чтобы в ней было заметно поглощение и аннигиляционных квантов (511 кэВ) и квантов с энергией 1270 кэВ. Например, толщина слоя свинца $L = 0.5$ см является вполне подходящей.

Для каждого источника с поглотителем (L) и без поглотителя (0) измеряются γ -спектры. Набирается также спектр фоновых отсчетов.

Для регистрации γ -излучения используется спектрометр, описанный в «Краткие сведения по ядерной физике...». Управление и накопление данных на спектрометре осуществляется с помощью компьютера. Перед началом измерения необходимо на панели спектрометра установить его рабочие параметры: ДНУ –

« дискриминации нижний уровень», позволяющий отсеять все шумовые импульсы спектрометра; ДВУ – «дискриминации верхний уровень», обычно 1023, т.е. вся шкала спектрометра; коэффициент усиления; напряжение питания на ФЭУ (для используемого ФЭУ напряжение, как правило, от 500 до 800 В), время измерения спектра. После установки всех параметров спектрометр включается, нажимая клавишу «Старт» и начинается набор спектра.

Процесс установления рабочих параметров и непосредственно набор спектра радиоактивного изотопа $^{22}_{11}\text{Na}$ можно визуально наблюдать, запустив видео файл с

расширением «ovi», приложенный к лабораторной работе. На панели спектрометра: ось абсцисс — каналы спектрометра, соответствующие энергетическим интервалам, ось ординат — число частиц, имеющих энергию в интервале, соответствующем каналу спектрометра (см. подробнее в «Краткие сведения по ядерной физике...»).

Результаты эксперимента представлены в 5 приложенных к работе файлах в текстовом формате: «Cs0» и «CsL», - спектры цезия, измеренные в отсутствие поглотителя между источником и детектором и при помещении поглотителя имеющего толщину L (см. рис.3); «Na0» и «NaL», - аналогичные спектры для источника ^{22}Na и «Фон» - спектр фоновое излучения. Блок схема эксперимента показана на Рис.3.

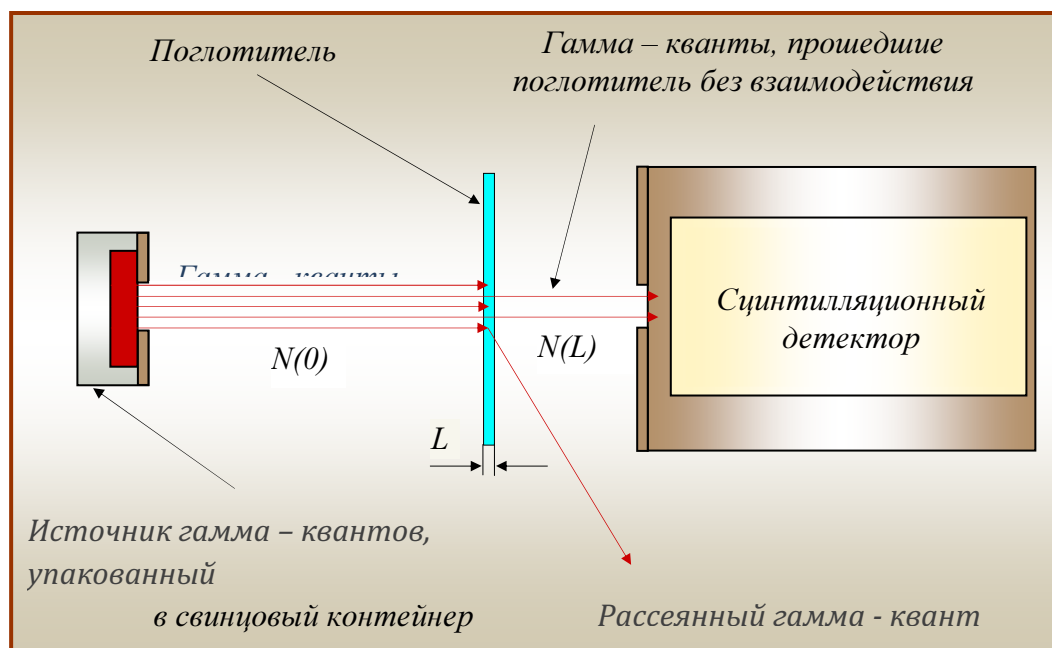


Рис. 3. Блок-схема эксперимента.

Для того, чтобы сравнить проникающую способность γ -квантов с энергиями 511 кэВ и 1270 кэВ используя общий для источника ^{22}Na спектр, воспользуемся тем обстоятельством, что рассматриваемые энергии сильно отличаются по величине и формируют пики полного поглощения не перекрывающиеся между собой. Как следствие, для расчета коэффициента проникающей способности целесообразно сравнивать количество зарегистрированных импульсов в отсутствие поглотителя и в его присутствии для числа γ -квантов, просуммированных только в области пиков полного поглощения. Так как неконтролируемые искажения числа зарегистрированных импульсов наиболее вероятно к области малых каналов, например, собственные шумы детектора, то и для источника на основе цезия сравнение спектров «Cs0» и «CsL» целесообразно проводить также в области пика полного поглощения.

Порядок выполнения лабораторной работы.

Лабораторная работа выполняется с помощью программы Microsoft Excel Windows или любой другой программы, позволяющей проводить простейшие вычисления и рисовать графики (гистограммы).

1. Загрузит текстовые файлы, содержащие экспериментальные спектры, необходимые для выполнения данной лабораторной работы, в свою рабочую папку.

2. Открыть в Microsoft Excel текстовый файл «Фон» содержащий спектр фоновых импульсов. Порядок открытия: «Данные» - «Из текста» → «Готово». Способ открытия

файлов может отличаться от предлагаемого, но важно, чтобы данные конкретного спектра были представлены в виде столбца.

3. Аналогично открыть файлы «Cs0» и «CsL», содержащие спектры γ -квантов цезиевого источника, зарегистрированные в отсутствие поглотителя и при помещении поглотителя с толщиной 0,5 см между источником и поглотителем.

4. Сделать вычитание фоновых импульсов из спектра цезия «Cs0». Для этого выбрать ячейку свободного ряда и записать операцию, например, «=B1-A1», если в ячейке А помещены данные спектра фоновых импульсов, а в ячейке В суммарный спектр источника с фоновыми импульсами. Затем захватив курсором крестик, расположенный в правом нижнем углу выбранной ячейки, протянуть курсор по всему столбцу. В результате, в выбранном столбце окажется спектр источника ^{137}Cs без фоновых импульсов.

5. Аналогично вычесть фоновые импульсы из спектра «CsL».

6. Для визуального анализа спектров рекомендуется построить гистограммы распределения импульсов по каналам спектрометра (спектры). Для этого выделить два столбца, содержащих информацию о спектрах, полученных путем вычитания, нажать клавишу «Вставка» → «График» и выбрать верхний левый из предлагаемых графиков. На графике будут показаны все данные, содержащиеся в выделенной области. Можно операцией «Выбор данных» удалить ряды, содержащие фоновые импульсы и суммарные спектры, если они будут представлены на графике.

7. Визуально на графике выбрать области пиков полного поглощения для двух полученных спектров цезия. Они должны быть одинаковые для корректного сравнения.

8. Рассчитать суммарное число импульсов в обоих спектрах в выбранном интервале каналов $N_0(\text{Cs})$ и $N_L(\text{Cs})$. Для этого в свободной ячейке установить курсор, записать «=», выбрать из раздела «формулы» «математические формулы», найти в открывающемся окне «СУММ», а затем ввести в диалоговом окне диапазон суммирования, например, «=СУММ(A1:A1024)». Результатом вычисления будут величины $N(0)$ и $N(L)$, соответственно.

9. Рассчитать коэффициент проникающей способности η_{Cs} для энергии γ -кванта 662 кэВ в свинце по формуле (1).

10. Повторить пункты 2 - 6 для спектров «Na0» и «NaL». Однако в спектре натрия выделить две области каналов, соответствующие двум пикам полного поглощения для энергий 511 кэВ и 1274 кэВ, соответственно.

11. Рассчитать коэффициенты проникающей способности η для двух энергий $\eta_{1\text{Na}}$ и $\eta_{2\text{Na}}$.

12. Внести полученные значения в таблицу и сделать заключение о изменении проникающей способности γ -квантов с ростом их энергии.

Таблица 1

Энергия γ - квантов	$N(0)$	$N(L)$	Коэффициент η
Na (1) - 511 кэВ			$\eta_{1\text{Na}} =$
Cs - 661 кэВ			$\eta_{\text{Cs}} =$
Na(2) - 1274 кэВ			$\eta_{2\text{Na}} =$

13. Оценить относительную статистическую погрешность измерения коэффициентов проникающей способности по формуле

$$\delta_{\eta} = \sqrt{1/N(L) + 1/N(0)}. \quad (2)$$

Однако следует иметь в виду, что влияние фона вносит дополнительную статистическую погрешность в измерения. Формула (2) дает лишь оценку нижней границы погрешности.

14. Проверить правильность полученных результатов и усвоение изученного в лабораторной работе материала, выполнив предлагаемый тест (см. Тест к работе 4).

Тест к работе №4.

1. Определенная из эксперимента величина коэффициента проникающей способности равна:

- 0,52 для энергии 551 кэВ; 0,61 для энергии 661 кэВ; 0,82 для энергии 1270 кэВ;
- 0,6 для энергии 551 кэВ; 0,55 для энергии 661 кэВ; 0,82 для энергии 1270 кэВ;
- 0,52 для энергии 551 кэВ; 0,73 для энергии 661 кэВ; 0,71 для энергии 1270 кэВ;
- 0,4 для энергии 551 кэВ; 0,63 для энергии 661 кэВ; 0,71 для энергии 1270 кэВ;

2. Как зависит проникающая способность γ -квантов от энергии?

- С увеличением энергии γ -кванта проникающая способность излучения падает;
- С увеличением энергии γ -кванта проникающая способность излучения растет;
- Проникающая способность практически не зависит от энергии излучения;
- Проникающая способность с ростом энергии излучения вначале растет, а затем падает.

3. Чем объясняется появление в спектре радиоактивного изотопа Na γ -квантов с энергией 511 кэВ?

- При распаде изотопа натрия излучается два γ -кванта с энергиями 551 кэВ и 1270 кэВ;
- При распаде изотопа натрия рождается один γ -квант с энергией 1270 кэВ, но при рассеянии в источнике появляется дополнительный рассеянный γ -квант с энергией 551 кэВ;
- При распаде изотопа натрия рождается один γ -квант с энергией 1270 кэВ и позитрон. Позитрон аннигилирует с окружающими электронами и рождаются два γ -кванта с энергией 551 кэВ;
- При распаде изотопа натрия наблюдается два последовательных радиоактивных распада. γ -квант с энергией 551 кэВ появляется в результате распада изотопа, образовавшегося при распаде натрия.

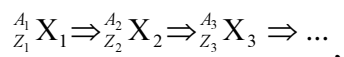
Лабораторная работа №5

«Естественные радиоактивные ряды».

Цель работы: Изучение элементного состава естественного радиоактивного ряда урана.

Атомное ядро — сильно связанная система протонов и нейтронов благодаря интенсивным ядерным силам притяжения. Однако кулоновское отталкивание протонов приводит к ослаблению связи в ядрах с большой величиной заряда Z . Как следствие, все ядра с $Z \geq 82$ являются α -радиоактивными.

Если получающиеся в результате распада исходного ядра ${}_{Z_1}^{A_1}X_1$ новые (вторичные) ядра также являются радиоактивными, возникает цепочка последовательных радиоактивных превращений



где Z_i и A_i — зарядовые и массовые числа радиоактивных ядер, соответственно.

Процесс распада продолжается до тех пор, пока последнее ядро в цепочке превращений не станет стабильным. Совокупность таких ядер называется радиоактивным семейством (радиоактивным рядом).

Если период полураспада первого в цепочке ядра много больше периодов полураспада вторичных ядер, в ряду с течением времени устанавливается равновесие, при котором числа распадов в единицу времени каждого сорта ядер ряда одинаковые. После установления равновесия количество ядер каждого элемента ряда N_i будет пропорционально его периоду полураспада $T_{1/2}^i$ ($T_{1/2}^i$ – время уменьшения числа ядер в 2 раза в результате радиоактивного распада), т.е.

$$N_1 : N_2 : N_3 : \dots = T_{1/2}^1 : T_{1/2}^2 : T_{1/2}^3 : \dots \quad (1)$$

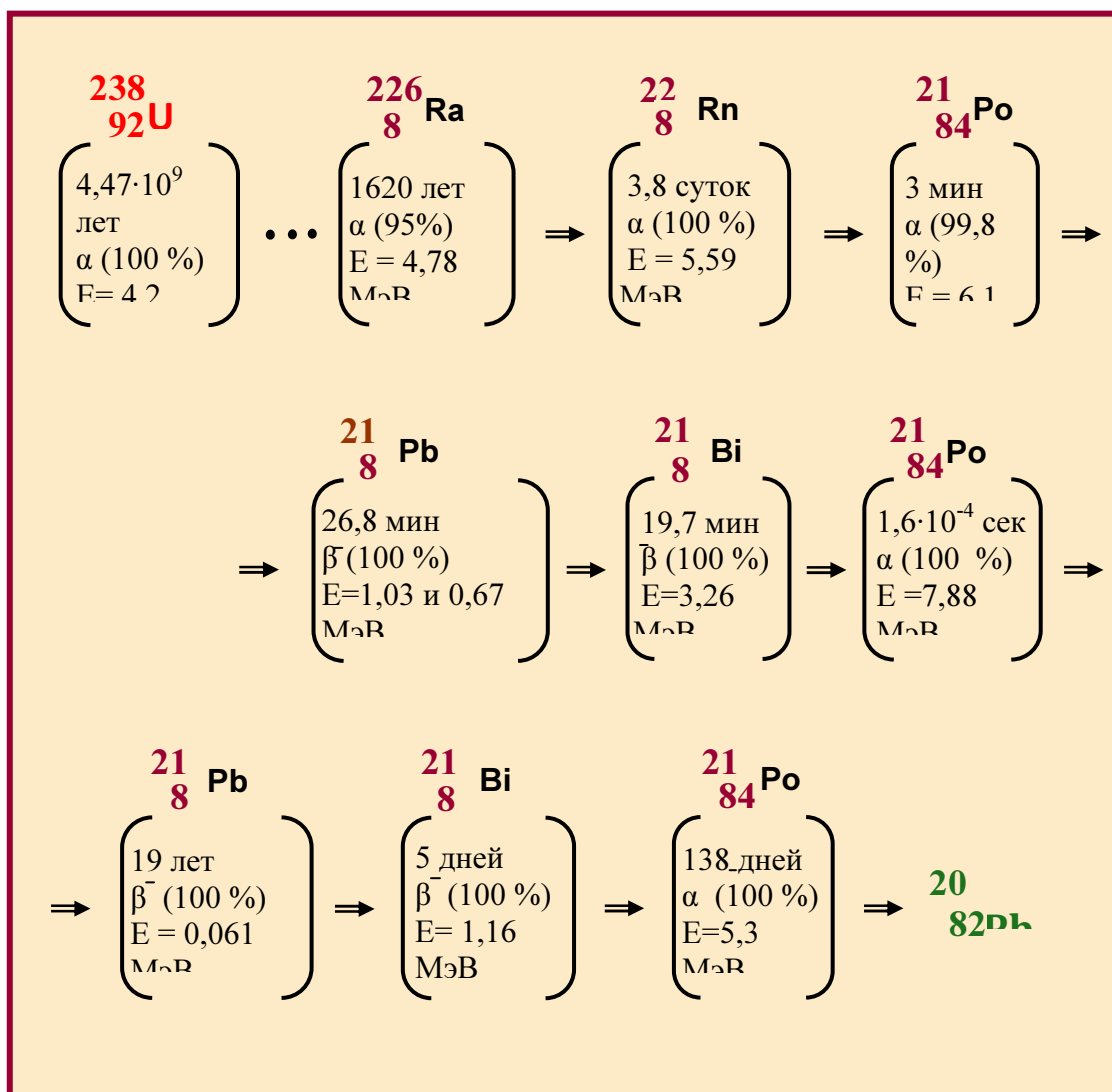


Рис.1 Радиоактивный ряд урана, для которого $A = 4n+2$.

При β^- и γ^- распадах массовое число ядра A не меняется и только при α -распаде число A уменьшается на 4. Как следствие, все радиоактивные ядра тяжелее свинца группируются в 4 радиоактивных семейства (ряда). В каждом ряду массовое число ядер можно представить как: $A=4n$ описывает ряд тория; $A=4n+1$ — ряд нептуния; $A=4n+2$ — ряд урана и $A=4n+3$ — ряд актиния, где n – целое число, равное целой части $A/4$. Название ряда, как правило, дается по названию долгоживущего элемента, дающего начало радиоактивному ряду. Например, родоначальником ряда тория является изотоп тория $^{232}_{90}\text{Th}$ с периодом полураспада $T_{1/2} = 1,4 \cdot 10^{10}$ лет, а конечным ядром — изотоп свинца $^{208}_{82}\text{Pb}$. Первым элементом второго ряда является изотоп нептуния $^{237}_{93}\text{Np}$, для которого

$T_{1/2} = 2,2 \cdot 10^6$ лет. Период полураспада нептуния много меньше возраста Земли ($\approx 4,6 \cdot 10^9$ лет). В результате, члены этого ряда в настоящее время полностью распались, и все его элементы синтезированы искусственным путем.

Рассмотрим подробнее ряд урана, представленный на Рис.1.

Ряд урана начинается с радиоактивного изотопа урана ${}^{238}_{92}\text{U}$, период полураспада которого $T_{1/2} = 4,56 \cdot 10^9$ лет, и кончается стабильным изотопом свинца ${}^{207}_{82}\text{Pb}$. Из схемы видно, что в цепочке имеются вторичные ядра, период полураспада которых - дни и даже минуты. Существование в природе таких короткоживущих ядер возможно только потому, что они постоянно рождаются в процессе радиоактивных превращений.

Среди радиоактивных ядер, возникающих в результате радиоактивных превращений в цепочке урана, содержится изотоп радия ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ с периодом полураспада 1617 лет. Ядро радия распадается, излучая α -частицы с энергией 4,78 МэВ. Все последующие за радием α -распады характеризуются гораздо меньшими периодами полураспада. В результате, наблюдаемый в эксперименте α -спектр изотопа ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ формируется не только α -частицами самого радия, но и α -частицами последующих распадов.

При α -распаде излучается α -частица (ядро гелия ${}^4_2\text{He}$), кинетическая энергия которой однозначно определена законом сохранения энергии $E_\alpha \approx [M({}^A_Z\text{X}) - M({}^{A-4}_{Z-2}\text{Y}) - M({}^4_2\text{He})]c^2$.

Описание эксперимента

α -частицы определенной энергии наблюдаются при регистрации детектором в виде спектрального пика конечной ширины. Ширина пика зависит от вида детектора, которым регистрируется частица. В данной работе α -спектр получен с помощью полупроводникового детектора. Блок-схема эксперимента показана на рисунке 2.

Поверхностно-барьерный полупроводниковый детектор, который был использован для регистрации α -частиц практически не регистрирует β - и γ -излучение.

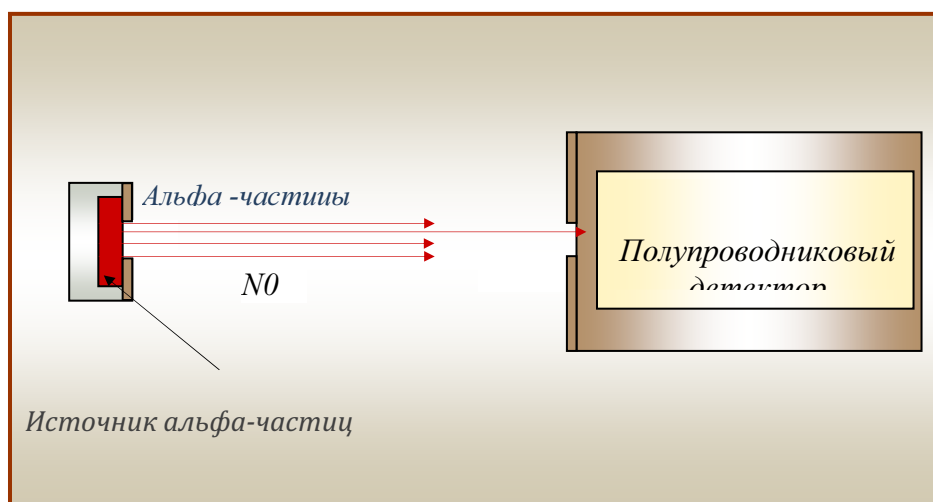


Рис.2 Блок-схема эксперимента.

Как следствие, экспериментальный α -спектр имеет вид одного пика, если излучается одна α -частица, или нескольких дискретных пиков при излучении несколько α -частиц разных энергий. Например, изотопы ${}^{239}_{94}\text{Pu}$ и ${}^{241}_{95}\text{Am}$ излучают только α -частицы с одной энергией, поэтому их спектр состоит из одного пика (см. Рис.3).

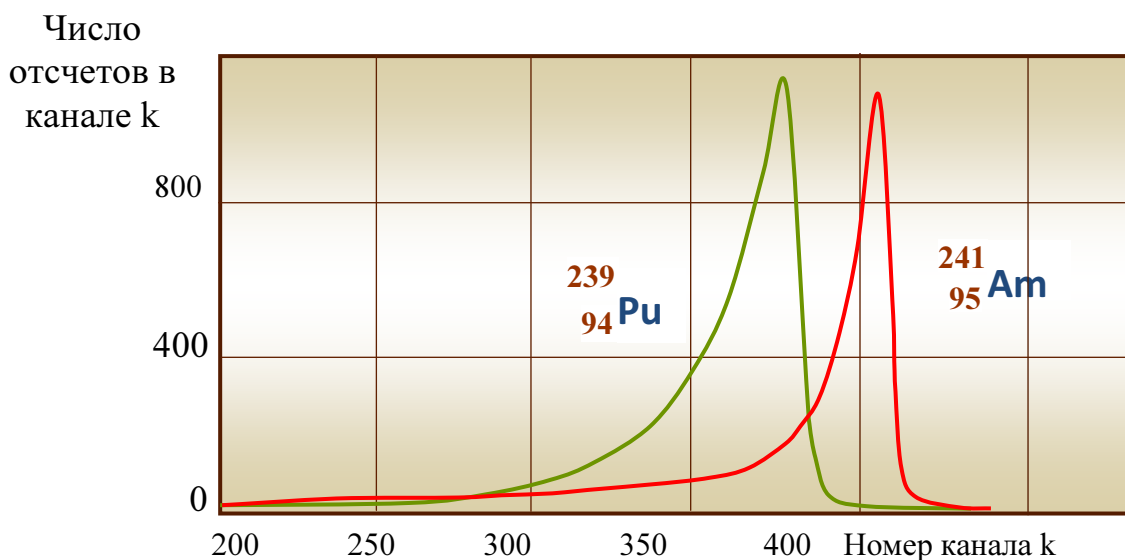


Рис.3 Спектр плутония и америция.

Спектр изотопа $^{226}_{88}\text{Ra}$, показанный на Рис.4, имеет более сложную структуру. Он состоит из четырех пиков, энергии которых соответствуют α -частицам, излучаемым самим радием и ядрами, следующими в цепочке за ним. Из рисунка 4 видно, что второй пик в спектре имеет слабо выраженную тонкую структуру. Природа этой тонкой структуры в наложении двух пиков соответствующих энергиям близким по своим значениям. Так как аппаратный спектр α -частиц с определенной энергией E_α имеет вид пика с конечной шириной, два близких пика могут перекрыться, формируя в спектре сдвоенный пик. Определяя каналы, соответствующие пикам в экспериментальном спектре, а затем, рассчитывая энергии α -частиц, формирующих спектр радия, можно определить короткоживущие α -радиоактивные ядра, стоящие за радием, то есть частично восстановить ряд урана.

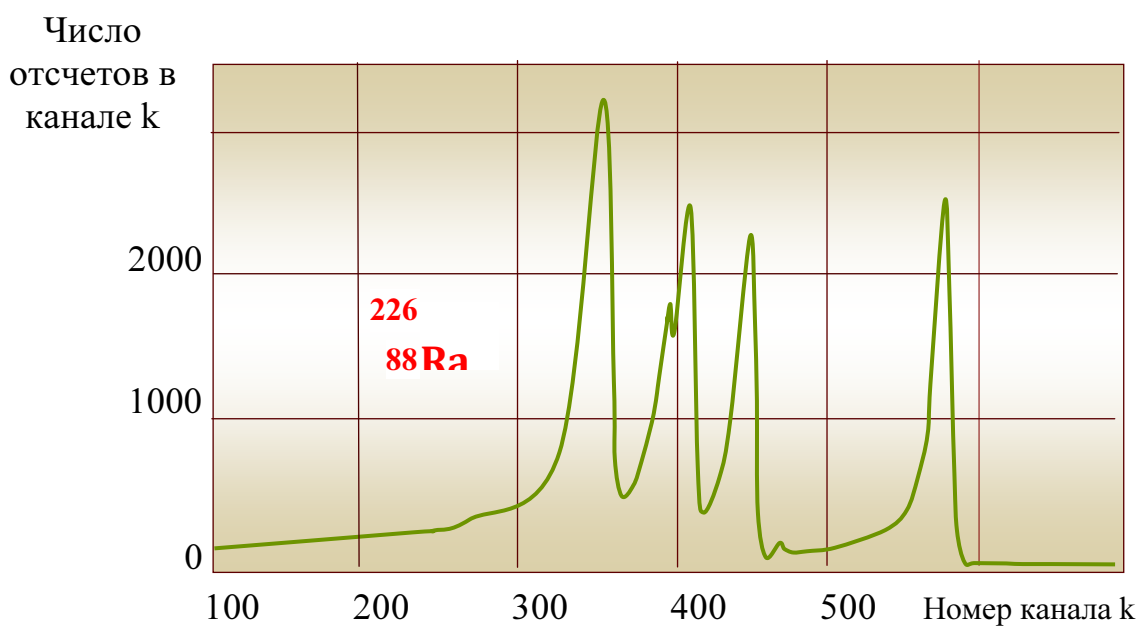


Рис.4 Спектр радия.

Важным обстоятельством, позволяющим определить энергии α -частиц является то, что при детектировании излучения полупроводниковым детектором номер канала спектра линейно зависит от энергии частицы, то есть можно написать формулу

$$E = a \cdot k + b, \quad (2)$$

где k – номер канала экспериментального спектра, а a и b – постоянные величины для данного спектрометра и условий детектирования. Эти постоянные обычно определяют экспериментальным путем, измеряя спектры двух источников с известной энергией. Зная значения постоянных a и b можно найти соответствующие энергии α -частиц и, тем самым, установить ядра, формирующие α -спектр радия по экспериментальным значениям каналов пиков.

Для регистрации α -излучения используется спектрометр, описанный в «Краткие сведения по ядерной физике...». Управление и накопление данных на спектрометре осуществляется с помощью компьютера. Перед началом измерения необходимо на панели спектрометра установить его рабочие параметры: ДНУ – « дискриминации нижний уровень», позволяющий отсеять все шумовые импульсы спектрометра; ДВУ – «дискриминации верхний уровень», обычно 1023, т.е. вся шкала спектрометра; коэффициент усиления; напряжение питания на ФЭУ (для используемого ФЭУ напряжение, как правило, от 500 до 800 В), время измерения спектра. После установки всех параметров спектрометр включается, нажимая клавишу «Старт» и начинается набор спектра.

Процесс установления рабочих параметров и непосредственно набор спектра радиоактивного изотопа $^{226}_{88}\text{Ra}$ можно визуально наблюдать, запустив видео файл с расширением «avi», приложенный к лабораторной работе. На панели спектрометра: ось абсцисс — каналы спектрометра, соответствующие энергетическим интервалам, ось ординат — число частиц, имеющих энергию в интервале, соответствующем каналу спектрометра (см. подробнее в «Краткие сведения по ядерной физике...»).

Порядок выполнения лабораторной работы.

Лабораторная работа выполняется с помощью программы Microsoft Excel Windows или любой другой программы, позволяющей проводить простейшие вычисления и рисовать графики (гистограммы).

1. Загрузит текстовые файлы, содержащие экспериментальные спектры, необходимые для выполнения данной лабораторной работы, в свою рабочую папку.

2. Открыть в Microsoft Excel текстовый файл «Фон» содержащий спектр фоновых импульсов. Порядок открытия: «Данные» → «Из текста» → «Готово». Способ открытия файлов может отличаться от предлагаемого, но важно, чтобы данные конкретного спектра были представлены в виде столбца.

3. Для визуального анализа спектров построить гистограммы распределения импульсов по каналам спектрометра (спектры) америция и плутония. Для этого выделить два столбца, содержащих информацию о спектрах, нажать клавишу «Вставка» - «График» и выбрать верхний левый из предлагаемых графиков. На графике будут показаны все данные, содержащиеся в выделенной области. Сравнить полученный график с рисунком 3.

4. Определить визуально каналы, соответствующие максимальному числу импульсов в канале для обоих спектров. Затем проверить правильность выбора каналов, непосредственно просматривая содержание файлов. Например, обозначим найденные каналы «kAm» и «kPu». Максимумы спектра соответствуют энергиям α -частиц соответствующих элементов: для америция $E(^{241}_{94}\text{Am}) = 5,45$ МэВ, а для плутония — $E(^{239}_{92}\text{Pu}) = 5,14$ МэВ.

5. Вследствие линейной зависимости амплитуды импульса, формируемого детектором при регистрации частицы, и энергии частицы (см. формулу (2)) для обоих элементов должны выполняться следующие соотношения:

$$\begin{cases} 5,14 = a \cdot k_{Pu} + b \\ 5,45 = a \cdot k_{Am} + b \end{cases}$$

Найти коэффициенты a и b , решая систему линейных уравнений:

$$\begin{cases} a = \frac{5,45 - 5,14}{k_{Am} - k_{Pu}}, \\ b = 5,45 - k_{Am} \cdot \left(\frac{5,45 - 5,14}{k_{Am} - k_{Pu}} \right) \end{cases}$$

6. Открыть в Excel Microsoft Windows текстовый файл «SRa», содержащий спектр α -частиц радия ($^{226}_{88}\text{Ra}$).

7. Построить гистограмму распределения импульсов по каналам спектрометра (спектр радия) на отдельном графике. Для этого выделить столбец, содержащих информацию о спектре радия, нажать клавишу «Вставка» - «График» и выбрать верхний левый из предлагаемых графиков. На графике будет показан спектр, содержащийся в выделенном столбце.

8. Определить визуально каналы, соответствующие максимальному числу импульсов в каналах спектра радия. У радия сложный спектр и таких каналов будет несколько в отличие от спектра америция и плутония, где наблюдается только один максимум. Затем проверить правильность выбора каналов, непосредственно просматривая содержание файла. Например, обозначим найденные каналы «1Ra», «2Ra» «3Ra» «4Ra».

9. Рассчитать энергии, соответствующие найденным каналам, используя уравнение (2) и найденные коэффициенты a и b .

10. Сравнить экспериментально полученные значения энергий с энергиями α -частиц из схемы распада радиоактивного ряда урана (см. Рис.1) и определить изотопы, распад которых формирует наблюдаемый спектр радия.

11. Проверить правильность полученных результатов и усвоение изученного в лабораторной работе материала, выполнив предлагаемый тест (см. Тест к работе 5).

Тест к работе №5.

1. Экспериментальный спектр радия содержит пики, соответствующие α -частицам с энергиями (перечисление идет от меньших энергий к большим):

- 4,18 МэВ; 4,78 МэВ+5,3 МэВ; 6,1 МэВ; 7,88 МэВ
- 4,78 МэВ; 5,3 МэВ+ 5,59 МэВ; 6,1 МэВ; 7,88 МэВ;
- 3,26 МэВ; 4,78 МэВ+5,3 МэВ; 5,59 МэВ, 6,1 МэВ.

2. Элементы радиоактивного ряда, формирующие спектр радия:

- $^{238}_{92}\text{U}$; $^{226}_{88}\text{Ra}$ + $^{210}_{84}\text{Po}$; $^{218}_{84}\text{Po}$; $^{214}_{84}\text{Po}$;
- $^{226}_{88}\text{Ra}$; $^{210}_{84}\text{Po}$ + $^{222}_{86}\text{Rn}$; $^{218}_{84}\text{Po}$; $^{214}_{84}\text{Po}$;
- $^{214}_{83}\text{Bi}$; $^{226}_{88}\text{Ra}$ + $^{210}_{84}\text{Po}$; $^{222}_{86}\text{Rn}$; $^{218}_{84}\text{Po}$.

3. Сколько может быть радиоактивных рядов?

- 1;
- 2;
- 3;
- 4.

4. Как должны соотноситься периоды полураспада между элементами в радиоактивном ряде, чтобы установилось равновесие?

Периоды полураспада для всех элементов должны быть величинами одного порядка;

Начальный элемент должен иметь период полураспада намного больший, чем остальные;

Начальный элемент должен иметь период полураспада намного меньший, чем остальные;

Периоды полураспада для всех элементов должны быть одинаковы;

5. Какой вид радиоактивного распада определяет число радиоактивных рядов?

α -распад;

β -распад;

γ -распад;

спонтанное деление ядер.

6. Для каких ядер возможен α -распад?

Для легких ядер;

Для любого ядра;

Для тяжелых ядер, начиная с висмута;

Только для трансурановых элементов.

7. Какая зависимость имеет место между номером канала амплитудного распределения, соответствующего максимальному количеству импульсов, и энергией α -частицы?

Нет никакой зависимости;

Линейная зависимость;

Квадратичная зависимость;

Нелинейная зависимость сложной формы.