

В.И. Бойко, Ф.П. Кошелев

ЯДЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В РАЗЛИЧНЫХ СФЕРАХ ЧЕЛОВЕЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

*Рекомендовано советом УМО в качестве учебного пособия
для студентов, обучающихся по направлению 140300 «Ядерная физика
и технологии» по специальностям:*

*140305 «Ядерные реакторы и энергетические установки»,
140307 «Радиационная безопасность человека и окружающей среды»,
140309 «Безопасность и нераспространение ядерных материалов»,
140404 «Атомные электрические станции и установки»,
240601 «Химическая технология материалов современной энергетики»*

2-е издание

Издательство
Томского политехнического университета
2008

УДК 621.039(075.8)

ББК 31.4я73

Б72

Бойко В.И.

Б72 Ядерные технологии в различных сферах человеческой деятельности: учебное пособие / В.И. Бойко, Ф.П. Кошелев. – 2-е изд. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 341 с.
ISBN 5-98298-263-6

В учебном пособии систематизирован материал по истории создания ядерного оружия в США и СССР, описаны состояние и перспективы ядерной энергетики в мире и России, некоторые области применения энергии атома в настоящем и будущем, даны сравнительные характеристики различных источников энергии.

Пособие разработано в рамках реализации Инновационной образовательной программы ТПУ по направлению «Атомная энергетика, ядерный топливный цикл, безопасное обращение с радиоактивными отходами и отработанным ядерным топливом, обеспечение безопасности и противодействие терроризму» и предназначено для студентов, инженеров физико-технических специальностей и широкого круга читателей.

УДК 621.039(075.8)

ББК 31.4я73

Рекомендовано к печати Редакционно-издательским советом
Томского политехнического университета

Рецензенты

Доктор технических наук, ведущий научный сотрудник
НИИ онкологии ТНЦ СО РАМН

В.А. Лисин

Кандидат технических наук,
государственный инспектор Госатомнадзора г. Томска,
лауреат Государственной премии,

В.С. Балашков

ISBN 5-98298-263-6

© Бойко В.И., Кошелев Ф.П., 2006

© Томский политехнический университет, 2006

© Оформление. Издательство Томского
политехнического университета, 2006

*Ничего не нужно бояться в жизни – надо лишь понять неизвестное.
дважды Лауреат Нобелевской премии,
М. Складовская-Кюри.*

ВВЕДЕНИЕ

Среди величайших достижений XX века наряду с освоением космоса, генной и полупроводниковой технологиями открытие атомной энергии и овладение ею занимает особое место.

Человечество получило доступ к громадному и потенциально опасному источнику энергии, который нельзя ни закрыть, ни забыть о нем, – его нужно использовать не во вред, а на пользу человечеству.

У атомной энергии две “родовые” функции: военная, разрушительная и энергетическая – созидательная. По мере уничтожения устрашающих ядерных арсеналов, созданных в период холодной войны, атомная энергия будет проникать внутрь цивилизованного общества в виде тепла, электричества, медицинских изотопов, ядерных технологий, нашедших применение в промышленности, космосе, сельском хозяйстве, археологии, судебной медицине и т.д.

Прогресс, достигнутый в результате превращения атомной энергии в безопасное, чистое и действенное средство удовлетворения растущих глобальных энергетических потребностей, не возможен в том же масштабе с применением других технологий, использующих, например, энергию ветра, солнца и других “возобновляемых” источников энергии.

Однако бытующее в обществе представление об атомной энергии по-прежнему окутано мифами и страхами, которые абсолютно не соответствуют фактическому положению дел и в основном, опираются исключительно на чувства и эмоции. Это приводит, с одной стороны, к радиофобии (страх перед радиацией), а с другой – к безответственному поведению. Врачи-психологи считают, что радиофобия заразна, и умело ею манипулируя, можно нанести вред здоровью людей.

Без овладения широкими массами минимальной суммой знаний об ядерных технологиях, радиоактивности общество неизбежно будет сталкиваться с провокациями.

Сложилась парадоксальная ситуация, что в наш век – век профессионалов – в вопросах атомных технологий медику, юристу, политику и т.д. часто доверяют больше, чем профессионалу-атомщику.

Но мы лечимся у врача, а не у юриста; доверяем опытному летчику и наверняка не полетим, если за рулем будет медик; шьём костюмы у портного, а не у политика.

Одной из причин негативного отношения к атомной технике значительной части общества является то, что она возникла и развивается на базе уже сформировавшихся военно-ядерных комплексов и долгое время была окутана непроницаемым занавесом секретности.

В XXI веке истощение энергоресурсов уже не будет первым ограничивающим фактором. Главным становится фактор ограничения предела экологической емкости среды обитания.

Несмотря на то что радиация является одним из многих естественных факторов окружающей среды, лежащих в основе развития всего живого, она вызывает патологический страх при упоминании.

К тому же в последнее время радиация стала удобной причиной объяснения многих негативных явлений современного общества.

На слова «все болезни от радиации» можно списать недостатки экономики, здравоохранения, низкую культуру и мн. др.

Основатель международного зеленого движения английский профессор Д. Лавлок призывает своих соратников отказаться от “ошибочного противостояния” ядерной энергетике. Он прямо заявил: “У нас нет времени экспериментировать с призрачными источниками энергии, цивилизация в опасности, и нам нужно сейчас использовать ядерную энергию – единственный безопасный и доступный источник энергии, или страдать от боли, которую уже в скором времени нам причинит оскорбленная планета”.

Атомная отрасль России была заложена и создана в середине минувшего века в годы кровопролитнейшей войны и сразу после нее. В отрасли сконцентрированы героические усилия разоренной страны – подвиг лучших умов и патриотов нашей Родины.

Чернобыльская авария заставила людей на какое-то время отшатнуться в своем неприятии атомных проектов и технологий. Отшатнуться, переосмыслить сделанное, но не отказаться вовсе. Потому что нельзя отказаться от будущего, как нельзя остановить научно-технический прогресс.

Ядерная индустрия и работавшая на нее атомная наука перестают быть “вещью в себе”, государством в государстве, закрытом от посторонних глаз.

Сегодня задача ставится так: жизненно важные решения не должны приниматься без широкого обсуждения. И поскольку нельзя всерьез обсуждать то, о чем имеешь приблизительное представление, или хуже еще – вообще не имеешь, специалисты обязаны приложить максимум усилий.

Атомная отрасль и прогресс науки едины и обеспечивают безопасность России и являются гарантом ее будущих научно-технических достижений.

Учебное пособие составлено на основе обзора отечественных и зарубежных информационных источников. В нем рассмотрены история создания ядерного оружия в США и СССР, физические основы и типы ядерного оружия, сравнительные характеристики различных источников энергии, принципиальное устройство ядерного реактора и схема ядерного топливного цикла, состояние и перспективы ядерной энергетики в мире и России, динамика основных энерготехнологий до 2050 г. Рассказано об естественных и искусственных источниках радиации, с которыми человек сталкивается в повседневной жизни. Риск, связанный с ядерным топливным циклом, сопоставим с другими видами опасности, с которыми мы постоянно имеем дело в современном обществе. Проанализированы экологические и экономические проблемы энергообеспечения Сибири и Томского региона на основе строительства завода по производству МОКС-топлива и в дальнейшем двух энергоблоков АЭС. Представлены некоторые области применения энергии атома в настоящем и будущем: атомные подводные и надводные корабли, ядерно-двигательные установки в космосе, ядерные взрывы в мирных целях, ядерные технологии в промышленности, медицине, сельском хозяйстве и т.д. Учебное пособие содержит большой фактический материал в виде рисунков и таблиц, отражающих информацию по рассматриваемым вопросам. Предполагаемая информация позволит людям занимать более взвешенную и объективную позицию в оценке мер, принимаемых государственными органами с целью повышения благосостояния народа, обеспечения его экономического благополучия и усиления политической толерантности к России со стороны других государств.

Авторы выражают глубокую признательность Селиваниковой О.В. и Герасим О.М. за помощь при оформлении рукописи и заранее признательны всем читателям, которые пришлют свои замечания и пожелания по данному пособию.

Глава 1. ЯДЕРНОЕ ОРУЖИЕ

1.1. История создания ядерного оружия в США и СССР

Юлий Борисович Харитон, выдающийся российский физик-ядерщик, писал: “Оглядываясь в прошлое, мы понимаем: среди начальных импульсов для американского и советского атомных проектов было и опасение, что фашистская Германия, обладающая перед войной наиболее передовыми и совершенными технологиями и первоклассной наукой, способна опередить всех в создании атомного оружия. Заявление Гитлера об оружии возмездия звучало зловеще.

На рубеже сороковых-пятидесятых годов физики-ядерщики, среди которых и блестящая плеяда советских физиков во главе с И.В.Курчатовым, сделали нечто большее и непреходящее – они открыли цивилизации дверь в новую эпоху. В этой эпохе атомная энергия определяет не только технологический уровень общества, но и влияет на культуру, политику и будущее. Значит, влияет на историю”.

Открытие внутриядерной энергии в XX веке привело к созданию страшного оружия уничтожения, которое дало толчок невиданной до тех пор гонке вооружений.

В 1934 году итальянский физик Энрико Ферми проводил ряд опытов по поглощению нейтронов разными элементами, в том числе ураном. Облучение урана давало радиоактивные ядра с различными периодами полураспада. Ферми предположил, что эти ядра принадлежат трансурановым элементам, т.е. элементам с атомным номером выше 92.

В том же 1934 г. немецкий химик Ида Нодак подвергла критике предполагаемое открытие трансуранового элемента и высказала предположение о том, что под действием бомбардировки нейтронами ядра урана распадаются на ядра элементов с меньшими атомными номерами.

В 1939 г. в Германии была опубликована статья Гана и Штрассмана, доказывающая деление урана.

В 1939 г. Фриш и Лиза Мейнтер, работающие в лаборатории Нильса Бора, и Фредерик Жолио-Кюри в Париже опубликовали первые результаты своих работ по делению урана.

В это же время Жолио-Кюри, Фриш, Ферми экспериментально доказали взрывной характер расщепления ядер.

Вопросы, связанные с делением урана, волновали и советских ученых. С самого начала эту так называемую урановую проблему возглавил И. В. Курчатов.

В 1939–1940 г.г. сотрудники Института химической физики Ю. Харитон и Я. Зельдович первыми в мире предложили расчет цепной ядерной реакции деления.

В этот же период ученые ЛФТИ К. Петржак и Г. Флеров обнаружили спонтанное деление ядер урана.

У большинства ученых-физиков уже не оставалось сомнения относительно возможности создания оружия большой разрушительной силы.

В конце 30-х годов в США оказалось немало ученых атомщиков, бежавших от преследований фашистов.

Среди ученых, оказавшихся в США, было несколько нобелевских лауреатов: Эйнштейн, Бор, Юнг, Ферми, Чэдви́г, Комптон, а также Сегре, Сциллард, Вигнер, Теллер, Вайскопф, Хаутерман, Кисберри и др.

В 1939 году ученые во главе с А. Эйнштейном написали письмо президенту Рузвельту с просьбой ускорить атомные исследования, чтобы опередить нацистов в изготовлении атомной бомбы.

6 декабря 1941 г. Белый дом принял решение ассигновать крупные средства на создание атомной бомбы. Сам проект носил кодовое название “Манхэттенского проекта”. Руководителем проекта был назначен бригадный генерал Л. Гровс. Научную лабораторию возглавил Р. Оппенгеймер, который и считается “отцом атомной бомбы”. Проект был тщательно засекречен. Как указал сам Гровс, из 130 тысяч человек, занятых в осуществлении атомного проекта, только около нескольких десятков знали проект в целом. Ученые работали в обстановке слезки и строгой изоляции. Дело доходило буквально до курьезов: физик Г. Смит, возглавлявший одновременно два отдела, для разговора с самим собой должен был получать разрешение у Гровса.

Для создания бомбы был нужен уран-235 – редкий изотоп урана, содержащийся в природном уране в количестве 0,7 процента. Этот изотоп легко делится, чего лишен составляющий основную массу урана изотоп с атомным весом 238.

Критические массы урана-235 составляют около 48 кг, для плутония-239 – 17 кг, для урана-233 – 16 кг.

Следует отметить, что в то время один грамм урана-235 стоил один миллион долларов. “Манхэттенский проект” обошелся США в 25 млрд долларов.

В настоящее время 1 кг природного урана стоит примерно 100–300 \$, 1 г урана – 235 ~ 25 \$, 1 г плутония ~ 15 \$.

На создание ядерного оружия США за период 1941–1996 гг. истратило 5500 млрд \$.

Создание самого ЯО – 410 млрд \$ (7 %);

Разработка систем доставки и развертывания ЯО – 3320 млрд \$ (55 %).

Обеспечение секретности и безопасности – 937 млрд \$ (17 %).

Одна из основных проблем – разработка промышленного способа получения урана-235 за счет использования ничтожного различия в физико-химических свойствах изотопов урана.

Вторая проблема – экспериментально доказать возможность превращения урана-238 в новый, легко делящийся элемент – плутоний, который мог быть отделен от исходного урана химическим способом. Такое доказательство было получено 2 декабря 1942 г., когда заработал первый реактор Ферми. Реактор был сооружен под западной трибуной стадиона Чикагского университета (центр многонаселенного района). Комптон, директор университета, передал ставшее теперь знаменитым шифрованное сообщение: “Итальянский мореплаватель высадился в Новом Свете. Туземцы настроены дружелюбно”.

“Манхэттенский проект” включал три центра:

1. Ханфордский комплекс, включал 9 производственных реакторов для получения плутония. Характерными являются очень короткие сроки строительства – 1,5–2 года. Первый промышленный реактор “В” по производству оружейного плутония в настоящее время превращен в музей.

2. ОК-Ридж-заводы, где ничтожные количества урана-235 отделялись от основного изотопа – урана-238, использовались электромагнитный и газодиффузионный методы разделения.

3. Научная лаборатория в Лос-Аламосе, где разрабатывались теоретически и практически конструкция атомной бомбы и технологический процесс ее изготовления.

Один из главных теоретических вопросов, которые необходимо было решить, – время протекания ядерной реакции при осуществлении взрыва.

При медленном сближении критических масс ядерного взрыва не произойдет, а получится нейтронная вспышка, хлопок с разбросом ядерного материала. За время порядка 10^{-6} – 10^{-8} с необходимо обеспечить такие условия, при которых в реакцию вступит как можно больше делящегося материала.

Наиболее простая конструкция для создания критической массы – использование “ствольного” метода. По этому методу одна подкритическая масса делящегося материала направлялась как снаряд в направлении другой подкритической массы, играющей роль мишени, и это создавало мгновенно сверхкритическую массу, которая должна взорваться. Такой принцип был использован в конструкции бомбы “Малыш”, сброшенной на Хиросиму.

Интересно отметить, что первые эксперименты в СССР проводились в пушке из Порт-Артура, которую привезли из Новосибирска, где

она валялась на хоздворе одного из оборонных предприятий. Оказалось, что ствол этой пушки – лучший научный прибор и равного ему металлурги не могут сделать до сих пор.

Одновременно в Арзамасе-16 появились и новые артиллерийские стволы.

Вторая конструкция атомной бомбы была основана на использовании явления сходящегося внутрь взрыва (имплозии). В этом случае поток газов от взрыва обычного взрывчатого вещества направляется на расположенный внутри делящийся материал и сжимает его до тех пор, пока он не достигнет критической массы. По этому принципу была создана бомба “Толстяк”, сброшенная на Нагасаки.

В августе 1943 г. Ф. Рузвельт и У. Черчилль принимают решение об интенсификации всех работ по созданию ядерного оружия и о запрете на передачу информации о ядерном оружии третьим странам, и в январе 1944 г. в Лос-Аламос прибыла из Великобритании группа из 28 ученых; несколько позже в Лос-Аламос прибыл Н. Бор.

С мая 1945 г. в Лос-Аламосе работает назначенный Г. Трумэном Целевой комитет по практической реализации Манхэттенского проекта: тротильный эквивалент урановой бомбы оценен в 5–15 тысяч тонн, плутониевой – в 20 тыс. т, в качестве объекта бомбардировки предварительно выбраны 4 больших города Японии: Киото, Хиросима, Кокура, Нагасаки.

Импозиционная схема допускает применение как урана, так и плутония (для “ствольного” метода плутоний-239 непригоден) и в сравнении со “ствольной” более совершенна.

Так как величина критической массы обратно пропорциональна квадрату его плотности, то появляется возможность существенно уменьшить количество делящегося материала. Так критическая масса урана-235 при удвоении плотности составляет уже примерно 7,5 кг и 3,3 кг – при утроенной. А если сжимать дальше, то не открывается ли здесь возможность изготовить бомбу на основе лишь нескольких граммов плутония, взрывное энерговыделение при полном делении всего 1 г плутония-239 эквивалентно 10 т тротила.

Возможно ли это на сегодняшний день?

Добиться таких степеней сжатия с помощью химических взрывчатых веществ невозможно из энергетических соображений!

Огромных скоростей сжатия достаточно малых масс веществ можно достигнуть с помощью излучения мощного лазера.

По оценке академика РАИ Л. Феоктистова для осуществления взрывной цепной реакции потребуется не менее 10 г плутония при мощности лазеров, которых в мире еще нет. Такое устройство вместе с

малогабаритной бомбой требует, как минимум, грузовик с лазерной аппаратурой плюс передвижную электростанцию приличной мощности [12, 18].

Первое испытание атомной бомбы было произведено в 5 часов 30 минут 16 июля 1945 года в штате Аломогардо (бомба ствольного типа на плутонии).

Второй взрыв был произведен в Хиросиме. Бомба ствольного типа с урановым зарядом была доставлена к берегам Японии, на крейсере “Индианаполис”. Интересно отметить, что на обратном пути с 900 членами экипажа крейсер был потоплен японской подводной лодкой.

Следует подчеркнуть, что взрыв бомбы с ураном ни разу еще не был осуществлен. 6 августа 1945 г. бомбардировщиком Б-29, носившем имя “Энола Гэй”, которым управлял полковник Тиббетс, была сброшена бомба на Хиросиму (12–7–20 кТ). Зона разрушений простиралась на 1,6 км от эпицентра и охватывала площадь 4,5 кв. км, 50 % зданий в городе было полностью разрушено. По оценке японских властей число убитых и пропавших без вести составило около 90 тысяч человек, число раненых 68 тысяч.

9 августа 1945 г. незадолго до рассвета самолет-доставщик (вел самолет майор Чарльз Суини) и сопровождающие его два самолета поднялись с бомбой “Толстяком”. Город Нагасаки был разрушен на 44 %, что объяснялось горным рельефом местности.

Мир узнал о создании оружия громадной разрушительной силы.

Война, конечно, наложила свой отпечаток на развитие атомной проблемы в СССР.

После нападения Германии 22 июня 1941 г. советские ученые, как и все советское общество, направили свою энергию на решение неотложных проблем войны. В результате исследование деления ядер фактически было приостановлено до конца года. Институты, лаборатории и ученые эвакуировались на восток, поскольку борьба за победу требовала приоритета. Многие ученые-ядерщики были заняты другими задачами. Например, Курчатов работал над методикой размагничивания, чтобы защитить корабли от магнитных мин до апреля 1942 г., а затем руководил лабораторией брони в Физико-техническом институте.

В ответ на немецкое вторжение 30 июня 1941 г. был создан Государственный комитет обороны (ГКО), во главе со И. Сталиным и его заместителем В. Молотовым. Членами комитета были также Л. Берия, Г. Маленков и маршал К. Ворошилов. Задачей ГКО стала мобилизация всех ресурсов Советского Союза, для того чтобы вести войну и выиграть ее. 10 июля был образован Научно-технический совет, председателем которого стал С. Кафтанов.

В первые месяцы 1942 г. возможность создания атомной бомбы начала становиться более серьезным вопросом для советского руководства в результате получения свежей информации о работах по бомбе в Англии, Америке и Германии. Сначала И. Сталин относился со скептицизмом к информации, которую собрал Л. Берия – глава советской секретной службы, и второй наиболее могущественный человек в Советском Союзе. Когда Л. Берия обсуждал атомную бомбу со И. Сталиным в конце 1941 г., И. Сталин предположил, что сообщения были “пропагандой” и что мы не собираемся разрабатывать этот тип супербомбы, но будем следить за ней. Но по мере того как по разведывательным каналам росло число фактов о зарубежном прогрессе по атомному оружию, это дополнялось информацией и давлением со стороны советских ученых.

В начале 1942 г. Г. Флеров, который служил в Воронеже в чине лейтенанта ВВС, обнаружил в университетской библиотеке, что статьи по делению ядер перестали публиковаться в западных журналах, и это подсказало ему о наличии секретных работ по атомной бомбе. На этот раз Г. Флеров написал С. Кафтанову, сообщив ему о своих тревогах. Ответа не поступило. В апреле он написал И. Сталину, сказав, что “мы должны создать атомную бомбу без промедления”.

Когда начал поступать материал от зарубежной разведки, Л. Берия в марте 1942 г. направил докладную записку на пяти страницах И. Сталину и в ГКО, рекомендуя определить его важность.

Произошло другое подозрительное событие, указавшее на возможный интерес немцев к бомбе. В апреле 1942 г. полковник НКВД И. Старинов посетил С. Балезина – первого помощника Кафтанова.

И. Старинов принес записную книжку, взятую у немецкого офицера и содержащую список материалов, которые требуются для бомбы.

Эти события привлекли, наконец, внимание С. Кафтанова, и он вместе с А. Иоффе направил короткое письмо в ГКО с рекомендацией о создании исследовательского центра. В течение лета и осени с учеными консультировались относительно перспектив атомной энергии, но им не показывали разведывательные данные, собранные за рубежом. А. Иоффе получил предложение возглавить исследования. Он отказался и предложил либо И. Курчатова, либо А. Алиханова. Оба приехали в Москву и встретились с С. Кафтановым и С. Балезиным 22 октября 1942 г. Те рекомендовали И. Курчатова и попросили его составить список лиц, которых он хотел бы иметь в своей группе. И. Курчатов встретился с некоторыми из этих ученых в ноябре и затем вернулся в Казань. И. Курчатов снова, приехал в Москву 9 января 1943 г. и встретился с М. Первухиным, И. Кикоиным и А. Алихановым. М. Первухин попросил И. Курчатова написать памятную записку о том, как он организовал бы програм-

му атомных исследований. И. Курчатов быстро сделал это. Записка была передана В. Молотову, на которого ученый произвел сильное впечатление во время встречи в январе. Академия наук 12 апреля приняла решение об организации Лаборатории № 2. Сначала она располагалась в помещении Сейсмологического института в Пыжевском переулке. В конце концов была найдена площадка в районе Покровского-Стрешнева в северо-западной части Москвы и в апреле 1944 г. лаборатория переехала туда. При своем назначении И. Курчатов не был членом Академии наук, что уменьшало его влияние среди занимавших более высокое положение физиков.

На уровне Политбюро В. Молотов, бывший в то время наркомом иностранных дел и заместителем председателя ГКО, был назначен ответственным за программу бомбы. Выбор В. Молотова на контролирующую роль необъясним, хотя у него были другие связи с оборонной промышленностью, например, управление критической программой производства танков в роли имеющего высокое положение члена ГКО. (Многие сотрудники танковой промышленности впоследствии были вовлечены в программу атомного оружия.)

Как и во многих других делах в сталинском Советском Союзе, в программе бомбы первостепенную роль играла секретная служба под руководством Л. Берии. Народный комиссариат внутренних дел (НКВД) разделился 14 апреля 1943 г. на НКВД и НКГБ (народный комиссариат государственной безопасности). Берия был во главе НКВД, а бывший у него в доверии В. Меркулов стал руководить НКГБ. Как говорит А. Сахаров, в начале 1943 г. по приказу Л. Берии Н. Павлов был назначен представителем ЦК и СМ в Лаборатории № 2 в Москве. Н. Павлову пришлось стать важным чиновником Первого главного управления. Он отвечал за надзор за программой ядерного оружия и быстро продвинулся по службе, став незаурядным администратором.

Где-то после 2 февраля 1943 г. И. Курчатову начали показывать доклады иностранной разведки, приходившие уже пятнадцать месяцев с сентября 1941 г. Из записки на 14 страницах, которую он написал 7 марта М. Первухину, что он считает материал “исключительно важным и бесценным для нашей страны и науки”. И. Курчатов немедленно увидел серьезность, с которой англичане вели свои исследования. И. Курчатов увидел также, как их программа могла бы стать ориентиром для советских исследований, позволяя избежать трудоемких этапов в решении проблемы. Он закончил предложением изучить три области исследований: выделение изотопа U-235 путем диффузии; получение цепной реакции в экспериментальном реакторе на естественном уране; изучение свойств плутония.

Во второй памятной записке М. Первухину 22 марта И. Курчатов продолжает обсуждение двух стоявших перед ним проблем: создание реактора и свойства плутония. Заинтригованный возможностью, что плутоний мог бы стать решением (и что можно было бы избежать трудной проблемы разделения изотопов урана), И. Курчатов требует, чтобы органы разведки узнали все, что сделано в лабораториях и университетах США.

Стоявшие перед И. Курчатовым исследовательские задачи были невероятно трудными, но на этом предварительном этапе планы состояли в том, чтобы создавать скорее экспериментальные прототипы, нежели полномасштабные установки, которые понадобились бы позже. Прежде всего И. Курчатову было нужно набрать команду ученых и инженеров в штат своей лаборатории. Перед тем как выбрать их, он навестил многих своих коллег в ноябре 1942 г. Набор продолжался весь 1943 г.

Один из важнейших приоритетов был отдан получению достаточного количества урана для экспериментального реактора, или “котла”. Могло понадобиться 50 или 100 тонн. Поиски урана начались в 1940 г. в рамках Урановой комиссии и получили дополнительный импульс в 1942 г. по настоянию и при участии академика В. Вернадского и других советских геологов. Небольшие работы по добыче урана начались на старых урановых рудниках в Ферганской долине и вблизи Ленинабада в Таджикской ССР, но в конце 1944 г. И. Курчатов написал Л. Берии жалобу на некомпетентность В. Молотова и сообщил об отчаянной необходимости в уране. И. Курчатов отметил, что за период более года еще не были завершены геологические изыскания ленинабадского месторождения. Начиная с 1945 г. Девятое управление НКВД, помогая Министерству цветной металлургии, начало широкую программу разведки для нахождения дополнительных источников урана в СССР. В 1945 г. была направлена в Германию комиссия под руководством А. Завенягина для поиска урана, и она вернулась примерно со 100 тоннами.

Пришлось также решать, какой из способов разделения изотопов окажется наилучшим. И. Курчатов разбил задачу на три части: А. Александров исследовал метод термодиффузии; И. Кикоин руководил методом газовой диффузии, а Л. Арцимович изучал электромагнитный процесс.

Столь же важным было решение о том, какой тип реактора следует создавать. В Лаборатории № 2 рассматривались три типа реакторов: на тяжелой воде, с графитовым замедлителем и газовым охлаждением, с графитовым замедлителем и водяным охлаждением. И. Курчатов непосредственно руководил исследованиями атомного котла с графитовым

замедлителем. А. Алиханов исследовал создание котла с использованием тяжелой воды в качестве замедлителя.

Если плутониевая бомба была тем путем, который можно было бы выбрать, надо было начать изучать его свойства как можно быстрее. В 1945 г. И. Курчатов получил первые нанограммные количества путем облучения в течение трех месяцев мишени из шестифтористого урана нейтронами от радий-бериллиевого источника. Практически в то же самое время Радиевый институт им. Хлопина начал радиохимический анализ субмикrogramмных количеств плутония, полученных на циклотроне, который был возвращен из эвакуации в годы войны и восстановлен. “Весомые” (микrogramмные) количества плутония появились в распоряжении немного позже от более мощного циклотрона в Лаборатории № 2.

Особый интерес представляла реальная конструкция бомбы. После ряда убеждений И. Курчатов добился, чтобы Ю. Харитон работал над конструкцией бомбы.

Если подвести итоги, то советская программа бомбы в основном оставалась маломасштабной в период с июля 1940 г. по июль 1945 г. Первая фаза от создания Урановой комиссии в Академии наук в июле 1940 г. до немецкого вторжения в июне 1941 г. продемонстрировала ограниченные возможности изучения атомной энергии. С началом войны даже эти небольшие усилия исчезли. В течение следующих восемнадцати месяцев – самых трудных военных дней для Советского Союза – несколько ученых продолжали вести агитацию за программу. Кроме того, некоторые тревожные разведывательные сообщения о западных усилиях заставили правительственных чиновников организовать в феврале 1943 г. небольшие исследовательские усилия. Эта фаза была еще совсем слабой и длилась до августа 1945 г., когда все резко изменилось.

Ко времени Потсдамской конференции, которая началась 17 июля 1945 г. на следующий день после испытания “Тринити”, Советский Союз вел серьезный, хотя и небольшой, проект атомной бомбы. Президент Г. Трумен 24 июля мимоходом упомянул И. Сталину после одного из заседаний, что Соединённые Штаты имеют “новое оружие с необычной разрушительной силой”. И. Сталин сказал Г. Трумену, он надеется, что Соединенные Штаты найдут “хорошее применение для него против японцев”.

Курчатовская группа в Лаборатории № 2 узнала об успешном испытании первой американской атомной бомбы в июле 1945 г., но это еще не перевело программу на полные обороты.

Полная степень воздействия в конце концов начала проявляться перед И. Сталиным в августе 1945 г., когда Соединенные Штаты сбросили

сили две атомные бомбы на японские города Хиросиму и Нагасаки. Нет сообщений о немедленной реакции И. Сталина или о том, как он смог внезапно понять, насколько недостаточными были его прежние усилия. 18 августа И. Сталин вызвал в Кремль наркома вооружения Б. Ванникова и его заместителей. Там они встретились с И. Курчатовым. “Одна лишь просьба к вам, товарищи, – сказал И. Сталин. Дайте нам атомное оружие как можно скорее. Вы знаете, что Хиросима потрясла весь мир. Нарушен баланс сил. Дайте бомбу – это избавит, нас от большой опасности”.

Казалось, что все четырехлетние военные усилия пошли прахом от одного удара, а скоротечное чувство победы находится в опасности, поскольку в мировой политике проявился новый крупный фактор. Была нужна срочная программа, чтобы покончить, с нетерпимой ситуацией, когда только Соединенные Штаты имели бомбу.

Двадцатого августа 1945 г. ГКО принял постановление № 9887 об организации Специального комитета (Спецкома) для решения ядерной проблемы. Спецкомом руководил Л. Берия. Роль Берии в программе окажется критической. Благодаря контролю над ГУЛАГом Л. Берия обеспечил неограниченное количество рабочей силы заключенных для крупномасштабного сооружения площадок комплекса. Среди других восьми членов Специального комитета были М. Первухин, Г. Маленков, В. Махнев, П. Капица, И. Курчатов, Н. Вознесенский (председатель Госплана), Б. Ванников и А. Завенягин. В состав Специального комитета входили Технический совет, организованный 27 августа 1945 г., и Инженерно-технический совет, организованный 10 декабря 1945 г.

Руководство атомной программой и ее координацию осуществляло новое межведомственное, “полу – министерство”, называемое Первым главным управлением (ПГУ) Совета Министров СССР, которое было организовано 29 августа 1945 г. и которым руководил бывший министр вооружений Б. Ванников, в свою очередь, находившийся под контролем Л. Берии. ПГУ будет руководить программой от бомбы с 1945 г. до 1953 г. По постановлению Совета Министров от 9 апреля 1946 г. ПГУ получила права, сравнимые с правами Министерства обороны по получению материалов и координации межведомственной деятельности. Были назначены семь заместителей Б. Ванникова, в том числе А. Завенягин, П. Антропов, Е. Славский, Н. Борисов, В. Емельянов и А. Комаровский. В конце 1947 г. М. Первухин был назначен Первым заместителем руководителя ПГУ, а в 1949 г. на эту должность назначили Е. Славского. В апреле 1946 г. Инженерно-технический совет Спецкома был преобразован в Научно-технический совет (НТС) Первого главного

управления. НТС сыграл важную роль в обеспечении научной экспертизы; в 40-х гг. им руководили Б. Ванников, М. Первухин и И. Курчатов.

На уровне Политбюро окончательный контроль за ядерной программой оставался за Л. Берией, а ПГУ отчитывалось непосредственно перед Политбюро. Главным помощником Л. Берии в надзоре за программой был генерал-полковник НКВД А. Завенягин, который одновременно служил заместителем у Л. Берии и Б. Ванникова и официально имел звание главного представителя Совета министров СССР. По образованию А. Завенягин был металлургом и его роль в советской программе была в чем-то аналогична роли генерала Лесли Гровса в американском проекте “Манхеттен”. А. Сахаров называет его “жестким, решительным, чрезвычайно инициативным начальником... человеком большого ума”.

Е. Славский, которому пришлось позднее руководить советской ядерной программой на уровне министра с 1957 г. по 1986 г., был введен в программу для контроля за производством исключительно чистого графита, который требовался для экспериментов И. Курчатова с ядерным котлом. Е. Славский был однокурсником А. Завенягина по горной академии и в то время являлся заместителем руководителя магниевой, алюминиевой и электронной промышленности. В итоге Е. Славский был поставлен на руководство теми сторонами начальной программы бомбы, которые были связаны с извлечением металла из руды и его обработкой.

Е. Славский был суперсекретным человеком, и мало кто знает, что у него три звезды Героя и десять орденов Ленина.

Аварии случались часто, особенно в первое время. И всегда Е. Славский первым шел в опасную зону. Много позже врачи попытались определить сколько именно он “набрал рентген”. Называли цифру порядка полутора тысяч, т.е. три смертельные дозы. Но он выдержал и прожил до 93 лет.

П. Антропов – геолог, металлург и заместитель члена ГКО во время войны стал заместителем Б. Ванникова, ответственным за поиск и добычу урана.

К лету 1945 г. у И. Курчатова была достаточная уверенность в том, какими путями следует двигаться, и он начал проектировать первый “промышленный” реактор, то есть первый крупный реактор для производства плутония. Реакторную площадку сначала называли плутониевым комбинатом (затем комбинатом “Маяк” и химическим комбинатом “Маяк”).

К концу 1946 г. в лаборатории № 2 (Москва) под руководством И. Курчатова и Е. Фурсова близилась к завершению работа над котлом с

графитовым замедлителем, который окрестили “кипятильником”, но он официально назывался Ф-1. В первый раз котел начал работать 25 декабря 1946 г.

Кроме того, в течение 1946 г. в Лаборатории № 2 был создан экспериментальный радиохимический цех. Затем его назвали предприятием № 5 (в составе НИИ – 9). Были проведены испытания для выделения плутония на основе процедур, созданных в Радиевом институте и с использованием заготовок, облученных в реакторе Ф-1.

Для получения плутония и изготовления деталей из него на Южном Урале в 1946 году развернулось строительство трех крупнейших объектов: первого промышленного ядерного реактора, радиохимического завода для выделения плутония и специального завода, конечной продукцией которого были детали для атомной бомбы.

Первый реактор производил 100 условных единиц, т.е. 100 г плутония в сутки, новый реактор – 300 г в сутки, но для этого требовалось загружать до 250 т урана.

Как теперь хорошо известно, для конструкции первой советской атомной бомбы были использованы попавшие к нам благодаря Клаусу Фуксу и разведке достаточно подробная схема и описание первой испытанной американской атомной бомбы. Эти материалы оказались в распоряжении наших ученых во второй половине 1945 года. Когда специалистами Арзамаса-16 было выявлено, что информация достоверная (а это потребовало выполнения большого объема тщательных экспериментальных исследований и расчетов), было принято решение для первого взрыва воспользоваться уже проверенной, работоспособной американской схемой.

Учитывая государственные интересы в условиях накаленных отношений между СССР и США в тот период, а также ответственность ученых за успех первого испытания, любое другое решение было бы недопустимым и просто легкомысленным. Приняв решение реализовать для первого взрыва американскую схему, советские ученые временно притормозили разработку своей оригинальной и более эффективной конструкции. Тем не менее, ее экспериментальная отработка была начата уже весной 1948 года, а в 1949 году Л. Альтшулером, Е. Забабахиным, Я. Зельдовичем и К. Крупниковым вариант нашего ядерного заряда был уже обоснован экспериментально и расчетно. Этот заряд был успешно испытан в 1951 году, и его взрыв представлял собой второе испытание атомного оружия в СССР [8].

В музее ядерного оружия в Арзамасе-16 хранятся макеты двух изделий с использованием американской и советской схемы. Наша бомба, будучи почти в два раза легче американской бомбы, была одновременно

в два раза мощнее ее. Существенно меньшим оказался и диаметр бомбы благодаря оригинальному инженерному решению по обеспечению имплосии.

Поэтому в становлении советского атомного проекта, не преувеличивая значение материалов разведки (хотя необходимо отдать должное ее усилиям и вкладу в успех общего дела), нужно отметить мощные стартовые позиции наших ученых, приступивших в разгар войны к решению атомной проблемы.

Полученная разведкой информация позволила на начальном этапе избежать тех трудностей и аварий, которые произошли в Лос-Аламосе в 1945 г. при сборке и определении критических масс плутониевых полусфер.

Так, поднося к сборке из плутония последний кубик отражателя, экспериментатор заметил по прибору, регистрировавшему нейтроны, что сборка близка к критической. Он отдернул руку, однако кубик упал на сборку, увеличив эффективность отражателя. Мгновенно произошла вспышка цепной реакции. Экспериментатор разрушил сборку руками. Он умер через 28 дней в результате переоблучения дозой 800 рентген. Всего к 1958 году в Лос-Аламосе произошло 8 ядерных аварий. Чрезвычайная засекреченность работ, отсутствие информации создавало благоприятную почву для различных фантазий.

Смысл аббревиатуры первых советских атомных и водородных зарядов, которую придумал один из помощников Л. Берии генерал Г. Махнев, РДС-1, РДС-2 – реактивный двигатель И. Сталина. На Западе наши ядерные заряды называли по имени И. Сталина – “Джо-1”, “Джо-2”.

Существует и такая версия: Л. Берия, будучи в восторге от успешного испытания, предложил И. Курчатову дать имя устройству. И. Курчатов ответил, что имя уже выбрано К. Щелкиным. Это было РДС-1 – первые буквы фразы “Россия делает сама”, что, возможно, является не совсем верным, поскольку сейчас мы знаем о первоначальном происхождении бомбы.

Даже в 1950 году на лекции по химии проректор Московского Государственного университета Г. Вовченко пояснял: “Водородная бомба – это когда землю заливают жидким водородом, все замораживая”.

Была и такая нелепая версия. Будто бы американцы сбросили, на Японию не две, а три атомные бомбы, одна из которых не только не взорвалась, но даже сохранилась. И будто бы эта третья бомба и была передана японцами Советскому Союзу.

Почва для различных домыслов появляется и тогда, когда правда замалчивается из-за политических установок и соображений, как, например, в случае Л. Берии.

Не подвергая сомнению оценку общеизвестных злодеяний этого страшного человека, необходимо отметить его организаторские способности. В начале общее руководство советским атомным проектом осуществлял В. Молотов. Стиль его руководства и, соответственно, результаты не отличались особой эффективностью. И. Курчатов не скрывал своей неудовлетворенности. С переходом атомного проекта в руки Л. Берии ситуация кардинально изменилась. Л. Берия быстро придал всем работам по проекту необходимый размах и динамизм. Этот человек, явившийся олицетворением зла, обладал одновременно огромной энергией и работоспособностью. Может быть, покажется парадоксальным, но Л. Берия, не стеснявшийся проявлять откровенное хамство, проявлял понимание и терпимость, если для выполнения работ требовался тот или иной специалист, не внушавший, однако, доверия работникам его аппарата. Когда Л. Альтшулера, не скрывавшего своих симпатий к генетике и антипатий к Г. Лысенко, служба безопасности решила удалить с объекта под предлогом неблагонадежности, Ю. Харитон напрямую позвонил Л. Берии и сказал, что этот сотрудник делает много полезного для работы. Берия спросил: “Он вам очень нужен?” Получив утвердительный ответ, повесил трубку. Инцидент был исчерпан. Среди ветеранов говорили, что при представлении к наградам Л. Берия будто бы распорядился исходить из простого принципа: тем, кому в случае неудачи был уготован расстрел, присваивать Героя; кому максимальное тюремное заключение – давать орден Ленина и так далее, по нисходящей.

Трудно сказать, соответствуют ли подобные разговоры истине.

Создание испытательного полигона и первое испытание

Требовалось место для испытания бомбы, как только она будет, изготовлена. Было принято специальное постановление (21 августа 1947 г.), где говорилось о создании площадки для испытания атомной бомбы. И. Курчатов выбрал изолированное место в 160 км к западу от города Семипалатинска в Казахстане и первое время его называли полигоном № 2 или просто “номером два”. В конце 1947 г. начали прибывать военные подразделения, чтобы строить сооружения для испытаний. Этот гарнизон получил название “Москва-400”, и он расположился на берегах Иртыша примерно в 60 км к востоку от центра полигона.

В центре полигона была построена металлическая башня высотой в 30 м для размещения ядерного устройства. На разных расстояниях от башни были воздвигнуты помещения для размещения приборов и фотооборудования, которые должны были вести регистрацию испытания. Поскольку испытание предназначалось также для изучения влияния взрыва на военное и гражданское оборудование, было подготовлено много экспериментов и построено много сооружений. В их число входили дватрех этажных здания на расстоянии 800 м от подножья башни, часть железной дороги с металлическим мостом и двумя вагонами на расстоянии 1000 м от башни, часть автомагистрали с железобетонным мостом и расположенными на ней грузовыми и легковыми автомашинами на расстоянии 1200 м от башни, электростанция с двумя дизельными генераторами на расстоянии 1500 м от башни; на расстоянии 200–300 м от башни был вырыт метротуннель глубиной 15–30 м. Множество военного оборудования было распределено на разных расстояниях, включая танки, артиллерию, надстройки кораблей и самолет. Два бомбардировщика Пе-2 были помещены на расстоянии 9 км от башни, причем один имитировал взлет, а другой – крутой поворот. На открытом воздухе были привязаны животные: собаки, свиньи, крысы, мыши и два верблюда. Завершение всего этого обширного строительства и подготовки заняло почти два года круглосуточной работы. К 10 августа 1949 г. все было готово.

Если вернуться в КБ-11 (Арзамас-16), то там подготовка велась всю первую половину 1949 г. В начале июня Государственная комиссия во главе с Б. Ванниковым приехала в КБ-11, чтобы определить, насколько далеко продвинулась работа. Она дала добро, и Ю. Харитон был назначен руководителем испытания, а К. Щелкин – его заместителем. Было закончено формирование рабочих групп и бригад, и в июле И. Курчатов одобрил окончательную конструкцию. Теперь мы знаем, что при первом испытании использовалось устройство, которое было почти полностью скопировано с американской конструкции, применявшейся в испытании “Тринити” в Нагасаки.

В начале августа четверью самолетами были переправлены детали самого устройства. В больших количествах начали прибывать научные и административные руководители из КБ-11 и Москвы. Несколько дней было потрачено на проверку оборудования и приборов, а затем были проведены три полномасштабные генеральные репетиции 14, 18 и 22 августа со временем взрыва в 7 часов утра. После трех успешных репетиций было решено провести испытание 29 августа в 7.00 утра (по местному времени).

В течение 26, 27 и 28 августа был проведен последний монтаж для подготовки устройства. Вечером 28 и ранним утром 29 августа Н. Духов, Ю. Харитон, В. Давиденко, Г. Алферов и другие собрали бомбу. Когда были выполнены почти все процедуры, устройство подняли на вершину башни. Там Г. Ломинский, Г. Флеров, В. Давиденко и К. Щелкин закончили последние соединения. Были соединены последние провода и последним, кто покинул башню в 5.40 утра, был К. Щелкин.

И. Курчатov, Ю. Харитон, К. Щелкин, М. Первухин, В. Болятко, Г. Флеров, Л. Берия и А. Завенягин собрались в Здании № 12 в двухкомнатном командном пункте на расстоянии 10 км от башни. Кроме того, было два наблюдательных поста: один в 15 км к югу от башни – для военных, – второй в 15 км к северу от башни – для ученых.

И. Курчатov дал команду к подрыву и А. Мальский стал вести обратный отсчет “минус 30 минут.... минус 15 минут..... 30 секунд.... 10 секунд.... пять, четыре, три, две, одна, ноль.” Прошло примерно 30 секунд до того, как страшный грохот, пронесся над командным пунктом. После того как утихла ударная волна, все вышли из здания, чтобы наблюдать за растущим грибообразным облаком и за разрушениями, которые вызвал взрыв мощностью в 20 килотонн. Менее чем через десять минут после взрыва один из танков, предназначенных для изучения радиационных эффектов, уже был в эпицентре, проводя измерения и собирая образцы почвы.

РДС-1 не был поставлен на вооружение. Как мы теперь знаем, это была в большей степени “политическая”, нежели военная бомба. Первая бомба, пущенная в производство, не ставилась на вооружение до 1953 г. Как заявил Ю. Харитон, эти бомбы советской конструкции более чем вдвое превышали по мощности первую конструкцию “американского типа” и были гораздо легче. Эти бомбы были основаны на двух испытаниях, проведенных 24 сентября и 18 октября 1951 г.

Интересно отметить, что когда Ю. Харитон стал научным руководителем “Арзамас – 16” появилась крылатая фраза: “Надо “перехаритонить” Оппенгеймера”. Так говорили в Арзамасе.

9 февраля 1946 г. в Большом театре И. Сталин произнес речь: “Я не сомневаюсь, что если мы окажем достойную помощь нашим ученым, они сумеют не только достигнуть, но и превзойти в ближайшее время достижения науки за пределами нашей страны”. Затраты на науку в 1946 году стали в 3 раза больше.

Стремление организовать проект советской водородной бомбы возникло в 1946 г. в виде короткого доклада правительству под названием “Использование ядерной энергии легких элементов”, авторами которого были И. Гуревич, Я. Зельдович, И. Померанчук, Ю. Харитон. 1

августа 1953 года впервые в мире советские физики испытали водородный заряд, готовый к применению в виде бомбы. Идея этого заряда была предложена А. Сахаровым. Правда, американские ученые первыми осуществили термоядерный взрыв

1 ноября 1952 г. Но этот эксперимент был только этапом к созданию водородной бомбы. Взорванное в США устройство представляло собой огромное нетранспортабельное 50-тонное наземное сооружение размером с двухэтажный дом. Ядерное горючее поддерживалось в нем в сконденсированном состоянии с помощью криогенной техники. Следует отметить, что водородная бомба была создана в СССР совершенно самостоятельно и не являлась продуктом деятельности советской разведки. В США также пришли к выводу, что Клаус Фукс не мог передать СССР секреты водородной бомбы, т.к. в период работы Фукса направление исследований американских физиков-ядерщиков в области термоядерного синтеза было ошибочным. Эффективность конструкции водородного заряда в основном определялась тем, какая степень сжатия термоядерного горючего обеспечивается в результате стартового взрыва атомного устройства. Мощность заряда, испытанного в 1953 г., примерно в 20 раз превосходила мощность атомной бомбы, сброшенной на Хиросиму и имевшей такие же габариты и вес. Схема этого заряда допускала создание водородной бомбы порядка мегатонны. Термоядерность заряда, т.е. вклад собственно термоядерных реакций в полную величину мощности, приближалась к 15–20 %. Некоторые американские специалисты склонны отождествлять наше испытание в 1953 г. со своими испытаниями типа “Джордж”, проведенными в США в 1951 г. Но подобные опыты, по замечанию другого американского физика Р. Джастрова, были “скорее игрой на публику, чем подлинным экспериментом...”. Использование здоровенной атомной бомбы для инициирования реакции в небольшом пузырьке с дейтерием и тритием напоминало применение доменной печи для поджигания спички.

В заряде 1953 г. уже использовалось перспективное термоядерное горючее, дейтерид лития, и поэтому тритий нарабатывался в ходе термоядерных реакций в процессе взрыва, а получавшиеся высокоэнергетические нейтроны обеспечивали “трехтактную” схему “деление-синтез-деление”.

В 1955 г. наши физики А.Сахаров, Я.Зельдович, Ю.Трутнев создали новую конструкцию термоядерного заряда.

22 ноября 1955 г. экипажем во главе с Ф.Головашко произведен впервые в мире взрыв водородной, бомбы, сброшенной с самолета ТУ-16.

Первое в СССР сбрасывание атомной бомбы с самолета было произведено 18 октября 1951 г.

30 октября 1961 г. наши физики осуществили и непревзойденный до сих пор по мощности взрыв 50-мегатонной бомбы. Этот заряд отличался высокой “чистотой”. 97 % его мощности приходилось на термоядерные реакции. Подрыв бомбы был осуществлен на высоте четырех километров над Новой Землей с помощью стратегического бомбардировщика ТУ-95.

Могучий оборонный ядерный щит нашей Родины был создан.

Советское руководство сразу предусмотрело особые меры для поощрения участников выполнения атомного проекта. И. Сталин 21 марта 1946 года почти за три с половиной года до первого нашего ядерного испытания подписал Постановление правительства “О премиях для научных и инженерно-технических работников за научные открытия и достижения по использованию атомной энергии”.

Согласно Постановлению “руководитель работы, удостоенный первой премии:

- а) получает денежную премию в размере одного миллиона рублей;
- б) представляется Советом министров Союза ССР к высшей степени отличия... – званию Героя Социалистического Труда;
- в) получает звание «Лауреат Сталинской премии» первой степени;
- г) получает за счет государства в собственность в любом районе Советского Союза дом-особняк и дачу с обстановкой, а также легковую автомашину;
- е) получает двойной оклад жалованья на все время работы в данной области;
- ж) получает право обучения своих детей в любых учебных заведениях СССР за счет государства;
- з) получает право (пожизненно для себя, жены (мужа) и до совершеннолетия для детей) бесплатного проезда в пределах СССР железнодорожным, водным и воздушным транспортом».

Важно подчеркнуть, что премии предусматривались не только за разработку принятых к промышленному внедрению методов получения плутония-239, урана-235 и урана-233, создание конструкции атомной бомбы, но также и за промышленное применение внутриатомной энергии в энергетических целях и на транспорте, имеющих большое народно-хозяйственное значение, за важнейшие открытия в области физики атомного ядра и космического излучения, за создание мощных ускорителей, за разработку важнейших теоретических проблем ядерной физики, использование ядерных процессов и радиоактивных веществ в ме-

дицине, биологии, химии, новых методов обнаружения элементарных частиц высоких энергий.

Таким образом, получили признание и поддержку все разделы атомной науки и техники и смежные с ними направления.

Именно в соответствии с этим постановлением были отмечены осенью 1949 г. участники разработки и испытания первой советской атомной бомбы. Руководители работ – среди них И. Курчатов, Ю. Харитон, В. Хлопин, Н. Доллежал, А. Бочвар – действительно были удостоены перечисленных выше благ и знаков отличий.

Признанием выдающегося вклада именно ученых в решение атомной проблемы в СССР явился и следующий факт. Уже через три месяца после первого испытания Л. Берия поручает Завенягину, И. Курчатову, М. Первухину и другим «в двухнедельный срок разработать и внести на рассмотрение Специального комитета предложение о порядке присвоения ученых званий научным и инженерно-техническим работникам научно-исследовательских учреждений и предприятий, работающим по тематике Первого главного управления, за работы, которые не могут быть рассмотрены в обычном (открытом) порядке». Вскоре надлежащие процедуры были оформлены, а спустя еще некоторое время несколькими наиболее отличившимся участникам и руководителям работ были без защиты диссертаций сразу присвоены докторские степени.

В последующие годы комплекс по производству оружия значительно расширился. В начале 80-х гг. конструирование, испытания и производство боеголовок проводились на 13 основных площадках. Начавшиеся в конце 80-х гг. конверсионные усилия и охватившие всю страну перемены резко повлияли на деятельность комплекса по производству боеголовок. Производство ВОУ для оружия было прекращено. Производство плутония для оружия заметно сократилось, и, как ожидается, скоро спадет до нуля. После распада Советского Союза ядерный полигон в Семипалатинске был закрыт навсегда. Связанная с оружием деятельность на других предприятиях либо прекратилась, либо оказалась направленной на демонтаж боеголовок. Кроме демонтажа, комплекс продолжает деятельность по профилактике ядерного арсенала и, возможно, ограниченному производству новых боеголовок стратегических ракет СС-25.

Поскольку комплекс по производству ядерных боеголовок и большая часть арсенала сосредоточены в России, после развала Советского Союза в конце 1991 г. программа производства ядерного оружия перешла к России и идет процесс сосредоточения в России ядерного арсенала. Исследование, разработка и производство ядерного оружия в России

находятся сейчас под управлением Федерального агентства по атомной энергии РФ.

До 1987 г. в России было 15 военных промышленных реакторов. Тринадцать из 15 реакторов производили плутоний. Все эти реакторы двойного назначения – производящие плутоний, а также пар для бытового отопления и электроэнергии.

Полигоны для испытания ядерных боеголовок в СССР

Различные российские казахские и американские документы помогли развести 715 советских испытаний по срокам, типам, местоположению и задачам. Наша наилучшая современная оценка дает, что с точки зрения типов 204 ядерных испытания было проведено в атмосфере, 508 – под землёй и 3 – под водой. С точки зрения места 496 испытаний проводилось в Казахстане, 214 – в России и 5 – в трех Других республиках. Из казахстанских испытаний 470 было проведено на Семипалатинском полигоне, в том числе 348 взрывов были подземными: в 215 случаях с горизонтальным залеганием и в 133 случаях – с вертикальным. На российском полигоне на Новой Земле было проведено 132 испытания: 87 – атмосферных, 3 подводных и 42 подземных. Полная мощность взрывов составила 291 мегатонну, причем около 257 мегатонн было взорвано в атмосфере в период 1949–1962 гг. [14,27].

В то время как первое ядерное оружие испытывалось в Казахстане, разработка термоядерного оружия привела советских специалистов к выводу о необходимости нового полигона для оружия с более высокой мощностью.

Периодом наиболее интенсивных испытаний на полигоне Новая Земля были 1961 и 1962 гг. За период с 1961 по 1962 гг. было проведено 56 испытаний в атмосфере. Полное число испытаний, проведенных на Новой Земле, составляет 132, из которых 87 атмосферных, 42 подземных и 3 подводных [14].

– Часто возникает вопрос, почему Германия не сумела сделать атомную бомбу, где уровень ядерной физики был самым высоким в мире.

– Это удивительный факт, который до сих пор многим исследователям не дает покоя. Поразительно, но немцы не запустили даже мало-мощный экспериментальный реактор, хотя начали над ним работать еще в 1939 году. Известно, что для создания бомбы необходим легкий изотоп, уран-235, а его в руде – всего 0,7 %. Ядерщики бились над проблемой, как его отделить от тяжелого изотопа, урана-238, причем в промышленных масштабах.

– А разве немцы не знали о методе газодиффузии, который как раз и применили американцы?

– Знали, но считали, что это «еврейская физика», а потому искали другой способ. И потеряли время. А вообще в немецкой программе был один ключевой момент. К 1943 году они поняли: в бомбе уран-235 вполне заменим плутонием, а это существенно упрощает задачу. Ведь его можно получать в реакторе прямо из природного урана.

Но В. Ботте, рассчитывая реактор, где замедлителем служит графит, допускает роковую ошибку. В результате немцы стали строить установку не на графите, а на тяжелой воде, которой в Германии не было. Доставка же ее в нужных количествах из Швеции оказалась неразрешимой задачей.

Есть более глубокая причина неудачи Германии. Там очень сильна иерархия, этакое «герр профессор сказал». Но при создании бомбы многие решения получались вопреки авторитетам и устоявшимся понятиям. Именно в США, с их демократизмом, нетривиальные идеи молодых ученых, пожалуй, как нигде в мире, поддерживались и реализовывались.

О вкладе советских и немецких ученых в решение урановой проблемы в СССР [14]

Работы по разделению изотопов урана в газовой фазе были начаты в лаборатории № 2 сразу же после ее организации в 1943 г. В 1944 г. в лаборатории № 2 Л.А. Арцимович был назначен ответственным за изучение электромагнитного метода разделения изотопов урана.

К середине 1944 г. к разработке методов разделения изотопов была привлечена Лаборатория электрических явлений, руководимая И. Киикоиным в Уральском филиале АН. В эту лабораторию был откомандирован Ф. Ланге, который раньше работал в ХФТИ, а затем в г. Уфе над созданием газовой центрифуги. Однако до конца войны работы велись малыми силами. Тем временем в государственном союзном НИИ-42 Наркомхимпрома (в лаборатории Б. Алексеева) были получены первые 10 г UF_6 , который является наиболее химически устойчивым газообразным соединением урана. После окончания войны и организации Специального комитета и ПГУ отношение к урановой проблеме диаметрально изменилось. Для участия в исследованиях были привлечены немецкие специалисты, оказавшиеся в ходе войны на территориях, занятых Советской Армией. Хорошо известно, что в предвоенные и военные годы наибольших успехов в изучении высвобождения внутриядерной энергии добились ученые Германии и США. Так называемую «урановую

машину» немцы намечали использовать в качестве двигателя для ракет и подводных лодок, а также в атомной бомбе. Советские специалисты сумели получить данные, которые позволили составить схему организации работ, проводившихся в Германии по этой проблеме, а также установить объемы этих работ, полученные по ним конечные результаты, примерное количество урана и тяжелой воды, которым располагала Германия до капитуляции, и ряд других сведений. О полученных данных было доложено руководителям проводимых у нас работ по проблеме № 1 Б. Ванникову и И. Курчатову. Поэтому неслучайно, что еще в конце 1945 г. постановлением Совнаркома от 19 декабря 1945 г. было поручено привлечь немецких специалистов для работы в СССР. В системе НКВД созданное еще в 1944 г. специальное подразделение во главе с А.П. Завенягиным (9 Управление) было призвано обеспечивать работу приглашенных немецких ученых и специалистов. Также поступали и наши союзники, которые в результате разгрома Германии собрали в своей зоне оккупации много ученых из Германии.

Как союзники, так и руководство нашей страны при демонтаже в Германии ряда производств, научных учреждений и других объектов, в первую очередь связанных с военной промышленностью, в ряде случаев предлагали работать на победителей крупным немецким специалистам по контракту, с четким определением прав и взаимных обязательств. Наша сторона сделала такие предложения некоторым крупным ученым. Предложение приняли профессор барон М. Арденне, руководивший в Берлине собственной лабораторией электронной и ионной физики, нобелевский лауреат Г. Герц, возглавлявший лабораторию фирмы Siemens в Берлине, а также профессора Р. Доппель, М. Фольмер, Г. Позе, П. Тиссен; доктора В. Штуце, Н. Риль и другие специалисты. Всего из Германии в СССР прибыло примерно 200 специалистов, среди них 33 доктора наук, 77 инженеров и около 80 ассистентов и лаборантов. К концу 1948 г. в СССР находилось приблизительно 300 немецких специалистов и квалифицированных рабочих. Часть прибывших были связаны с разработкой технологии получения высокообогащенного урана.

Работы по разделению газовых смесей изотопов в нашей стране тоже проводились. Под руководством Комиссии АН СССР по изотопам (руководитель академик В. Вернадский) в апреле 1940 г. была проведена Всесоюзная конференция с обсуждением планов работ по получению тяжелой воды методом электролиза и разделения изотопов урана масс-спектрометрическим методом из паров металла и методом термодиффузии UF₆.

Ранее отмечалось, что в ХФТИ ученый немец-эмигрант Ф. Ланге вел лабораторные опыты с применением горизонтальной высокооборотной центрифуги в целях разделения изотопов урана. Как отмечает Н. Синев, установка Ф. Ланге в 1944 г. была передана сначала Свердловской лаборатории электрических явлений (И. Кикоину), а в мае 1945 г. эта лаборатория и сам Ф. Ланге перебазировались в Москву. Некоторые работы проводились и в других институтах еще в довоенный период. На Техническом совете Специального комитета, ответственного за реализацию программы № 1, уже в сентябре 1945 г. были заслушаны доклады: 6 сентября – И. Кикоина (лаборатория № 2) и П. Капицы (ИФП) «О состоянии исследований по получению обогащенного урана газодиффузионным методом»; 10 сентября Л. Арцимовича (лаборатория № 2) и А. Иоффе (ЛФТИ) «Об обогащении урана электромагнитным методом».

В декабре 1945 г. были конкретизированы направления работ и определены руководители: газодиффузионный метод разрабатывался под общим руководством И. Кикоина; электромагнитный метод – под руководством Л. Арцимовича; методы термодиффузии – А. Александрова и И. Кикоина. Научное руководство разработками диффузионного метода обогащения урана правительством было конкретизировано и возложено на трех ученых во главе с И. Кикоиным – он отвечал за физику процессов, профессор И. Вознесенский – за инженерные решения, академик С. Соболев – за расчетно-теоретические работы.

Были развернуты работы немецких ученых. Под руководством М. Арденне в помещении санатория «Синоп» (г. Сухуми) создается институт А, на который возлагается разработка следующих методов:

– электромагнитного метода разделения изотопов урана (руководитель М. Арденне);

– методов изготовления диффузионных перегородок (руководитель П. Тиссен);

– молекулярных методов разделения изотопов урана (руководитель М. Штеенбек).

В помещении санатория «Агудзеры» (вблизи г. Сухуми) размещается институт Г под руководством лауреата Нобелевской премии Г. Герца. На этот институт возлагаются такие работы:

– разделение изотопов методом диффузии в потоке инертного газа (руководитель Г. Герц);

– разработка конденсационного насоса (руководитель Мюленпфорд);

– создание теории устойчивости и регулирования диффузионного каскада (руководитель Г. Барвих);

– конструирование масс-спектрометра для определения изотопного состава урана (руководитель В. Шютце);

– разработка бескаркасных (керамических) диффузионных перегородок фильтров (руководитель Р. Райхман).

Руководителям этих институтов М. Арденне и Г. Герцу разрешалось на добровольных началах приглашать для работы в СССР известных им ученых и квалифицированных специалистов. Немецкие ученые и специалисты работали в комфортабельных условиях. Им всем были установлены твердые должностные оклады, разрешена переписка и предоставлена возможность отправлять посылки. Вместе с немецкими учеными в «Агудзерах» и «Синопе» работали советские физики из Тбилиси Ш. Бурдиашвили, И. Гвердцители, И. Кварцахо и др.

Немецкие специалисты работали и на других объектах, связанных с использованием урана. Под руководством профессора Р. Позе в 1946–1947 гг. в Калужской области (станция Обнинское) была создана лаборатория В. С 1946 по 1953 гг. он был одним из научных руководителей по созданию ядерного реактора на слабообогащенном уране. Лаборатория В была организована на базе помещений детской трудовой колонии. В ней работали 23 немецких специалиста под научным руководством Р. Позе и члена Украинской АН А. Лейпунского.

Лаборатория Б для немецких и части реабилитированных отечественных специалистов была организована в санатории «Сунгуль» около г. Касли в Челябинской области, где работали Н. Тимофеев-Рессовский (возглавлял радиобиологический отдел) и немецкие ученые К. Циммер, Г. Борн, А. Кач и др. Директором лаборатории Б был А. Уралец, его заместителем по общим вопросам – И. Увин (впоследствии начальник Финансового управления Минсредмаша), а научным руководителем химического отдела – профессор С. Вознесенский. Кроме немцев, в лаборатории работали и вольнонаемные советские специалисты: Ю. Москалев, Л. Булдаков, П. Горбатюк, А. Горюнов, несколько позднее – Г. Середа, П. Долгих, Л. Басков и др. После перевода А. Уральца в НИИ-9 директором лаборатории Б был назначен Г. Середа – впоследствии начальник ЦЗЛ на комбинате № 817 в Челябинске-40. Под руководством С. Вознесенского впервые в стране была разработана технология получения чистых осколочных элементов, таких как ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{95}Zr , и технология очистки от них.

Кроме институтов А и Г, лабораторий Б и В отдельные группы немецких специалистов работали на заводе № 12 (Н. Риль и П. Тиссен), в НИИ-9 (М. Фольмер и Р. Доппель), ЛИПАНе (И. Шетельмейстер). Как уже отмечалось, ряд немецких ученых были награждены правительственными наградами. Так, доктор Г. Виртц за разработку технологии по-

лучения металлического урана из UF_6 дважды удостоивался Сталинской премии. Доктор Штуце за разработку перегородок для диффузионных машин тоже был удостоен Сталинской премии. Доктору Н. Рилю за работы, связанные с технологией производства чистого металлического урана, кроме Сталинской премии было присвоено звание Героя Социалистического Труда.

В 1953 г. немецкие специалисты были в основном освобождены от многих работ и вскоре выехали в Германию. В целом работы немецких ученых были составной частью общих задач, решаемых у нас в стране в рамках атомной программы, однако они не были связаны с работами предприятий и КБ, расположенных в Арзамасе-16 (г. Кремлёв), Челябинской области (г. Снежинск) и Свердловске-45 (г. Лесной). О вкладе отечественных и немецких специалистов в решение проблемы получения высокообогащенного U-235 наиболее детально изложено в книге активного создателя этой технологии профессора Н. Синева, а также в обзоре профессора Н. Галкина.

К истории атомной бомбы [6]

Ранее упоминалось об Арзамасе-16, мозговом центре атомного оружия, побратима американского Лос-Аламоса, в которых разрабатывались теоретически и практически конструкция атомной бомбы и технологический процесс ее изготовления.

В работе (Бомба. Журналисты студии “Некос”. “Русские сенсации”. М.: Изд. 1993) приведены некоторые интересные факты, касающиеся атомной проблемы.

Арзамас-16 – город легенд и секретов, кузница атомного оружия.

Самым первым было название “Объект”, затем – “Приволжская контора № 112”. Несколько позже город назвали “Кремлев”, а потом Арзамас-75. Выбирали место для объекта двое: Ю.Б. Харитон и генерал П.М. Зернов.

В Арзамасе-16 имеется уникальный музей.

Макет бомбы, взорванной в 1949 г. на Семипалатинском полигоне.

Пульт первого атомного устройства. Совсем простенький по нынешним временам. Несколько контрольных приборов, кнопка “отбоя” и рубильник включения “схемы”, который до начала испытаний был закрыт на “амбарный” замок. В далеком 49-м на Семипалатинском полигоне этот рубильник включил будущий академик и трижды герой Труда К.И. Щелкин.

Рядом находится первая атомная бомба. На табличке короткая надпись: *“Изготовлена в 1951 году. Мощность 20 кт ТЭ (буквы расшифро-*

вываются так: килотонн тротилового эквивалента – М.Р.). Прошла летные испытания. На вооружение не представлялась”.

Следующая в этом уникальном ряду первая серийная авиационная бомба *“На вооружении с 1953 года. Мощность 30 кт Т.Э.”*. Внешне она почти вдвое меньше экспериментальной, а мощность заметно возросла. Конструкторы назвали ее “Татьяной”. Почему так? Этого никто вспомнить не мог. А вот другое запомнилось хорошо: принятие “Тани” на вооружение позволило сократить численность армии на 2 миллиона 400 тысяч человек.

Если есть “Катюша”, почему не быть “Татьяне”?

... А вот “Кит”, которого американцы звали “Большой Джо”, а наши – “Большой Иван”. Это самое мощное оружие, когда-либо испытанное в истории. Когда “Большой Иван” рванул на Новой Земле, взрывная волна трижды облетела земной шар, поставив точку в идее использовать атом в войне.

В музее можно увидеть фильмы про ядерные испытания. Раньше их показывали только первым лицам страны. Американцы бомбили не учебные города и не бутафорские мосты. Наши “Татьяны” и “Иваны” в военных целях не использовались никогда, а были “щитом” и аргументом в политике сдерживания. Дима Сладков, кандидат архитектуры, а теперь начальник бюро информации Ядерного центра, считает, что атомное оружие больше, чем оружие, и даже элемент культуры XX века.

Далее. “Первая в мире водородная бомба. Мощность 400 кт ТЭ Испытание заряда произведено 12 августа 1953 года на Семипалатинском полигоне. Самолет-носитель Ту-16”.

И все-таки, маленький экскурс в историю. “Холодная война” набирала силу. В Пентагоне планировался “атомный блицкриг”. Издаются секретные директивы, рождаются безумные проекты с кодовыми названиями – “Пинчер”, “Бушуокер” и другие. Ставка делается на бомбардировщики В-29, которые с многочисленных военных баз (вокруг бывшего СССР) “достають” до наших административных и промышленных центров. С нашей территории самолеты, куда надо, не доставали. Удержать “горячие головы” можно было лишь альтернативным решением: поставить на боевое дежурство ракеты, несущие ядерные заряды. И это было сделано.

“Первая ядерная головная часть для баллистической ракеты. На вооружении с 1956 года. Дальность 1200км. Мощность 40 кт ТЭ”.

Ракетный щит, то есть носители, создавали конструкторы С. Королев, М. Янгель, В. Челомей, В. Уткин, В. Макеев, А. Надирадзе...

“Первая серийная ядерная головная часть для тактической ракеты...”

“Термоядерный боевой блок для разделяющейся головной части стратегической ракеты...”

Дальность полета этих “изделий” от 4 до 12 тысяч километров, а мощность более 2 мегатонн ТЭ.

А вот и первая термоядерная головная часть для стратегической межконтинентальной ракеты. Внушительны ее размеры, но еще более впечатляющи цифры на пояснительной табличке. *“Мощность 3 Мт Т.Э.”* Три мегатонны! Для сравнения напомним: все гранаты, мины, снаряды, торпеды и бомбы, взорванные во время Второй мировой войны, обладали суммарной мощностью, равной трем мегатоннам. Такая вот арифметика.

И наконец, девятый экспонат. *“Самая мощная в мире экспериментальная термоядерная бомба. Испытана в 1962 году на полигоне “Новая Земля”. Подрыв воздушный на высоте 4500 м. Расчетная мощность – 100 Мгт ТЭ. Испытана на половинную мощность”.*

Эта махина – длина ее 12 метров, а диаметр более 2 метров – несла в хвостовой части специальную парашютную систему. Главный парашют имел площадь 1600 квадратных метров.

Бомбу “тащил” стратегический бомбардировщик Ту-95. Люки были открыты – не влезала.

Количество оружейного плутония в мире оценивается в 270 т, из которых 150 т находится в России, 100 т – в США, менее чем по 10 т – во Франции и Китае.

США произвели более 500 т ВОУ оружейного качества (93 % U-235).

Российские потребности в ВОУ оцениваются порядка 1100–1300 т. Россия согласилась продать 500 т ВОУ оружейного качества США, и как сказал Министр Михайлов, что эта величина составляет примерно 40% полного резерва российского ВОУ.

Используя метод компьютерного моделирования американские учёные определили, чтобы уничтожить Канаду – 11 ракет (475 кТ), США – 124, Россию – 51, Северную Корею или Ирак – 4, Китай – 368 (гибель 25 % населения, 50 % промышленности). Американский Центр оборонной информации опубликовал данные о ядерном потенциале государств. Всего в мире на 2002 г. – 22000 ракет с ядерным оружием: Китай – 400 (250 стратегических /120 тактических), Франция – 350, Индия – 60, Израиль – 100/200, Пакистан – 24/48, Россия – 10000(6000/4000), Англия – 180/5, США – 10656(8646/2010).

Руководитель Минатома РФ В.Н. Михайлов отмечал: «Минатом добывает самое чистое в мире золото. У нас самое дешёвое производство циркония, самая эффективная технология разделения изотопов с энергопотреблением в 20 раз ниже, чем в США. За счёт переработки бедных руд мы выпускаем чистые оксиды молибдена, вольфрама, ванадия. В Минатоме работают несколько заводов по производству серной, азотной и плавиковой кислот, элементарного фтора. Наши предприятия производят тантал и ниобий, цирконий и гафний, литий и бериллий, щелочно-земельные металлы и изделия из них.

В настоящее время стоит огромной важности задача по разработке и уничтожению значительной части этого арсенала оружия.

Ядерное оружие – это сложное устройство, которое включает в себя и электронику, и генераторы, и ядерно-активные материалы, и обычные взрывчатые вещества. Оно имеет ограниченный срок службы – примерно 10–15 лет, а затем поступает на разборку. Сейчас наши заводы больше заняты ликвидацией старых зарядов, чем производством новых».

Научно-технические достижения отрасли способствовали ликвидации нашего отставания от США в создании ядерного арсенала. Так, если в 1950 г. США имели в своем арсенале свыше 300 атомных бомб, а СССР – 12 единиц, то в 1970 г. Это выражено следующим образом 26600 боеголовок США и 12700 – у СССР. А уже в 1977 г. У СССР было 28400 единиц ядерного оружия против 25800 – у США [19,20].

1.2. Типы ядерного оружия

Ядерное оружие может быть сгруппировано по классам, основанным на ядерных реакциях, лежащих в принципах их работы, или на особенностях конструктивного исполнения. Популярное деление ядерного оружия на оружие деления и оружие синтеза не совсем корректно. Спектр конструктивного исполнения оружия более сложен, чем эта простая классификация. Во всех ядерных устройствах, разработанных по настоящее время, взрывное высвобождение энергии происходит при реакции деления ядер. Конструкции оружия, в основе которого лежит реакция синтеза ядер, могут различаться принципами и способами подрыва.

Терминология

У оружия, действующего на принципах деления или синтеза ядер, есть очень много названий – атомные бомбы (A-bombs), водородные

бомбы (H-bombs), ядерное оружие, бомбы деления (fission bombs), бомбы синтеза (fusion bombs), термоядерное оружие (не упоминая “physics package” и “устройство”). Несколько комментариев о терминологии.

Самое раннее название для такого оружия, кажется, “атомная бомба”. Оно критиковалось как неправильное употребление, так как все химические взрывчатые вещества производят энергию от реакций между атомами – то есть между неповрежденными атомами, состоящими из атомного ядра и ее электронной оболочки. Поэтому оружие ядерного деления, к которому применен термин “атомная бомба”, не более “атомное”, чем оружие синтеза. Однако это название стало привычным для оружия чисто ядерного деления и очень часто используется историками, публикой и учеными, которые создавали первое ядерное оружие.

Так как основная особенность и оружия ядерного деления, и оружия ядерного синтеза – то, что они освобождают энергию при преобразованиях ядер атомов, лучший общий термин для всех типов этих взрывчатых устройств – “ядерное оружие”.

Оружие синтеза называют “водородными бомбами” (H-bombs), потому что изотопы водорода – основные компоненты этих ядерных реакций.

Фактически в самой первой конструкции бомбы на основе реакции синтеза дейтерий (водород-2) был единственным топливом. Оружие синтеза называют “термоядерным оружием”, потому что для возникновения реакций синтеза требуются высокие температуры.

Оружие «чистого» расщепления ядер

Это оружие, которое в качестве источника энергии использует реакции расщепления ядер. Бомбы расщепления работают на принципе быстрого соединения подкритических частей с расщепляющимся материалом (плутоний или обогащенный уран) в единое целое, которое становится сверхкритичным. Первые атомные бомбы, проверенные 16 июля 1945 г. (наименование устройства – Gadget, наименование испытания – Trinity) и сброшенные на Японию 6 августа 1945 г. (Little Boy по Хиросиме) и 9 августа 1945 г. (Fat Man на Нагасаки) были «чистым» оружием расщепления.

Это самое легкое в проектировании и производстве ядерное оружие, которое, к тому же, необходимо для развития любого из других типов ядерного оружия. В дополнение к пяти объявленным ядерным державам (США, СССР/Россия, Великобритания, Франция, и Китай), которые разработали и проверили это оружие, эти бомбы есть у Израи-

ля, Индии, ЮАР и Пакистана. Индия официально провела испытания такой бомбы, в то время как Израиль и ЮАР только сообщили об этом.

Размер «чистых» бомб расщепления имеет практические пределы. Большие бомбы требуют большего количества делящегося материала, поэтому:

1. становится все более и более трудным поддерживать подкритичность системы до взрыва;
2. возникают сложности сбора высокоэффективной сверхкритической массы по причине возможной детонации от случайных, паразитных нейтронов (предвзрыва).

Вызывает затруднение точная идентификация самой большой «чистой» бомбы расщепления. Кажется, это 500 кт испытание Ivy King, проведенное США 15 ноября 1952 г.

Объединенное оружие расщепления/синтеза

Все ядерное оружие, которое не является чисто оружием расщепления, использует реакции синтеза для увеличения энергии взрыва. Все оружие, где используется синтез, требует, чтобы бомба расщепления обеспечила энергию начала реакции синтеза. Это не обязательно подразумевает, что синтез произведет существенное количество энергии взрыва или даже что эта энергия является желательным эффектом.

Усиленное оружие расщепления

Самым ранним применением реакции синтеза было развитие усиленного оружия расщепления (boosted fission weapons). В этом оружии несколько граммов смеси газа дейтерия/трития включены в центр расщепляющегося заряда. Когда в заряде бомбы начинается цепная реакция расщепления, температура заряда повышается настолько, что становится достаточной для старта (D,T)-реакции синтеза, которая развивается стремительно. При этой реакции происходит интенсивный выход нейтронов высокой энергии, который повышает соответственно, интенсивность цепной реакции деления. Это очень ускоряет процесс деления топлива, таким образом позволяя получить намного более высокий процент прореагировавшего материала в заряде прежде, чем заряд разлетится на части. Обычно в «чистой» бомбе до раскола заряда успевает прореагировать не более чем 20 % делящегося материала (это может быть намного ниже, эффективность бомбы, сброшенной на Хиросиму составляла 1,4 %). Ускорение расщепления позволяет увеличить энергию взрыва на 100 % (20 килотонная бомба при усилении может, таким

образом, стать 40 килотонновой бомбой). Фактическое количество энергии освобожденной при реакции синтеза незначительно, приблизительно 1 % от общей мощности бомбы. Это делает усиленную бомбу трудно отличимой от «чистой» (единственный метод определения – обнаружение следов трития).

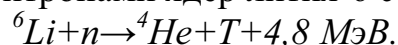
Первое испытание усиленного оружия – Greenhouse Item (45.5 кт, 24 мая 1951 г.), устройство взорвано на острове Джанет атолла Enewetak. В этом экспериментальном устройстве вместо газа использовалась жидкая тритий-дейтериевая смесь. Усиление приблизительно удвоило мощность взрыва. Были проведены испытания усиленных зарядов с использованием газообразного дейтерия и тритий-дейтерида лития, но не известно, использовался ли любой из этих подходов в боевом оружии.

Из-за отмеченного увеличения мощности (так же как и по ряду других причин – сокращения веса заряда и устранения риска предвзрыва) большинство бомб расщепления на сегодня усилено, включая те, которые используются как первичные (инициирующие) в оружии расщепления-синтеза. Но все-таки хотя усиление и повышает мощность бомб расщепления, это оружие при повышении мощности заряда имеет те же самые недостатки, как и «чистые» бомбы расщепления. Техника усиления наиболее нужна в маленьких легких бомбах, которые иначе имели бы низкую эффективность. Тритий – очень дорогой в изготовлении материал, скорость распада трития составляет 5.5 % в год, но маленькие количества (несколько граммов), необходимые для того, чтобы усилить бомбу, делают его использование экономичным.

Советский прогресс по водородной бомбе близок параллельным разработкам в Соединенных Штатах. На самом деле советские усилия могли пойти по неверному пути из-за сообщений разведки об американских конструкциях, которые в конечном итоге оказались неудачными. Было очевидно, что для возбуждения термоядерной реакции потребуется температура в несколько десятков миллионов градусов. Начальная советская концепция, которой следовала группа Зельдовича, состояла в том, чтобы поместить слой жидкого дейтерия в обычную атомную бомбу между расщепляющимся материалом (полый сферой из урана-235 или плутония-239) и внешним слоем химической взрывчатки. Однако было замечено что недостаток тепла и малая степень сжатия дейтерия приводили к практически полному отсутствию термоядерной реакции в дейтерии. Чтобы увеличить скорость реакции, в 1948 г. были предложены два способа улучшения конструкции, – одно Д. Сахаровым и второе В. Гинзбургом. Д. Сахаров в августе или сентябре 1948 г. предложил увеличить скорость реакции в дейтерии, если окружить его оболочкой

из естественного урана, что приводит к эффективному увеличению концентрации дейтерия на границе между ураном и дейтерием. Оболочка вокруг дейтерия увеличивает также мощность устройства в результате деления U-238 быстрыми нейтронами, которые выделяются при термоядерном сгорании – это так называемый конструктивный принцип “деление–синтез–деление”. Описан также вариант Д.Сахарова в виде неоднородной конструкции, состоящей из перемежающихся слоев термоядерного топлива (дейтерия, трития или их химических соединений) и тяжелого вещества, например урана-238. Д. Сахаров называл его “слоистой”. Его коллеги называли подход Д. Сахарова “сахаризацией”.

Кроме того, давно уже было понятно, что ситуация была бы значительно улучшена, если часть дейтерия заменить на тритий, так как поперечное сечение (D,T)-реакции примерно в 100 раз выше сечения (D,D)-реакции при той же самой температуре. Поскольку трития нет в природе в сколь либо заметных концентрациях, его надо получать в реакторах при облучении нейтронами ядер лития-6 согласно реакции



Этот процесс дорог. Более того, тритий радиоактивен с периодом полураспада 12,3 года и поэтому его надо регулярно пополнять. Вскоре после того, как Д. Сахаров предложил свою “первую идею”, В. Гинзбург в ноябре 1948 г. предложил заменить часть дейтерия на литий-6 в качестве средства на получение трития в самом оружии. В конечном счете (возможно, по предложению В. Гинзбурга) литий-6 вошел в оружие в виде дейтерида лития (${}^6\text{LiD}$).

Эти две идеи, “ ${}^6\text{LiD}$ ” и “сахаризация”, были включены в первое советское термоядерное испытание 12 августа 1953 г. Испытанное оружие, которое в Соединённых Штатах получило название “Джо-4”, было, по словам Ханса Ботте, одноступенчатым оружием с “резко усиленным делением”, имевшим мощность 400 килотонн.

Десять процентов мощности (40 килотонн) дал запал, 15–20 процентов (60–80 килотонн) выделилось от термоядерной реакции (от ${}^6\text{LiD}$) и все остальное (280–300 килотонн) – от деления ядер U-238 в урановых слоях.

Оружие организованного лучевого взрыва

Этот класс оружия также называют “Teller–Ulam”, либо (в зависимости от типа) оружие расщепления–синтеза или расщепления–синтеза–расщепления. Это оружие использует реакции синтеза с изотопами легких элементов (например водород и литий) и не имеет ограничений по мощности взрыва, присущих «чистой» бомбе расщепления и

усиленной бомбе. При этом уменьшается стоимость самой такой бомбы, путем сокращения количества дорогостоящего обогащенного урана или плутония, требуемого для создания бомбы эквивалентной мощности, и уменьшается вес бомбы. Реакции синтеза происходят во “вторичном” блоке топлива синтеза, который физически отделен от “первичного” пускового блока, работающего на принципе расщепления. Таков принцип бомбы, использующей две стадии (подсчет стадий начинается с первичной – расщепления). Гамма-кванты, образующиеся при взрыве первичного блока, используются, чтобы сжать вторичный блок посредством так называемого лучевого взрыва (radiation implosion). Вторичный блок зажигается от запала (“spark plug”), расположенного в центре этого блока и функционирующего на принципе расщепления. Энергия, произведенная при реакции синтеза на второй стадии взрыва, может использоваться для поджога следующей, третьей стадии. Многократное повторение этого процесса позволяет, в принципе, создавать бомбы фактически неограниченной мощности.

Реакции синтеза позволяют повысить мощность взрыва двумя способами:

1. Непосредственным высвобождением большого количества энергии, которая образуется в результате этих реакций;

2. Путем использования высокоэнергетических (“быстрых”) нейтронов, образующихся при реакциях синтеза, которые вызывают расщепление материала делящейся оболочки, окружающей блок синтеза. В прошлом эта оболочка изготавливалась из естественного или обедненного урана, поскольку ^{238}U расщепляется под действием быстрых нейтронов. В качестве оболочки может использоваться торий, хотя он обладает худшими размножающими свойствами и экономически менее выгоден по сравнению с дешевым обедненным ураном. В случае, когда необходима оптимизация веса и размера бомбы (то есть фактически все современное стратегическое оружие), в качестве оболочки лучше использовать умеренно - или высокообогащенный уран.

Бомбы, в которых основное количество энергии взрыва формируется в процессе реакций синтеза, а нейтроны, образованные при реакции синтеза, не используются для расщепления оболочки блока синтеза, называют оружием расщепления–синтеза (fission–fusion). Если нейтроны, образованные при реакции синтеза, используются для расщепления делящейся оболочки, такие бомбы называют оружием расщепления–синтеза–расщепления (fission–fusion–fission).

О расщеплении оболочки вторичного блока в бомбе расщепления–синтеза–расщепления иногда пишется, как о “третьей стадии” в бомбе, и это в некотором смысле правильно. Но это нельзя путать с истинно

трехстадийной термоядерной конструкцией, где вторая стадия синтеза инициирует подрыв третьего блока, в основе функционирования которого также лежит синтез легких ядер.

Бомбы, основная мощность которых определяется реакциями синтеза, считаются “чистыми” бомбами. Последняя и максимальная стадия взрыва этих бомб, оболочка второго блока которых выполнена из неделяющегося материала, основана на реакции синтеза (не считая расщепления запала). Доля процессов синтеза в этих конструкциях, как проверено в испытаниях, составляет до 97 % общей мощности взрыва.

Бомба расщепления–синтеза–расщепления – “грязная бомба”, но она значительно дешевле. При взрыве этой бомбы образуется большое количество радиоактивных осколков деления, так как расщепление оболочки определяет основную долю мощности бомбы. При испытании 5 Mt Redwing Tewa (20 июля 1956 г. Атолл Бикини) получено, что вклад реакций расщепления в общую мощность взрыва составляет 85 %. Если в основе проектирования конструкции бомбы лежит цена – оболочка изготавливается из естественного или обедненного урана.

В качестве топлива вторичного блока бомбы обычно используется чистый дейтерий или дейтерид лития, включающий изотопы ${}^6\text{Li}$ и ${}^7\text{Li}$. Дейтерий и изотопы лития – естественные устойчивые изотопы, и они значительно дешевле, чем искусственно сделанный и радиоактивный тритий.

Концепция лучевого взрыва первоначально была разработана С. Уламом и окончательно сформировалась в начале 1950 г. в сотрудничестве С. Улама и Э. Теллера. Первым испытанием термоядерного устройства этого типа был Ivy Mike 31 октября 1952 г. на острове Eugelab/Flora атолла Enewetak. Экспериментальное устройство, названное Sausage (Сосиска), было изготовлено на основе чистого дейтерия (вероятно, единственный раз) и оболочки из естественного урана. Устройство было разработано Комитетом Panda во главе с J. Carson Mark в Лос-Аламосе. Мощность Mike составила 10,4 Мт, 77 % которых были обусловлены расщеплением.

Обычно считается, что тремя основными разработчиками советской водородной бомбы были Д. Сахаров, Я. Зельдович и Ю. Харитон, хотя работа Арзамаса-16 была поддержана (особенно в течение первых лет теоретическими группами ФИАНа (В. Гинзбург, Е. Фрадкин) и Института физических проблем (Л. Ландау, И. Халатников), а также экспериментаторами ЛИПАНа и Дубны. Ю. Харитон был научным руководителем Арзамаса-16 с начала его существования в 1946 г., Я. Зельдович сначала отвечал за теоретические исследования в Арзамасе-16, куда он прибыл вместе с Ю. Харитонов в 1946 г. Когда Д. Сахаров и И. Тамм

приехали в Арзамас в 1950 г., был создан второй теоретический отдел для И. Тамма. После отъезда И. Тамма в 1953–1954 гг. его место занял Д. Сахаров. В 1955 г. Я. Зельдович и Д. Сахаров были назначены заместителями у Ю. Харитона.

Идея использования давления излучения для сжатия и поджига физически удаленного термоядерного вторичного устройства (в американской программе это изобретение, сделанное весной 1951 г., приписывается Э. Теллеру и С. Уламу), была разработана Д. Сахаровым (“одним из главных авторов”), несколькими его коллегами из двух теоретических отделов (Я. Зельдовича и Д. Сахарова) в Арзамасе-16. В своих воспоминаниях Д. Сахаров называет это третьей идеей и утверждает, что Я. Зельдович, Е. Трутнев и другие несомненно внесли в нее значительный вклад. Что-то похожее на “третью идею” было предметом более ранних предположений, но этот двуступенчатый подход стал серьезным выбором для исследований в 1954 г.

Концепция “Teller-Ulam” позже была открыта другими четырьмя ядерными странами, все они также испытали это оружие. Никакие другие государства пока не освоили эти технологии, хотя необъявленные ядерные державы Израиль и Индия почти наверняка ведут работы в этом направлении.

Трехстадийные заряды были испытаны и поставлены на вооружение в качестве сверхмощных бомб. Первое американское «чистое» трехстадийное испытание и, вероятно, последнее трехстадийное «чистое» испытание – устройство Bassoon, испытание Redwing Zuni (27 мая 1956 г. Атолл Бикини, 3.5 Мт). Самый сильный ядерный взрыв, когда-либо производимый (50 Мт), был Царь-Бомба – советский трехстадийный заряд расщепление–синтез–расщепление, взорванный 30 октября 1961 г. на Новой Земле на высоте 4000 м.

При использовании в качестве оболочки блока третьей стадии неделящегося материала, трехстадийные устройства могут быть высокомоощным чистым оружием. И Zuni, и Царь-Бомба были фактически очень чистыми устройствами: Zuni – 85 %-й синтез, Царь-Бомба – 97 %-й синтез. В обеих конструкциях урановая оболочка третьей стадии была заменена на вольфрамовую. Вариант устройства Bassoon, наименование Bassoon Prime, был проверен в «грязном» испытании Tewa, упомянутом выше. «Грязное» устройство, полученное на основе Bassoon было принято на вооружение для создания самого мощного оружия, которое США когда-либо имели, – 25-мегатонной М-41. Конструкция Царь-Бомбы с применением урановой оболочки предполагала мощность взрыва, близкую к 100 мегатоннам!

Возможная разновидность использования метода организованного лучевого взрыва – на второй стадии вместо термоядерной реакции инициируется вновь реакция деления. Это фактически и было начальной концепцией С. Улама, прежде чем он понял его возможное применение для термоядерного оружия. Преимущество этого метода в том, что при организованном лучевом взрыве скорость реакции повышается в сотни раз, а плотность в десятки раз, что обуславливает максимум использования топлива в реакции. Метод позволяет получать высокие энерговыделения и при этом использовать делящиеся материалы более низкого качества. Если же в качестве заряда второй стадии используется заряд, усиленный топливом синтеза, это повышает мощность двухстадийного устройства, работающего на принципе расщепление–расщепление, до такой степени, что стираются различия между устройством этого типа и классическим термоядерным устройством “Teller-Ulam”. TX-15 “Zombie”, разработанный США, первоначально был запланирован, как двухстадийное устройство «чистого» расщепления, но позже был трансформирован: его вторая стадия была усилена добавкой топлива синтеза, что повысило его мощность. Zombie был проверен в испытании Castle Nectar (13 мая 1954 г. по Гринвичу; Атолл Бикини; 1,69 Mt), и был принят на вооружение как Mk-15.

Конструкция будильник/слойка (слоеный пирог)

Эта идея предшествует изобретению метода организованного лучевого взрыва, и была изобретена независимо по крайней мере три раза. Первым изобретателем такой конструкции был Э.Теллер, США, который назвал конструкцию “Будильник”. Впоследствии к этому пришли А. Сахаров и В. Гинзберг, СССР, они назвали эту конструкцию “Слойка”. “Слойка” – слоистое российское печенье, подобно тарту «Наполеон», поэтому название и было переведено на английский, как “Слоеный пирог”. Наконец, это было развито в Британии (изобретатель неизвестный). Каждая из этих программ исследования оружия натолкнулась на эту идею перед окончательным созданием более сложного, но более мощного и эффективного термоядерного оружия.

Система была названа в СССР “Слоеный Пирог” потому, что она состоит из набора концентрических сферических оболочек. В центре – первичный блок расщепления, выполненный из U-235/Pu-239, его окружает экран из U-238, затем слой дейтерида/тритида лития-6, который опять окружен экраном из U-238, – и получена система, обладающая высокой взрывной мощностью. Процесс начинается подобно обычной бомбе. После взрыва первичного блока в центре бомбы в результате выде-

ления энергии слой с материалами синтеза сжимается и нагревается до пороговой температуры термоядерной реакции. Слабоэнергетичные нейтроны деления инициируют смешанную расщепление–синтез–расщепление цепную реакцию. Эти слабоэнергетичные нейтроны генерируют тритий из лития, который синтезируется с дейтерием с выделением нейтронов высокой энергии, которые, в свою очередь, инициируют реакцию деления в слое U-238, окружающем слой с материалами синтеза, в результате чего образуется еще больше трития. Здесь топливо синтеза действует как нейтронный акселератор, позволяющий дать старт цепной реакции расщепления большой массы обычно не делящегося U-238. В этой конструкции слой с материалами синтеза не обязательно должен содержать начальную дозу трития, хотя эта начальная доза увеличивает мощность взрыва.

Возможный вклад синтеза в общую мощность взрыва небольшой – 15–20 %, и не может быть увеличен. Использование топлива синтеза весьма неэффективно. Эта конструкция имеет такие же ограничения по мощности, как бомбы «чистого» расщепления и усиленные бомбы. Эта конструкция применялась в Советском Союзе и Британии до времени разработки стадийных зарядов, описанных выше. США не разрабатывали подобную конструкцию, поскольку Э. Теллер не считал ее достаточно мощной.

Первое испытание конструкции этого типа было с устройством RDS-6s, известным в США как Joe-4, 12 августа 1953 г. Использование тритиевого допинга позволило достичь 10-кратного повышения мощности заряда по сравнению с мощностью первичного блока, общая мощность взрыва составила 400 кт. Британское устройство Orange Herald Small в испытании Grapple 2 (31 мая 1957 г.) было подобно советскому, но использовался значительно больший первичный блок расщепления (300 кт), и, очевидно, отсутствовала начальная доза трития. Общая мощность взрыва составила 720 кт, усиление первичного заряда – в 2,5 раза. Это, вероятно, самое мощное испытание конструкции данного типа.

Очевидно, что бомбы этой конструкции не стоят на вооружении в пяти ядерных государствах, однако, эта конструкция остается жизнеспособной и может быть привлекательной для других государств, которые не имеют ресурсов, чтобы развить более сложные типы вооружений. Информация, представленная Mordechai Vanunu, указывает, что у Израиля, возможно, есть бомбы этого типа.

Эту конструкцию нужно, вероятно, считать отличной от других классов ядерного оружия. Здесь наблюдается какой-то гибрид: ее можно

отнести к классу усиленных бомб расщепления или к классу одностадийных бомб расщепления-синтеза-расщепления.

Нейтронные бомбы

Нейтронные бомбы, еще называемые “enhanced radiation (ER) warheads”, относятся к термоядерному оружию малой мощности, в котором нейтроны, сгенерированные в ходе реакций синтеза, преднамеренно не поглощаются в материале бомбы и создают высокий нейтронный поток в окрестности взрыва бомбы. Этот интенсивный поток нейтронов высокой энергии – принципиальный разрушительный механизм. Нейтроны, в отличие от других типов излучения, хорошо проникают через многие защитные материалы. Материалы, хорошо защищающие от гамма-лучей, против нейтронов практически не работают. Термин “увеличенная радиация” в данном случае относится именно к процессу взрыва, а не к радиации, вызванной последующим (вторичным) радиоактивным заражением местности.

США развили нейтронные бомбы для использования в качестве стратегического противоракетного оружия и как тактического оружия, применяемого против бронетанковых сил. Противоракетное оружие ER было разработано для защиты американских бункеров МБР от советских боеголовок, путем повреждения ядерных компонентов летящей боеголовки интенсивным нейтронным потоком. Тактические нейтронные бомбы прежде всего предназначены для убийства солдат, которые защищены броней. Бронированные транспортные средства являются чрезвычайно стойкими к разрушению и нагреву, произведенному ядерным взрывом, поэтому эффективный диапазон действия ядерного оружия против танков ограничен радиусом, внутри которого доза радиации смертельна, хотя броня уменьшает и эту дозу. Испуская мощный поток нейтронов, ER-боеголовки увеличивают радиус действия взрыва против бронированных целей.

В использовании радиации как тактического оружия, предназначенного для уничтожения живой силы противника, есть одна проблема: доза облучения, которая является смертельной, может вызвать летальный исход не мгновенно, а в течение какого-то (возможно, длительного) промежутка времени. Дозу облучения 600 рад обычно считают смертельной (это убьет по крайней мере половину из тех, кто подвергнется этому), но в течение первых нескольких часов солдат ничего не ощущает и остается боеспособным. Нейтронные бомбы были разработаны для того, чтобы создать дозу 8000 рад и немедленно вывести людей из строя. 1 кт ER-боеголовка способна уничтожить экипаж танка Т-72 в

диапазоне 690 м от эпицентра, по сравнению с тем, что для «чистой» бомбы расщепления этот радиус составляет 360 м. Смертельный диапазон излучения для незащищенных людей, сформированный тактической нейтронной бомбой, превышает смертельный диапазон, получаемый при взрыве усиленной или термоядерной бомбы.

Нейтронный поток может вызвать значительную кратковременную вторичную радиоактивность вблизи места взрыва. Радиоактивность легированной стали, используемой в танковой броне, может оставаться опасной для жизни в течение 24–48 часов после взрыва. Если танк находился на расстоянии менее 690 м от места взрыва 1 кт нейтронной бомбы (эффективный диапазон для немедленного выведения из строя команды танка) и после взрыва немедленно занят новой командой, новая команда в течение 24 часов получит смертельную дозу радиации.

Современная танковая броня имеет лучшую защиту от ER-боеголовок, чем советские Т-72. Сейчас используются специальные типы брони, которая поглощает нейтроны. Материалы, используемые в составе брони, – борированные пластмассы. Эффективной защитой является использование в роли щита от нейтронов топлива транспортного средства. Некоторые более новые типы брони, подобно броне танка М-1, используют обедненный уран, который активно поглощает нейтроны, но при этом становится очень радиоактивным.

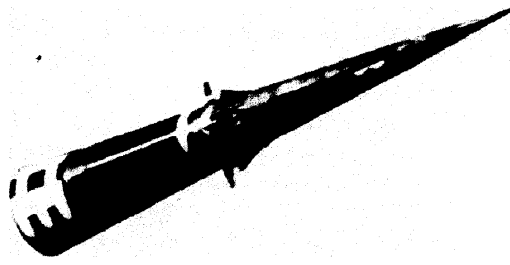
Из-за сильного ослабления энергии нейтронов атмосферой (интенсивность нейтронного потока понижается в 10 раз на 500 м) ER-оружие эффективно только на небольших расстояниях от эпицентра взрыва и, таким образом, обладает невысокой поражающей силой. ER-боеголовки предназначены для минимизации общей энергии взрыва, относительно взрыва нейтронов. Основное предназначение этих бомб – уничтожение вражеских сил, которые находятся неподалеку от своих позиций. Расхожее восприятие нейтронной бомбы: “владелец бомбы” уничтожает живую силу противника, но здания остаются неповрежденными – очень завышено. В эффективном боевом диапазоне (690 м) взрыв от 1 кт нейтронной бомбы уничтожит или максимально повредит почти любое гражданское здание. Таким образом, использование нейтронной бомбы для защиты от вражеского нападения, когда требуется уничтожение большого количества живой силы противника, приведет к уничтожению всех зданий и сооружений в области взрыва.

Нейтронные бомбы (по крайней мере, тактические версии) отличаются от другого термоядерного оружия потому, что газовая смесь трития и дейтерия в этих бомбах – единственное топливо синтеза. Причин для этого две: 80 % энергии в результате (D,T)-термоядерной реакции – это кинетическая энергия испускаемых нейтронов, и вторая причина –

это топливо имеет самый низкий порог, с которого начинается реакция синтеза. Это означает, что для развития взрыва необходимо лишь 20 % энергии синтеза, что нейтронный поток в большей степени состоит из высокоэнергетичных, хорошо проникающих через защиту 14.7 МэВ-ных нейтронов и что для инициирования реакции синтеза необходим очень маленький взрыв расщепления (250–400 тонн). Мощность взрыва при создании равного нейтронного потока при использовании более распространенного топлива – дейтерида лития – была бы намного выше, и, причем, это топливо для начала реакции синтеза потребовало бы более сильного взрыва расщепления. Неудобство использования (D,T)-топлива – тритий очень дорог, и скорость распада трития составляет 5.5 % в год. Все это делает ER-боеголовки более дорогими в изготовлении и сложными в обслуживании, по сравнению с другим тактическим ядерным оружием. Для производства 1 кт нейтронной бомбы требуется 12.5 г трития и 5 г дейтерия.

США разработали и произвели три типа нейтронных боеголовок, четвертая была отменена до момента запуска в производство. На настоящее время все это оружие списано и демонтировано.

- Боеголовка W66 для ракеты Спринт была первая ER-боеголовка. Она изготавливалась в течение 1974-75 гг., и была снята с вооружения через несколько месяцев, в августе 1975 г., после того как от системы Спринт отказались (сделано приблизительно 70 установок). Мощность системы составляла несколько килотонн (сообщалось о 20 кт), и, возможно, в боеголовках использовалось (D,T)-топливо.
- Боеголовка W70 Mod 3 для ракеты Lance имела мощность около 1 кт, 60 % которой определялось синтезом, а 40 % – расщеплением. Разработка производилась в течение 1981-83г., и была остановлена к 1992 г.; построены 380 ракет.
- Боеголовка W79 Mod 0 для 8-дюймового артиллерийского снаряда имела мощность от 100 Т до 1.1 кт. Самое маломощное было чистым оружием расщепления, в наиболее мощном оружии 800 Т определялись синтезом (73 %), а 300 Т-расщеплением. Боеголовка изготавливалась в течение 1981–1986 гг.; в середине 80-х стала сниматься с вооружения, к 1992 г. полностью снята с вооружения; изготовлено 325 боеголовок.
- W82 Mod 0 – ультрасовременный артиллерийский 155 мм снаряд, подобно W79 с варьируемой мощностью боеголовки, был отменен в октябре 1983 г., не входя в производство.



Боеголовка W66 для ракеты Спринт

Советский Союз, Китай и Франция, как известно, также развивали проекты нейтронных бомб и имели их на вооружении. Было много сообщений, что нейтронные бомбы развил Израиль, которому они могли быть полезны в войне, например на Голанских высотах. Но такие бомбы трудны в создании и производстве. Можно сделать вывод, что Израиль фактически приобрел эти бомбы.

Кобальтовая бомба и другие «соленые» бомбы

“Соленое” (радиологическое) ядерное оружие напоминает оружие расщепления–синтеза–расщепления, но оболочка у этого оружия вокруг блока топлива синтеза второй стадии взрыва выполнена не из делящегося материала, а из специально выбранного изотопа (в случае кобальтовой бомбы используется кобальт-59). Эта оболочка захватывает нейтроны синтеза, образуя радиоактивный изотоп, который вместо усиления мощности взрыва, как U-238, распадаясь, максимизирует радиоактивное заражение местности в области проведения взрыва.

С использованием изотопов с различным периодом полураспада могут быть получены различные условия радиоактивного заражения местности. Для краткосрочного заражения (дни) можно использовать золото, для заражения промежуточной продолжительности (месяцы) предпочтительно использовать тантал и цинк, для длительного загрязнения (годы) используется кобальт. Для получения большего эффекта, исходные изотопы должны изобиловать естественным элементом, а получаемые в результате нейтронной эмиссии радиоактивные продукты должны быть мощным источником гамма-квантов высокой энергии.

Идея создания кобальтовой бомбы принадлежит Лео Сцилларду, который в феврале 1950 г. объявил о возможности создания оружия такого типа. Это не было серьезным предложением по созданию такого оружия, а указывало, что возможно создание такого типа оружия, которое способно убить все население Земли (устройство Судного Дня).

Таблица 1.

Константы “соленой” бомбы

Исходный изотоп	Содержание изотопа в естественном элементе	Радиоактивный продукт реакции	Период полураспада
кобальт-59	100 %	Co-60	5.26 лет
золото-197	100 %	Au-198	2.697 дня
тантал-181	99.99 %	Ta-182	115 дней
цинк-64	48.89 %	Zn-65	244 дня

Теоретически, для создания такого оружия, необходим радиоактивный изотоп, который можно рассеять по всему миру прежде, чем он распадется. Такое рассеяние должно занять от нескольких месяцев до нескольких лет, и Co-60 с его периодом полураспада является идеальным кандидатом.

Co-60, как радиологическое оружие гораздо более опасен, чем U-238. Радиоактивное заражение продуктами деления оболочки из U-238 слабее потому, что:

1. многие продукты расщепления имеют очень короткий период полураспада и распадаются таким образом прежде, чем достигнут земли (почвы). Их действие кратковременно;
2. многие продукты расщепления имеют очень большой период полураспада и не производят таким образом интенсивного радиоактивного заражения;
3. некоторые продукты расщепления вообще не радиоактивны.

Полураспад Co-60 достаточно долог, чтобы переждать радиоактивное заражение в убежищах, но все же достаточно короток для создания интенсивного радиоактивного заражения.

Гамма-излучение в первые моменты взрыва бомбы расщепления–синтеза–расщепления намного интенсивнее, чем при взрыве кобальтовой бомбы эквивалентной мощности: в 15 000 раз интенсивнее в течение 1 часа; в 35 раз интенсивнее в течение 1 недели; в 5 раз интенсивнее в течение месяца, и интенсивности становятся равными через 6 месяцев. После этого времени активность при взрыве бомбы с оболочкой из U-238 понижается так быстро, что через год активность, вызванная взрывом кобальтовой бомбы в 8 раз интенсивнее, чем бомбы расщепления, а через 5 лет интенсивнее в 150 раз. Активность изотопов с большим периодом полураспада, произведенных при взрыве бомбы расщепления, сравнивается с активностью кобальтовой бомбы лишь через 75 лет после взрыва.

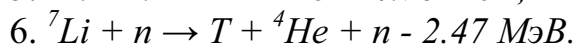
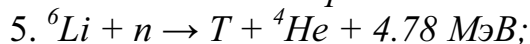
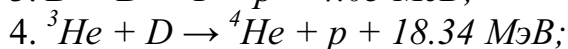
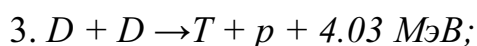
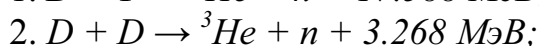
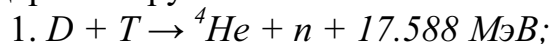
Как дополнительный кандидат на "роль Судного Дня" был предложен цинк. Достоинство цинка-64 в том, что его быстрый распад ведет к большой начальной интенсивности гамма-излучения. Недостатком является то, что изотоп цинк-64 составляет только половину естественного цинка, материал бомбы должен быть или обогащен по изотопу Zn-64, или мощность взрыва будет сокращена наполовину; это более слабый источник гамма-квантов, чем Co-60, производит только одну четверть гамма-квантов относительно такого же количества Co-60; и этот изотоп сильно рассеян по всему миру. При использовании чистого цинка-64 интенсивность гамма-квантов при взрыве была бы вдвое больше, чем кобальта. Активность становится равной через 8 месяцев, а через 5 лет интенсивность кобальтовой бомбы превысит интенсивность цинковой в 110 раз.

В военном отношении радиологическое оружие может быть полезным для создания местных (в противоположность глобальным) и высокоинтенсивных начальных загрязнений. Долговременное загрязнение в этом случае нежелательно. Поэтому короткоживущий цинк лучше подходит для военного применения в таком типе оружия, чем кобальт, но, вероятно, хуже, чем тантал или золото. Как отмечено выше, обычные "грязные" бомбы расщепления-синтеза имеют очень высокую начальную интенсивность гамма-излучения, и поэтому их также нужно считать радиологическим оружием.

Никакая кобальтовая или другая радиологическая бомба когда-либо не проверялась в атмосферных испытаниях и, насколько известно из публичных источников, никогда не изготовлялась. В свете радиологических «возможностей» бомб расщепления-синтеза-расщепления, маловероятно что какое-либо радиологическое оружие специального назначения когда-либо будет развиваться.

Британцы испытывали бомбу, которая включила кобальт как экспериментальный радиохимический индикатор (Antler/Round 1, 14 сентября 1957 г.). Это 1 кт устройство было взорвано на полигоне Tadjе в области Maralinga в Австралии. Эксперимент был расценен как неудачный и больше не повторялся.

Приведем самые важные реакции синтеза, используемые для термоядерного оружия:



[D и T обозначают дейтерон или дейтерий (^2H), и тритон или тритий (^3H), соответственно.]

При температуре, создаваемой при взрыве бомбы расщепления, реакция 1 развивается в 100 раз быстрее, чем следующий самый быстрый кандидат: объединение реакций 2 и 3, которые, в свою очередь, в 10 раз быстрее реакции 4. Скорость реакций 1–4 увеличивается с ростом температуры по экспоненциальному закону, но не пропорционально относительно друг друга. В случае высоких температур скорость реакции 4 начинает превышать скорость реакций 2 и 3. Кроме перечисленных в списке, возможны и другие реакции синтеза между изотопами, но скорости этих реакций слишком низки.

Некоторые дополнительные важные сведения об этих реакциях:

- Энергия нейтрона, произведенного в реакции 1 чрезвычайно высока – 14.06 МэВ, энергия альфа-частицы (ядра ^4He) составляет 3.52 МэВ.
- Энергия нейтрона, произведенного в реакции 2 составляет 2.45 МэВ (подобно наиболее быстрым нейтронам при делении), энергия ^3He составляет 0.82 МэВ. Баланс энергии в реакции 3 – 1.01 МэВ для тритона и 3.03 МэВ для протона. Обе D+D реакции (2 и 3) равновероятны.
- В реакции 4 альфа-частица уносит 3.67 МэВ, протон – 14.67 МэВ.
- Строго говоря, реакции 5 и 6 – не термоядерные реакции. Это – нейтронные реакции, подобны делению, и не требуют высокой температуры или давления, а только нейтронов с энергией нужного диапазона. Однако это различие обычно игнорируется в литературе о ядерном оружии. Для реакции $^6\text{Li} + n$ необходимо, чтобы энергия нейтронов была ниже 1 МэВ. Реакция $^7\text{Li} + n$ начинается только тогда, когда энергия нейтронов превышает 4 МэВ.

1.3. “Ныне физики в почете, но а лирики...”

Физиков катастрофически не хватало. ГКО обязал УСУ Госплана СССР провести учет специалистов-физиков, которые есть в стране. Школьные учителя в число “специалистов” не входили. ГКО распорядился физиков с передовой отправлять в тыл и о каждом из них дать подробную информацию. Оказалось, что в стране 4212 специалистов-физиков. К сожалению, физиков специализирующихся в области атомного ядра среди них не было. ГКО принимает поистине историческое решение: срочно подготовить физиков, которые могут работать в “Атомном проекте”.

Первое распоряжение, которое отдал Л.Берия и которое было моментально выполнено, касалось заключенных физиков. Это касалось не только ученых, но и преподавателей физики. Они были учтены и переведены в “шарашки”. По специальности “физика атомного ядра” в МГУ занималось девять студентов. Ситуация с подготовкой специалистов катастрофическая. 22 октября 1945 г. было принято следующее решение

Членом технического комитета предлагалось в трехдневный срок установить точное количество физиков и специалистов, которые им необходимы, а руководителям, отвечающим за высшее образование, давалось десять дней на исправление недостатков.

В ряде университетов появились спецфакультеты, в которые переводились лучшие студенты со всех факультетов. Тогда и появилась крылатая фраза: “ныне физики в почете, но а лирики в загоне...”

Объекты атомного ведомства начали пополняться наиболее перспективными выпускниками лучших вузов страны (МГУ, ЛГУ, МФТИ, МИФИ, МЭИ, МВТУ, СПИ, ТПИ).

Покажем на примере физико-технического факультета Томского политехнического института, как решалась эта важная кадровая проблема.

Физико-технический факультет

Физико-технический факультет (ФТФ) в ТПИ был открыт в 1950 году по приказам Совета министров и Министерства высшего образования СССР. Выбор Томска определили две основные причины. В Западной Сибири было начато строительство крупнейших предприятий атомной энергопромышленности, для работы на которых были необходимы высококвалифицированные специалисты. А старейший в Сибири технический вуз имел высокую репутацию кузницы кадров и был широко известен своими научными школами. Перед ФТФ были поставлены две основные задачи – подготовка кадров и активное участие в научно-технологических разработках атомной отрасли.

Поэтому не случайно, в 1949 году был основан СХК, а в 1950 году – произведен первый набор студентов на ФТФ ТПИ. Уже в следующем году состоялся первый выпуск. Дело в том, что поначалу студентов набирали не только на первый курс, но и переводили с других факультетов. Брели только отличников. Только лучших. Да и в дальнейшем поступить на физтех было делом чрезвычайно сложным: даже сданные на все пятерки экзамены не давали стопроцентной гарантии на зачисление.

За прошедшие 55 лет ФТФ подготовил более 7000 специалистов для атомной энергетики и промышленности. Практически нет ни одного

предприятия или научной организации России и других стран бывшего СССР, работающих в атомной промышленности, где бы не трудились выпускники ФТФ. Инженерный и руководящий корпус предприятий Сибирского и Среднеазиатского региона, а также АЭС европейской части РФ в значительной мере укомплектован нашими выпускниками.

Являясь единственным факультетом данного профиля на азиатской территории Стран независимого содружества, ФТФ обеспечивает подготовку высококвалифицированных кадров для всего комплекса предприятий ядерного топливного цикла. ФТФ готовит специалистов для предприятий, на которых добывают уран, получают рудные концентраты, обогащают топливо, изготавливают тепловыделяющие элементы и изделия из делящихся материалов. Наши выпускники эксплуатируют блоки АЭС и транспортные ядерно-энергетические установки, перерабатывают облученное топливо, хранят радиоактивные отходы.

В настоящее время факультет объединяет пять кафедр, которые готовят инженеров по семи специальностям:

- кафедра «Физико-энергетические установки» выпускает инженеров по двум специальностям «Ядерные реакторы и энергетические установки», «Безопасность и нераспространение ядерных материалов»;
- кафедра «Прикладная физика» готовит инженеров по двум специальностям: «Ядерная физика» и «Радиационная безопасность человека и окружающей среды»;
- кафедра «Техническая физика» готовит инженеров по специальности «Физика кинетических явлений»;
- кафедра «Электроника и автоматика физических установок» выпускает инженеров по специальности с тем же названием;
- кафедра «Химическая технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов» выпускает инженеров по двум специальностям: «Химическая технология редких элементов и материалов на их основе» и «Химическая технология материалов современной энергетики».

«Безопасность и нераспространение ядерных материалов» – новая специализация кафедры ядерных реакторов и энергетических установок, набор на которую начался в сентябре 2002 г. Актуальность одноименной проблемы ядерные державы (в первую очередь это Россия и США) осознали достаточно давно, и недаром в минувшем году Генеральный секретарь ООН Коффи Ананд в своем выступлении на 57-й сессии Генеральной Ассамблеи сделал вывод: «Необходимость образо-

вания и повышения квалификации в области разоружения и нераспространения никогда не была столь велика, как сейчас».

Так сложилось исторически, что изначально все атомные программы в мире были рассчитаны только на войну. Все силы и средства были брошены на эту главную задачу, и спасибо Курчатову, что он показал, что атомную энергию можно использовать не только разрушения, но и для созидания: построил первую в мире атомную электростанцию. Понятное дело, что и первые наши атомные электростанции тоже оставались «заложницами военных», их главной задачей оставалось производство плутония, а электроэнергия была лишь побочным продуктом, отсюда проистекала и их неэкономичность и другие недостатки. Однако, с течением времени, ситуация на планете менялась в сторону потепления международных отношений, атомщики служили уже не только войне, но и мирной энергетике, и, в конце концов, мир пришел к совсем другой (можно сказать, диаметрально противоположной) ситуации, когда атомную энергию необходимо использовать только в мирных целях, а накопленное оружие, наоборот, утилизировать или хотя бы хранить. Естественно, что вместе со всеми этими изменениями задач, стоящих перед отечественной атомной отраслью, менялись и требования к персоналу атомных производств, а следовательно, и к процессу его обучения. Разумеется, что происходило это не сразу, а постепенно, в течение многих лет.

Широкий спектр научных исследований, выполняемых коллективом преподавателей и сотрудников факультета, объединен фундаментальными и прикладными проблемами ядерной и термоядерной физики. Научные достижения факультета подтверждаются патентами, монографиями, научными изданиями и активным научно-техническим сотрудничеством с различными зарубежными вузами и организациями.

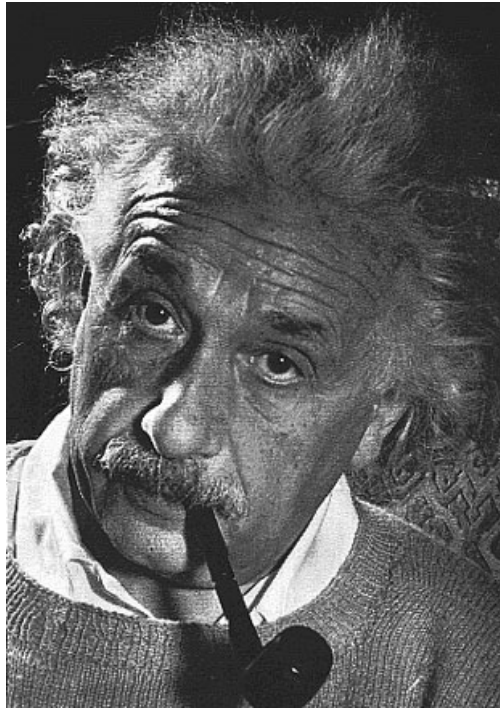
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гровс Л. Теперь об этом можно рассказать. – М.: Атомиздат, 1964.
2. Юнг Р. Ярче тысячи солнц. – М.: Атомиздат, 1961.
3. Харитон Ю.Б., Смирнов Ю.И. – Изд-во: Энергия, 1993. – № 9.
4. Круглов А.К. – Изд-во: Энергия, 1994. – № 9.
5. Круглов А.К. Как создавалась атомная промышленность в СССР. – Москва. ЦНИИ АТОМИНФОРМ, 1995.
6. Бомба, студия НЕКОС. – Изд-во: Москва, 1993.

7. Губарев. Белый архипелаг Сталина. – Москва. Молодая гвардия, 2004.
8. Харитон Ю.Б., Смирнов Ю.Н. Мифы и реальность советского атомного проекта. – Арзамас-16 РФЯЦ, 1994.
9. 50-летие физико-технического образования в Сибири. Томский физико-технический: история, воспоминания, традиции. – г. Томск, Изд-во: ТПУ, 2000.
10. Действие ядерного взрыва. – Москва, Изд-во “Мир”, 1971.
11. Ради мира на Земле. – Томск, Изд-во: “Янсон”, 1999.
12. Феоктистов А. Оружие, которое себя исчерпало. – Москва, 1999.
13. Жежерун И.Ф. Строительство и пуск первого в СССР атомного реактора. – М.: Атомиздат, 1978.
14. Создание русской бомбы. От Сталина до Ельцина. – Вестью Пресс Боулдер Сан-Франциско Оксфорд.
15. <http://nuketesting.enzizoweb.ozq/hew/>
16. <http://qawain.membzone.com/hew/>
17. <http://www-ing.rau.as.za/>
18. Колдобский А., Насонов В. Вокруг атомной энергии: правда и вымыслы. – М.: МИФИ, 2002.
19. Ядерное разоружение, нераспространение и национальная безопасность. – Саров-Москва: Институт стратегической стабильности, ВНИИ ЭФ. – 2001.
20. Бюллетень по атомной энергии. –2005, № 8.
21. Как Россия перехаритонила Америку. – Известия. 28 февраля 2004.
22. Атомный проект СССР: Документы и материалы в 3-х т. /под общей ред. Л. Рябева. – М.: Наука Физматлит, 1998.
23. Круглов А.К. Штаб Атомпрома. – М. ЦНИИ атоминформ, 1998.
24. Атомная наука и техника СССР/под общей ред. А.М. Петросьянца. – М.: Энергоатомиздат, – 1987.
25. Ядерный доклад. М: Центр “Карнеги”. – М., 2002. – Вып.6.
26. Кузнецов В.М. Ядерная опасность. – М.: Изд. ЭПИцентр, 2003.
27. Семипалатинский полигон (создание, деятельность, конверсия). – Алма-Аты. – 2003.

ПРИЛОЖЕНИЯ

АМЕРИКАНСКИЙ АТОМНЫЙ ПРОЕКТ



Альберт Эйнштейн

Выдающийся немецкий физик, лауреат Нобелевской премии 1921 года



Генерал-майор Лесли Гровс

Директор Манхэттенского проекта по созданию атомной бомбы



Роберт Оппенгеймер
Директор Лос-Аламосской лаборатории



Лео Сциллард
*Венгерский физик, один из инициаторов работ
по созданию атомной бомбы в США*



Нильс Бор

*Выдающийся датский физик, лауреат Нобелевской премии 1922 года,
участник Манхэттенского проекта*

СОВЕТСКИЙ АТОМНЫЙ ПРОЕКТ



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ОБОРОНЫ СССР ПОСТАНОВЛЕНИЕ N 9887

от 20 августа 1945 г.
Москва, Кремль

Государственный Комитет Оборонн постановляет:

... 4. Для непосредственного руководства научно-исследова-
тельскими, проектными, конструкторскими организациями и
промышленными предприятиями по использованию внутриатомной
энергии урана и производству атомных бомб организовать при
СНК СССР Главное Управление - "Первое Главное Управление
при СНК СССР", подчинив его Специальному Комитету при ГКО.

Председатель Государственного
Комитета Оборонн

И. Сталин И. Сталин

*** РАССЕКРЕЧЕНО ***
Служба внешней разведки РФ 10

РАСРЕЗВЕННО-СЕКРЕТНО
100
80

6858/м
18/а

Товарищу БЕРИЯ Л.П.

При этом направляю сообщение о конструкции атомной бомбы, составленное на основании агентурных материалов, полученных от НКГБ СССР.

Приложение: на "7" страницах.

(МЕРКУЛОВ В.Н.)

отп. 4 экз.
1-тов. Берия
2-Сек.-т НКГБ СССР
3-4-в дела 1 УИР НКГБ
исп. Семенов, 11 отп. 1 УИР НКГБ
печ. Бушуева в. 10 18.X.45

Фрагменты рассекреченных документов по урановому проекту, добытые советской разведкой. Из архива НКВД-МГБ-КГБ СССР



КУРЧАТОВ ИГОРЬ ВАСИЛЬЕВИЧ (1903–1960). Трижды Герой Социалистического Труда (1949, 1951, 1954), лауреат Ленинской (1956) и четырех Государственных (1942, 1949, 1951, 1953) премий СССР. Академик АН СССР (1943). Родился в г. Сим Челябинской области. Физик. Окончил физико-математическое отделение Крымского университета. С октября 1925 г. работает в Ленинградском физико-техническом институте. С декабря 1932 г. – заместитель А.Ф. Иоффе в особой группе по ядру, ведет широкие исследования в области ядерной физики. С начала Великой Отечественной войны занимается вопросами защиты кораблей от магнитных мин, а также создания брони для танков. Осенью 1942 г. приступает, а с февраля 1943 г. становится научным руководителем прерванных войной работ по Атомному проекту и возглавляет Лабораторию N 2 АН СССР (с 1956 г. – Институт атомной энергии). С августа 1945 г. – член Специального Комитета при ГОКО СССР и заместитель председателя Технического совета Спецкомитета, с 1949 г. по 1960 г. – председатель Научно-технического совета ЛГУ при СМ СССР, Минсредмаша СССР. Под его руководством осуществлена разработка советского атомного и термоядерного оружия, заложены основы современной ядерной и термоядерной энергетики, сделаны открытия мирового уровня в области управляемого термоядерного синтеза, созданы ведущие научные школы физиков, получило широкое развитие международное сотрудничество в области мирного использования атомной энергии.



СЛАВСКИЙ ЕФИМ ПАВЛОВИЧ (1898–1991). Трехжды Герой Социалистического Труда (1949, 1954, 1962), лауреат Ленинской (1980) и трех Государственных (1949, 1951, 1984) премий СССР. Родился в г. Макеевке Донецкой области (Украина). Инженер-металлург. Участник Гражданской войны. После окончания Московского института цветных металлов и золота работал в алюминиевой промышленности. В 1946 г. переведен из Наркомата цветной металлургии СССР, где работал заместителем Наркома – начальником Главалюминия, в Первое главное управление при СМ СССР. Работая заместителем, первым заместителем начальника Первого главного управления при СМ СССР (1946–1947, 1949–1953), главным инженером - заместителем директора Комбината N 817 (1947–1949), заместителем, первым заместителем Министра среднего машиностроения СССР (1953–1957), начальником Главного управления по использованию атомной энергии при СМ СССР (1956–1957, Министром среднего машиностроения СССР (1957–1963, 1965–1986), председателем Государственного комитета по среднему машиностроению СССР (1963–1965), внес большой вклад в развитие отрасли. Под его руководством и при его непосредственном участии развивалась атомная наука и техника в СССР и странах Восточной Европы и Азии укреплялся ядерный щит страны, вводились в строй атомные электростанции и установки различного назначения, разрабатывались уникальные технологии по добыче урана, золота, производству минеральных удобрений, применению изотопов в медицине, сельском хозяйстве и других отраслях народного хозяйства, возводились новые современные атомграды.



АЛЕКСАНДРОВ АНАТОЛИЙ ПЕТРОВИЧ (1903–1994) Трижды Герой Социалистического Труда (1954, 1960, 1973), лауреат Ленинской (1959) и четырех Государственных (1942, 1949, 1951, 1953) премий СССР. Академик АН СССР (1953). Родился в г. Тараца Киевской области (Украина). Физик. Окончил Киевский университет. До 1943 г. работал в Ленинградском физико-техническом институте. В годы Великой Отечественной войны руководил работами по противоминной защите кораблей. К работам по Атомному проекту привлечен в 1943 г. Являясь директором Института физических проблем АН СССР, заместителем начальника Лаборатории № 2 АН СССР, а затем директором Института атомной энергии им. И.В. Курчатова, внес значительный вклад в развитие атомной науки и техники, в разработку термодиффузионного метода разделения изотопов урана, в создание ядерных реакторов для атомных электростанций, современного атомного подводного и ледокольного флотов страны. Его исследования эластичности и прочности резин и пластификации полимеров стали важным вкладом в решение проблемы получения высококачественных синтетических каучуков и пластмасс. Создатель школы физиков-ядерщиков. С 1961 по 1988 гг. – председатель НТС Минсредмаша СССР. В 1975–1986 гг. – президент АН СССР



ЩЕЛКИН КИРИЛЛ ИВАНОВИЧ (1911–1968). Трижды Герой Социалистического Труда (1949, 1951, 1954), лауреат Ленинской (1958) и трех Государственных (1949, 1951, 1953) премий СССР. Член-корреспондент АН СССР (1953). Родился в г. Тбилиси (Грузия). Физик. Окончил Симферопольский педагогический институт. В предвоенные годы и в годы Великой Отечественной войны, работая в институте химической физики АН СССР, занимался вопросами физики горения и взрыва. Проведенные им исследования турбулентности с пламенем, выяснение ее роли в возникновении детонации, установлении зависимости скорости детонации в трубах от степени обработки стенок заставили пересмотреть классическую теорию детонации. К работам по Атомному проекту привлечен в 1946 г. Являясь заместителем Ю.Б. Харитона в КБ-11 в г. Арзамас – 16 (Всероссийский ядерный центр "ВНИИЭФ", г. Кремлев), с 1955 г. – главным конструктором и научным руководителем дублера КБ-11 в г. Челябинск-70 (Всероссийский ядерный центр "ВНИИЭФ", г. Снежинск), принимал непосредственное участие в экспериментах по отработке взрывных систем и устройств автоматики для советского ядерного и термоядерного оружия. Участвовал в подготовке к взрыву в 1949 г. первой советской плутониевой бомбы на Семипалатинском полигоне.



ВАННИКОВ БОРИС ЛЬВОВИЧ (1897–1962). Трижды Герой Социалистического Труда (1942, 1949, 1954), лауреат двух Государственных (1951, 1953) премий СССР. Генерал-полковник инженерно-артиллерийской службы. Родился в г. Баку (Азербайджан). Инженер-механик. Участник Гражданской войны. Окончил Московское высшее техническое училище им. Н.Э. Баумана. С 1933 г. – в оборонной промышленности: директор Тульского и Пермского оружейных заводов, начальник Главного мобилизационного управления Наркомата тяжелой промышленности СССР, заместитель Наркома оборонной промышленности СССР, Нарком вооружений СССР. С июля 1941 г. – заместитель Наркома вооружений СССР, а затем Нарком боеприпасов СССР. В августе 1945 г. назначается заместителем председателя Специального комитета при ГОКО СССР и одновременно возглавляет Первое главное управление при СНК СССР. С 1953 по 1958 гг. – первый заместитель Министра среднего машиностроения СССР. В 1945–1949 гг. – председатель Технического совета Спецкомитета, Научно-технического совета ПГУ при СМ СССР. Под его руководством созданы первые атомные научные и промышленные центры страны, проведены разработка и успешные испытания ядерного оружия, заложены основы использования ядерных технологий для выработки электроэнергии, в медицинских и иных народно-хозяйственных целях.



ДУХОВ НИКОЛАЙ ЛЕОНИДОВИЧ (1904–1964). Трижды Герой Социалистического Труда (1945, 1949, 1954), лауреат Ленинской (1960) и пяти Государственных (1943, 1946, 1949, 1951, 1953) премий СССР. Член-корреспондент АН СССР (1953). Генерал-лейтенант инженерно-технической службы. Родился в деревне Веприк Полтавской области (Украина). После окончания Ленинградского политехнического института – конструктор Кировского завода. В годы Великой Отечественной войны под его руководством разработаны и поставлены на серийное производство танки ИС (ИС-2 был признан лучшим тяжелым танком Второй мировой войны). К решению задач создания ядерного оружия привлечен в 1948 г. В качестве заместителя научного руководителя и главного конструктора КБ № 11 в г. Арзамас-16 (Всероссийский ядерный центр "ВНИИЭФ", г. Кремлев), а с 1954 г. – директора, научного руководителя и главного конструктора филиала № 1 КБ-11 (Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова) – возглавлял работы по созданию ядерных и термоядерных зарядов, систем подрыва ядерных зарядов, приборов автоматики и контрольно-стендовой аппаратуры. В 1949 г. руководил сборкой и монтажом плутониевой бомбы. Один из разработчиков ядерного боеприпаса для первой советской межконтинентальной баллистической ракеты.



САХАРОВ АНДРЕЙ ДМИТРИЕВИЧ (1921–1989). Трижды Герой Социалистического Труда (1954, 1956, 1962), лауреат Ленинской (1956) и Государственной (1953) премий СССР, Нобелевской премии мира (1975). Академик АН СССР (1953). Родился в г. Москве. Физик. Окончил Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. В годы Великой Отечественной войны – инженер на военном заводе. К работам по Атомному проекту привлечён в 1948 г., являясь сотрудником научно-исследовательской группы И.Е. Тамма, а затем заместителем научного руководителя КБ-11 в г. Арзамас-16 (Всероссийский ядерный центр «ВНИИЭФ», г. Кремлев), более 20 лет занимался вопросами разработки термоядерного оружия. Под его непосредственным руководством созданы и испытаны первая (1953) и самая мощная в мире (1961) водородные бомбы. Один из инициаторов заключения Московского договора 1963 г. о запрещении испытаний ядерного оружия в трёх сферах (в атмосфере, воде и космосе). Идеи и работы А.Д. Сахарова по проблемам мюонного ядерного катализа и нестабильности протона, по созданию сверхсильных магнитных полей, в области гравитации и космологии, управляемой термоядерной реакции успешно реализуются сегодня многими научными центрами мира.



ЗЕЛЬДОВИЧ ЯКОВ БОРИСОВИЧ (1914–1987). Трѳжды Герой Социалистического Труда (1949, 1953, 1956), лауреат Ленинской (1956) и четырёх Государственных (1945, 1949, 1954, 1956) премий СССР. Академик АН СССР (1958). Родился в г. Минске (Белоруссия). Физик. По окончании 3-го курса защитил кандидатскую диссертацию в Ленинградском университете. В 1931 г. начал работать в Институте химической физики АН СССР. В 1939 г. совместно с Ю.Б. Харитоном сделал расчёт цепной ядерной реакции деления урана. В начале Великой Отечественной войны развил теорию горения пороха в реактивных снарядах, что сыграло важную роль в повышении боевой мощноти «Катюш». К работам по Атомному проекту привлечён в 1942 г. В КБ-11 в г. Арзамас-16 (Всероссийский ядерный центр «ВНИИЭФ», г. Кремлев), возглавил отдел по созданию ядерных зарядов из полученных на предприятиях Южного и Северного Урала делящихся материалов плутония-239 и урана-235. Внёс большой вклад в развитие теории гомогенных реакторов на тепловых нейтронах и в теорию резонансного поглощения нейтронов ядрами урана-238, предсказал мюонный катализ, получил фундаментальные результаты в области астрофизики и космологии.



ХАРИТОН ЮЛИЙ БОРИСОВИЧ. Трижды Герой Социалистического Труда (1949, 1951, 1954), лауреат Ленинской (1956) и трёх Государственных (1949, 1951, 1953) премий СССР. Академик АН СССР (1953). Родился в 1904 г. в г. Санкт-Петербурге. Физик и физикохимик. Окончил Ленинградский политехнический институт. Стажировался в Англии в лаборатории Э. Резерфорда. Работал в Ленинградском физико-техническом институте у А.Ф. Иоффе, а затем в Институте химической физики у Н.Н. Семёнова. Совместно с Я.Б. Зельдовичем сделал в 1939 г. расчёт цепной ядерной реакции деления урана. В годы Великой Отечественной войны участвовал в работах по боевому использованию суррогатированных взрывчатых веществ. К работам по Атомному проекту привлечён в 1942 г. В качестве научного руководителя и главного конструктора КБ-11 в г. Арзамас-16 (Всероссийский ядерный центр «ВНИИЭФ», г. Кремлев) осуществлял теоретическую проработку и координацию научно-исследовательских и конструкторских работ по созданию ядерных боеприпасов в СССР. Первая плутониевая (1949) и первая атомная (1951) бомбы, созданные под его руководством и при его непосредственном участии, покончили с монополией США на ядерное оружие. Внёс большой вклад в интеграцию усилий учёных по использованию атомной энергии только в мирных целях.

ГЕРМАНСКИЙ АТОМНЫЙ ПРОЕКТ

По мнению Л.Гровса, работы в области атомной энергии в Германии не вышли из лабораторной стадии, при этом сами немецкие физики считали, что создание атомного оружия вряд ли осуществимо.



Лизе Мейтнер

В 1938 г. вместе с О.Фишером открыла деление урана



Вернер Гейзенберг

*Немецкий физик, лауреат Нобелевской премии 1932 года,
один из руководителей немецкого атомного проекта*



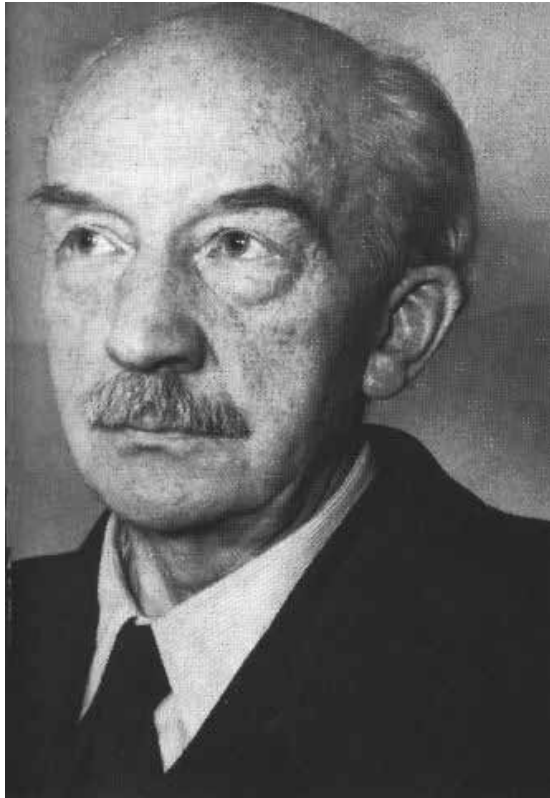
Макс фон Лауэ

Немецкий физик, лауреат Нобелевской премии 1914 года



Отто Ганн

Немецкий физик, лауреат Нобелевской премии 1945 года



Вальтер Боте

Немецкий физик, лауреат Нобелевской премии 1954 года

АТОМНЫЙ ПРОЕКТ ВЕЛИКОБРИТАНИИ

Английское правительство приняло окончательное решение о создании ядерного оружия в январе 1947 года.

3 октября 1952 года была взорвана первая английская плутониевая атомная бомба. Создание атомной бомбы обошлось Англии в 150 млн. фунтов стерлингов. Значительный опыт и знания английские специалисты приобрели в США в рамках работы над Манхэттенским проектом.



Джон Кокрофт

Английский физик, лауреат Нобелевской премии 1951 года



Джеймс Чэдвак
Английский физик, лауреат Нобелевской премии 1953 года



Рудольф Пайерлс
Немецкий физик



Кlaus Fuchs
Немецкий физик



Otto Frisch
Австрийский физик

АТОМНЫЙ ПРОЕКТ ФРАНЦИИ

В конце 1956 года было принято окончательное решение о создании ядерного оружия.

13 февраля 1960 года в пустыне Сахара Франция провела первое ядерное испытание.



Фредерик Жолио-Кюри

Французский физик, лауреат Нобелевской премии 1934 г.



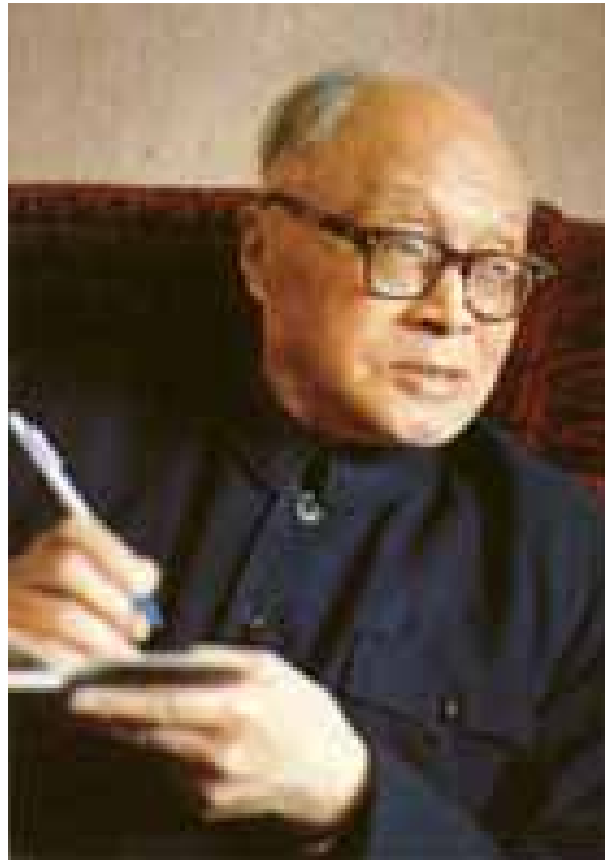
Франсуа Перрен

Французский физик.

КИТАЙСКИЙ АТОМНЫЙ ПРОЕКТ

16 октября 1964 года – успешное испытание первой атомной бомбы на основе высокообогащенного урана.

27 декабря 1968 года – испытание термоядерного заряда, в котором использовался плутоний. По оценкам различных специалистов помощь СССР в атомной области позволила Китаю существенным образом ускорить создание ядерного оружия.



***Ван Гань-чан**
Китайский физик*



***Пан Хуань-у**
Китайский физик*



***Чжу Гуан-я**
Китайский физик*



Чэн Цзя-сянь
Китайский физик

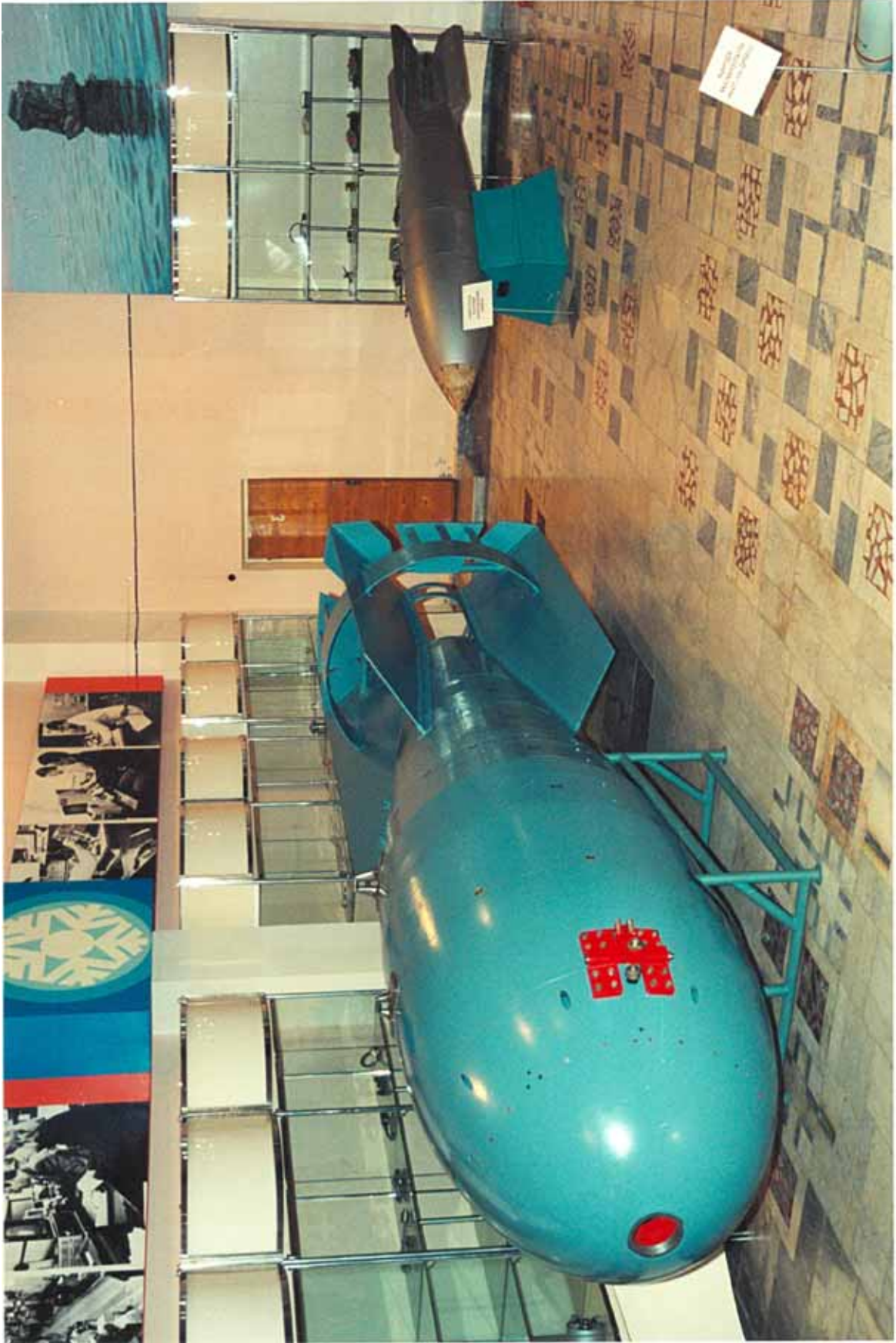


Чен Кай-цзя
Китайский физик



Го Юн-хуай
Китайский физик







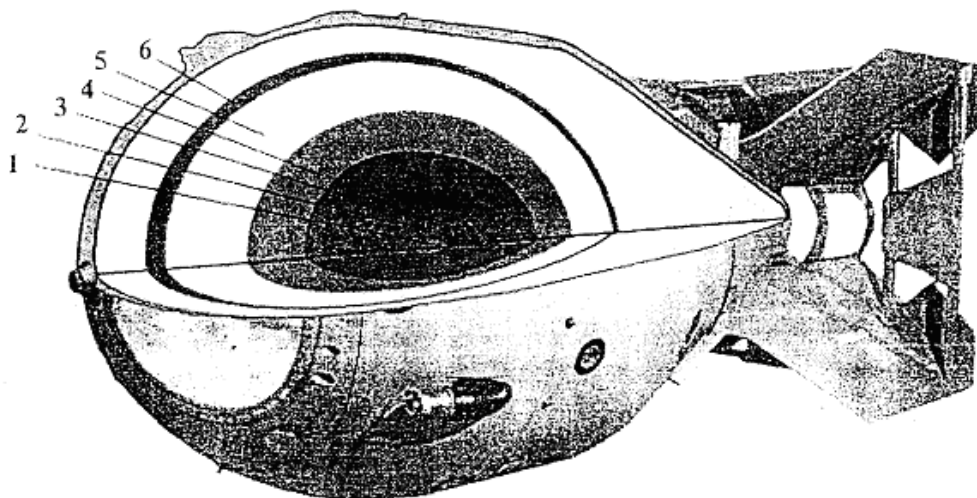






ОБ УСТРОЙСТВЕ АТОМНОЙ БОМБЫ

Принципиальная схема первой советской атомной бомбы, являвшейся аналогом американской атомной бомбы Fat Man, изображена на рисунке.



*Схема советской атомной бомбы:
1 – нейтронный инициатор;
2 – делящийся материал – плутоний;
3 – металлический уран-238;
4 – алюминий;
5 – взрывчатое вещество и
фокусирующая система;
6 – дюралюминиевый корпус.*

Приведем некоторые характеристики американской атомной бомбы, содержащиеся в письме, направленном Л.П. Берии 18 октября 1945 года Наркомом Госбезопасности В.Н. Меркуловым. По агентурным материалам НКГБ СССР американская атомная бомба представляла собой снаряд грушевидной формы с максимальным диаметром 127 см. длиной (со стабилизатором) 325 см и массой около 4500 кг.

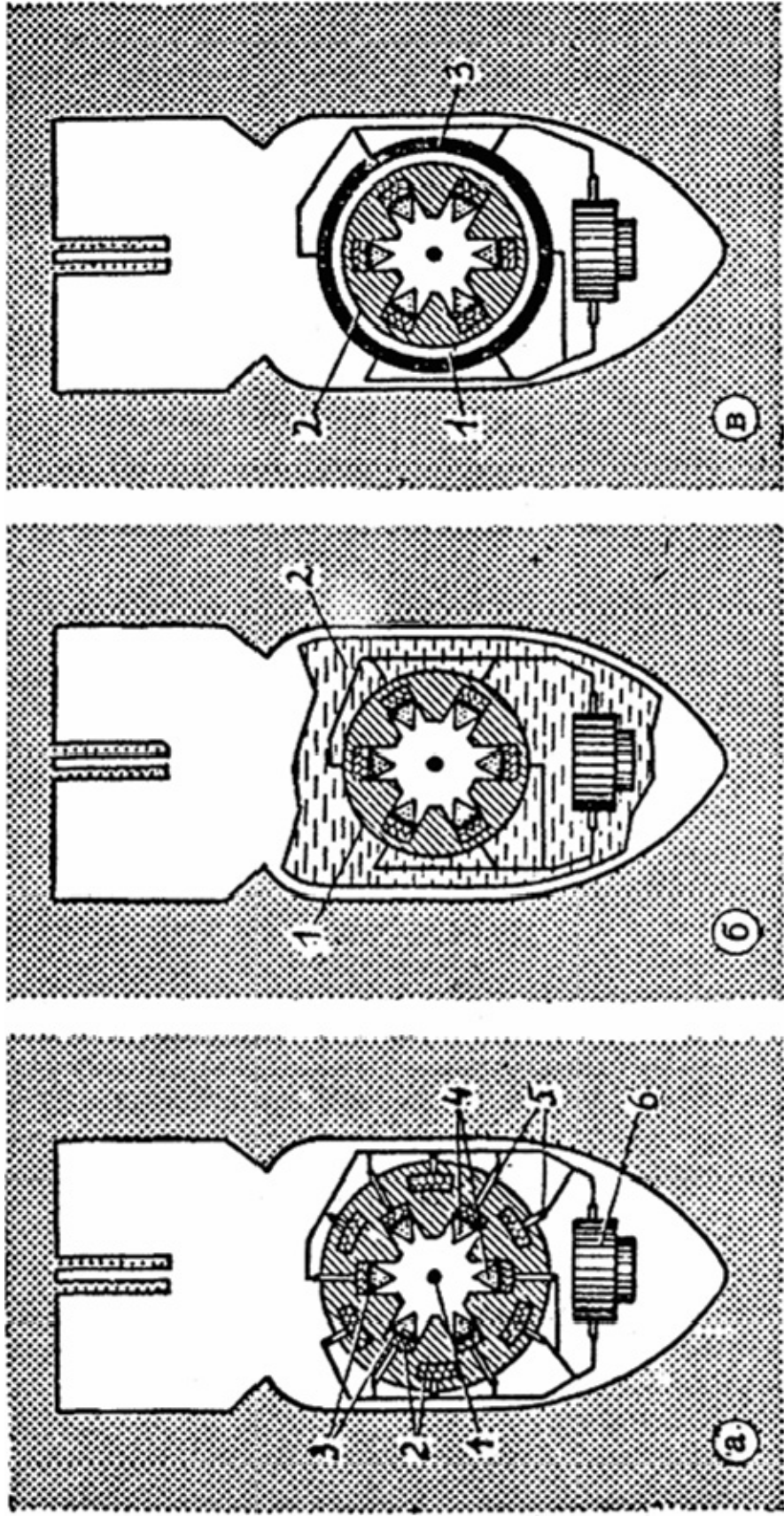
Нейтронный инициатор представлял собой полоний-бериллиевую систему с радиусом 10 мм. Общее количество полония составляло 50 Ки.

Делящимся материалом бомбы являлась δ -фаза плутония с удельным весом $15,8 \text{ г/см}^3$. Внешний диаметр плутониевого шара составлял 80–90 мм.

Плутониевое ядро находилось внутри полого шара из металлического урана с внешним диаметром 230 мм. Наружная граница урана была покрыта слоем бора.

Металлический уран размещался внутри алюминиевой оболочки, представлявшей собой полый шар с наружным диаметром 460 мм.

За слоем алюминия располагался слой взрывчатого вещества с фокусирующей линзовой системой из 32 блоков специальной формы. Общая масса взрывчатого вещества составляла около 2 тонн.



Принципиальные схемы бомб: а — атомной; 1 — источник нейтронов, 2 — обычное взрывчатое вещество, 3 — отражатель нейтронов, 4 — делящееся вещество, 5 — детонаторы, 6 — взрывное устройство; б — термоядерной (водородной); 1 — атомный заряд детонатор (атомная бомба того же устройства что и на рис. а), 2 — смесь дейтерия и трития; в — ядерной типа деление-синтез-деление; 1 — дейтерид лития, 2 — атомный заряд-детонатор (как на рис. б), 3 — ^{238}U .

ПРИКАЗ
ПО МИНИСТЕРСТВУ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР

X 2032
19-7-50г.

~~Сов. секретно
(Особая папка)
экз. № 2~~

Об организации физико-технического факультета при
Томском политехническом институте им. С.М. Кирова

В соответствии с решением Совета министров СССР от 7 мая 1949 года № 1846-673сс - приказываю:

1. Директору Томского политехнического института тов. Воробьеву:

1/ открыть с 1 сентября 1950 года физико-технический факультет в составе специальностей:

- а/ электрофизические установки,
- б/ химическая технология редких и радиоактивных элементов;
- в/ геология и разведка редких и радиоактивных элементов;
- г/ разработка месторождений редких и радиоактивных элемен-

тов.

2. Организовать на физико-техническом факультете кафедры, обеспечивающие подготовку студентов по указанным специальностям:

- а/ кафедра электрофизических установок,
- б/ кафедра автоматизации установок ядерной техники и технической электроники,
- в/ кафедра теоретической физики,
- г/ кафедра химической технологии редких и радиоактивных элементов,
- д/ кафедра геологии и разведки редких и радиоактивных элементов,
- е/ кафедра разработки месторождений редких и радиоактивных элементов.

3. Обеспечить прием студентов на первый курс физико-технического факультета в 1950 году по одной учебной группе на каждую специальность, всего на факультет в количестве 100 человек.

К 1 сентября 1950 года укомплектовать группы старших курсов специальности "Электрофизические установки" за счет перевода

студентов с электрофизической специальности и с других специальностей института.

4. Распространить на студентов и аспирантов физико-технического факультета с 1 сентября 1950 года порядок выплаты стипендий, предусмотренных Постановлением Совета министров СССР № 303-104сс от 20 января 1949 года.

II. Начальнику отдела труда и зарплаты т. Пантелееву с 1 сентября 1950 года утвердить штаты деканата и кафедр физико-технического факультета.

III. Начальнику Управления капитального строительства т. Аверьянову обеспечить к 14 ноября 1950 года представление проектно-сметной документации по строительству 4-го учебно-лабораторного корпуса и жилого дома для научных работников Томского политехнического института и финансирование окончания их строительства в течение 1951 года.

IV. Начальнику Главного управления политехнических вузов т. Ирокошину и начальнику Управления капитального строительства т. Аверьянову обеспечить соответствующими ассигнованиями строительство учебного корпуса и оборудование лабораторий физико-технического факультета в 1951 году.

МИНИСТР ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
СССР

С. КАФТАНОВ

Верно! Влепечко

отп. 2 экз
МК № 493-оп

ЗТ

Таблица 2

**Основные данные в истории ядерных испытаний США, СССР,
Великобритании, Франции и Китая**

Событие в истории ядерных испытаний	Даты и характеристики ядерных испытаний стран «ядерного клуба»				
	США	СССР	Великобритания	Франция	Китай
Первое испытание	16.07.1945г.	29.08.1949г.	03.10.1952г.	13.02.1960г.	16.10.1964г.
Первое воздушное испытание (сброс бомбы с самолета)	06.08.1945г.	18.10.1951г.	11.10.1956г.	19.07.1966г.	14.05.1965г.
Первое испытание мощного двух-стадийного термоядерного заряда	28.02.1954г.	22.11.1955г.	28.04.1958г.	24.08.1968г.	17.06.1967г.
Последнее испытание в атмосфере	09.06.1963г.	25.12.1962г.	23.09.1958г.	14.09.1974г.	16.10.1980г.
Первое подземное испытание	29.11.1951г.	11.10.1961г.	01.03.1962г.	07.11.1961г.	23.09.1969г.
Последнее испытание	23.09.1992г.	24.10.1990г.	26.11.1991г.	27.01.1996г.	29.07.1996г.
Общее количество испытаний	1032*	715	45	210	47
Суммарная мощность испытаний в атмосфере, Мт	153,8	246,3	8,1	10,1	20,7
Суммарная мощность испытаний в атмосфере по делению, Мт	67,9	65,7	5,5	6,4	10,3
Доля суммарной мощности испытаний в атмосфере по делению от общей мощности, %	44	27	68	63	50

* Без учета ядерных испытаний Великобритании на Невадском испытательном полигоне США государства – члены «ядерного клуба» провели в различных природных средах всего 2049 ядерных испытаний.

Индия

18.05.74 – первое индийское ядерное испытание, энерговыделение – от 10 до 20 кг.

11.05.98 – три ядерных взрыва с общим энерговыделением около 60 кг в одном ядерном испытании.

13.05.98 – два ядерных взрыва с общим энерговыделением не более 1 кг в одном ядерном испытании.

Пакистан

28.05.98 – первое ядерное испытание Пакистана со взрывом от 2 до 5 ядерных зарядов и общим энерговыделением около 40–50 кг.

30.05.98 – второе ядерное испытание Пакистана с энерговыделением около 20 кг.

Ядерные испытания Индии и Пакистана относятся к классу подземных ядерных испытаний.

Таким образом, по состоянию на 2000 год семь государств мира обладают ядерным оружием. К их числу относятся США, Россия, Великобритания, Франция, Китай, Индия и Пакистан. По неофициальным данным, атомным оружием в количестве 100–200 боезарядов располагает Израиль.

Таблица 3

Сводные данные о проведенных США ядерных испытаний
в атмосфере и под водой

Район проведения испытаний	Год проведения	Количество	Суммарная мощность, МВт
Первое испытание в штате Нью-Мексико	1945	1	0,021
Япония (боевое применение ядерного оружия)	1945	2	0,036
Авиабазы Неллис (штат Невада)	1951–1953	5	0,025
Невадский полигон	1951–1963	100	1,05
Акватория Тихого океана	1958–1962	4	0,08
Атлантический океан	1958	3	0,035
Полинезия			
Атолл Бикини	1946–1958	23	76,8
Атолл Эниветок	1948–1958	43	31,7
О-в Джонстон	1958–1962	12	20,8
О-в Рождества	1962	24	23,3

Таблица 4

Данные о количестве атмосферных и подводных
ядерных взрывов СССР

Вид испытаний	Количество испытаний	Тротилловый эквивалент, Мт	Количество радиоактивных веществ, выброшенных в атмосферу в период испытаний, МКи	
			¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr
Семипалатинский полигон				
Воздушное	86	6,0	0,20	0,12
Наземное	30	0,6	0,056	0,035
Новоземельский полигон				
Воздушное	85	240	9,2	6,0
Наземное	1	0,032	0,002	0,001
Надводное	2	0,020	0,001	0,0005
Подводное	3	0,020	0,005	0,003
Всего	209	~246,6	~9,5	~6,1

Глава 2. ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И ТЕПЛОЙ ЭНЕРГИИ

2.1. Человеческое общество и энергия.

Источники энергии

Человечество живет в едином, взаимосвязанном мире, и наиболее серьезные энергетические, экологические и социально-экономические проблемы приобрели глобальный масштаб.

Развитие энергетики связано с развитием человеческого общества, научно-техническим прогрессом, который, с одной стороны, ведет к значительному подъему уровня жизни людей, но с другой – оказывает воздействие на окружающую человека природную среду. К числу важнейших глобальных проблем относятся:

- рост численности населения Земли и обеспечение его продовольствием;
- обеспечение растущих потребностей мирового хозяйства в энергии и природных ресурсах;
- охрана природной среды, в том числе и здоровья человека от разрушительного антропогенного воздействия технического прогресса.

Сегодня в индустриальных странах сосредоточено 16 % населения и 55 % энергопотребления в мире. В развивающихся странах – 84 % населения и 45 % энергопотребления.

Мировые запасы нефти: Саудовская Аравия – 26 %, Ирак – 11 %, Иран – 9 %, Кувейт – 9 %, Россия – 5 %, США – 2 %.

Природный газ: Персидский залив – 33 %, Россия – 33 %.

Уголь: США – 25 %, Россия – 16 %, Китай – 12 %.

Человечество уже в 20 раз превысило предел возможности своей энергетики, допустимой для сохранения устойчивости биологических систем и уже вышло на порог саморазрушения биосферы. Демографическая емкость Земли составляет 0,5–1,5 млрд человек. Сейчас уже более 6 млрд человек [35].

Разумеется, потребности современного общества должны удовлетворяться с учетом потребности будущих поколений. Потребление энергии является одним из важных факторов развития экономики и уровня жизни людей. За последние 140 лет потребление энергии во всем мире возросло примерно в 20 раз, а численность населения планеты – в 4 раза [35].

С учетом темпов нынешнего роста численности населения и необходимости улучшения уровня жизни будущих поколений Мировой энергетический конгресс прогнозирует рост глобального потребления энергии на 50–100 % к 2020 году и на 140–320 % к 2050 году [3].

По данным Мирового энергетического конгресса, в первые 20 лет XXI века рост энергопотребностей будет выше, чем за весь XX век при увеличении населения до 8 млрд человек.

Такие экологические угрозы, как парниковый эффект и необратимые изменения климата, истощение озонового слоя, кислотные дожди (осадки), сокращение биологического разнообразия, увеличение содержания токсичных веществ в окружающей среде, требуют новой стратегии развития человечества, предусматривающей согласованное функционирование экономики и экосистемы.

Что же такое энергия вообще? Согласно современным научным представлениям, энергия – это общая количественная мера движения и взаимодействия всех видов материи, которая не возникает из ничего и не исчезает, а только может переходить из одной формы в другую в соответствии с законом сохранения энергии.

Энергия может проявляться в различных формах: кинетическая, потенциальная, химическая, электрическая, тепловая, ядерная.

Для удовлетворения нашей потребности в энергии существуют возобновляемые и невозобновляемые источники.

Солнце, ветер, гидроэнергия, приливы и некоторые другие источники называют возобновляемыми потому, что их использование человеком практически не изменяет их запасы. Уголь, нефть, газ, торф, уран относятся к невозобновляемым источникам энергии и при переработке они теряются безвозвратно.

По прогнозам Международного энергетического агентства потребности в первичных энергоносителях в первом десятилетии XXI века будут удовлетворены в следующих соотношениях: нефть – не более 40 %, газ – менее 24 %, твердые виды топлива (в основном уголь) – менее 30 %, ядерная энергия – 7 %, гидроэнергетика – 7 %, возобновляемые виды энергии – менее 1 %. Региональное потребление первичных энергоносителей может иметь отклонения от мировых тенденций [3,25,29].

Основное количество энергии человечество получает и будет получать в ближайшем будущем, расходуя невозобновляемые источники.

В табл. 1–2 Приложения рассматриваются различные виды энергии (уголь, нефть, природный газ, солнечная энергия, гидроэнергия, энергия ветра) в сравнительной статистике [1–13, 23, 27,29].

Широко бытующее утверждение об экологической «чистоте» возобновляемых источников энергии справедливо, лишь если иметь в виду только конечную стадию – энергопроизводящую станцию. Из всех этих видов возобновляемых источников энергии только **гидроэнергия** в настоящий момент вносит серьезный вклад во всемирное производство электроэнергии (17 %).

В большинстве промышленно развитых стран незадействованным на сегодня остался лишь незначительный по объему гидроэнергетический потенциал.

Так, в европейской части страны с наиболее напряженным топливным балансом использование гидроэнергетических ресурсов достигло 50 %, а их экономический потенциал практически исчерпан.

Гидроэнергетические сооружения в потенциале несут в себе опасность крупных катастроф. Так, в 1979 году авария на плотине в Морви (Индия) унесла около 15 тысяч жизней, в Европе в 1963 году авария плотины в Вайонт (Италия) привела к гибели 3 тысяч человек.

Неблагоприятное воздействие гидроэнергетики на окружающую среду в основном сводится к следующему: затопление сельскохозяйственных угодий и населенных пунктов, нарушение водного баланса, что ведет к изменению существования флоры и фауны, климатические последствия (изменение теплового баланса, увеличение количества осадков, скорости ветра, облачности и т.д.).

Перегораживание русла реки приводит к заиливанию водоема и эрозии берегов, ухудшению самоочищения проточных вод и уменьшению содержания кислорода, затрудняет свободное движение рыб.

С увеличением масштабов гидротехнического сооружения растет и масштаб воздействия на окружающую среду.

Энергия ветра в больших масштабах оказалась ненадежной, неэкономичной и, главное, неспособной давать электроэнергию в нужных количествах.

Строительство ветряных установок усложняется необходимостью изготовления лопастей турбины больших размеров. Так, по проекту ФРГ установка мощностью 2–3 МВт должна иметь диаметр ветрового колеса 100 м, причем она производит такой шум, что возникает необходимость отключения ее в ночное время.

В штате Огайо была построена крупнейшая в мире ветросиловая установка 10 МВт. Проработав несколько суток, была продана на слом по цене 10 дол за тонну. В радиусе нескольких километров жить стало невозможно из-за инфразвука, совпадающего с альфа-ритмом головного мозга.

К серьезным негативным последствиям использования энергии ветра можно отнести помехи для воздушного сообщения и для распространения радио- и телеволн, нарушения путей миграции птиц, климатические изменения вследствие нарушения естественной циркуляции воздушных потоков.

Солнечная энергия. Техническое использование солнечной энергии осуществляется в нескольких формах: применение низко- и высоко-

температурного оборудования, прямое преобразование солнечной энергии в электрическую на фотоэлектрическом оборудовании.

Принципиальными особенностями солнечного излучения являются огромные потенциальные ресурсы (в 4000 раз превышает прогнозируемые энергопотребности человечества в 2020 году) и низкая интенсивность. Так среднесуточная интенсивность солнечного излучения для средней полосы европейской части России составляет 150 Вт/м^2 , что в 1000 раз меньше тепловых потоков в котлах ТЭС.

К сожалению, пока не видно, какими путями эти огромные потенциальные ресурсы можно реализовать в больших количествах. Одним из наиболее важных препятствий является низкая интенсивность солнечного излучения, что ставит проблему необходимости концентрирования солнечной энергии в сотни раз еще до того, как она превратится в тепло. Практическая реализация концентрации солнечной энергии требует отчуждения огромных земельных площадей. Для размещения СЭС мощностью 1 ГВт (эл) в средней полосе европейской части необходима минимальная площадь при 10 % КПД в 67 км^2 . К этому надо добавить еще и земли, которые потребуется отвести под различные промышленные предприятия, изготавливающие материалы для строительства и эксплуатации СЭС.

Следует подчеркнуть, что материалоемкость, затраты времени и людских ресурсов в солнечной энергетике в 500 раз больше, чем в традиционной энергетике на органическом топливе и атомной энергетике.

Действующая в Крыму СЭС мощностью 5 МВт потребила в 1988 году на собственные нужды в 20 раз больше энергии, чем произвела.

Отрицательными экологическими последствиями использования **геотермальной энергии** является возможность пробуждения сейсмической активности в районе электростанции, опасность локального оседания грунтов, эмиссия отравляющих газов (пары ртути, сероводорода, аммиака, двуокиси и окиси углерода, метана), которые представляют опасность для человека, животных и растений.

Проведенные исследования показали, что возможная роль возобновляемых источников энергии не выходит за пределы вспомогательного энергоресурса, решающего региональные проблемы. Ресурсы таких источников, как гидроэнергетика, энергия ветра, морских волн и приливов, недостаточны. Солнечная энергетика и энергетика геотермальная с теоретически неограниченными ресурсами характеризуются чрезвычайно низкой интенсивностью поступающей энергии.

Кроме того, необходимо помнить, что с использованием новых видов энергии возникает и новый тип экологических последствий, кото-

рые могут привести к изменению природных условий в глобальных масштабах и которые пока в полной мере трудно представить. Исследования последних лет показали, что на определенные планы с термоядерным синтезом (проект ИТЭР) преждевременно рассчитывать.

Огромная сухопутная протяженность, особенно в долготном направлении (11 часовых поясов), обрекает экономику России на дорогой железнодорожный грузооборот большей (около 80%) части валового продукта – продукта, получаемого, к тому же, с повышенными затратами из-за более суровых климатических условий [32].

Только по этим причинам жить в России, несомненно, труднее. Для того, чтобы обеспечить такой же, как, например, в Западной Европе или, тем более, в США уровень жизни, удельные средние затраты энергии при прочих равных условиях (производительность труда, технологии и т. д.) должны быть в 2–3 раза выше. Причем при обязательном условии, что используемые энергоносители будут, как минимум, не дороже, что невозможно при использовании традиционных энергоресурсов.

Непонимание этого рождает иллюзии и мифы. Какими бы гигантскими запасами нефти и газа в северных районах не располагала Россия, эти социально-экономические условия и цели не будут выполнены никогда при использовании органического топлива. К тому же за последний год появился новый фактор международного права, препятствующий его использованию, – экологический.

Необоснованной является надежда на возможность использования несметных сибирских природных богатств, оцениваемых десятками, а то и сотнями триллионов долларов. Освоение их потребует сопоставимых по масштабу затрат.

Богатство страны и ее народа обеспечивается не наличием природных ресурсов, а их экономической доступностью и рентабельностью использования.

Нынешняя структура электроэнергетики, в которой производство 2/3 ее продукции базируется на нестабильных факторах, бесконечных поисках новых месторождений неизбежно дорогих энергоресурсов, заботах, связанных с их истощением, мировой и национальной политической конъюнктуре, связанной с традиционными энергоносителями, создает нестабильность, в энергоснабжении страны.

Выход из этой российской энергоэкономической беспросветности был начат в конце 60-х годов, когда энергоресурсная картина СССР была неизмеримо более радужной, чем нынешняя в России. Именно тогда был взят курс на высокие энергетические технологии – ядерные. Их экономические показатели почти не зависят от климата и места использования, как не зависят и от ресурсообеспеченности! Предполагалось,

что в течение примерно 50 лет будет осуществлено перевооружение электроэнергетики страны на базе АЭС. Однако авария в 1986 г. на Чернобыльской АЭС остановила строительство блоков суммарной мощностью около 40 млн кВт, были также заброшены кадастровые площадки на 109 млн кВт.

Поэтому особенность экономической и социальной географии России предрасполагает к ядерно-энергетическим технологиям.

Фактор международного права, усиливающий экономические позиции мировой ядерной энергетики, появился в результате организационных десятилетних усилий ООН по международной регламентации решения проблемы, названной в Конвенции, принятой в 1992 г. 168 странами, “Повесткой дня XXI века”, и касающейся выбросов парниковых газов.

Не все слагаемые парникового эффекта, как и сам факт его существования, трактуются сегодня учеными однозначно. Но все же вряд ли кто в состоянии доказать, что эмиссия в атмосферу только в 1968 г. около 24 млрд тонн диоксида углерода оказала на нее положительное влияние. За последние 25 лет сжигание энергоносителей за счет кислорода атмосферы увеличилось в 5 раз. В докладе руководителя Межправительственной группы экспертов ООН Л.Ватсона сказано: “...если формулирование политики откладывать до того времени, когда проблема научных неопределенностей полностью разрешится, период, за которым окажется возможным обратить вспять вызванное человеком изменение климата и связанный с этим экологический ущерб, составит столетия и тысячелетия даже в случае полного прекращения выбросов парниковых газов, что практически неосуществимо”. Поэтому вставшая перед мировым сообществом альтернатива «действовать или не действовать» на крупнейших международных конференциях ООН полномочных представителей стран была решена в пользу первого выбора.

Результаты исследований, связанные с так называемой «внешней стоимостью» экологического ущерба, наносимого различными топливными энерготехнологиями, определение затрат на управление эмиссией парниковых газов разными видами безэмиссионных электростанций и биомассой (лесами), оценка стоимости атмосферного кислорода, изучение возможностей удаления углерода и водородной экономики на замедление накопления углерода в атмосфере указывают на дополнительную экономическую и экологическую предпочтительность ядерного топлива, как доминирующего в XXI веке. Какими бы запасами органического топлива не располагал мир, вопрос: «Насколько их хватит?» – теперь уже во многом лишен смысла. Главным стал другой вопрос: «Насколько их можно использовать?»

Таким образом, развитие мировой энергетики в XXI веке будет определяться угольными и ядерными отраслями, имеющими развитую сырьевую базу и мощные научно-технические заделы для решения проблем безопасности и экологии.

2.2. Атомная энергетика в мире и России: состояние, перспективы

В XXI веке к атомной энергетике предъявляются 5 основных требований: безопасность, утилизация плутония и недопущение его распространения, топливообеспечение, переработка и захоронение РАО, экономичность, конкурентоспособность.

Триединство качеств ядерной энергетики: огромный энергоресурсный (теплотворная способность ядерного топлива в 2–3 млн. раз больше, чем у традиционных видов), энергоэкономический (экономические показатели не зависят от места расположения) и энергоэкологический (отсутствие вредных выбросов) потенциалы, позволит выполнить эти основные требования.

В настоящее время атомная энергетика сохраняет свои позиции как один из основных мировых источников энергии.

На атомную энергию приходится 6 % мирового топливно-энергетического баланса и 17 % производимой электрической энергии.

Атомная энергетика наработала уже более 10000 реакторо-лет, из них 7000 без крупных аварий после апреля 1986 года.

В 2004 году в 30 странах мира действовало 442 энергоблока, в стадии строительства находится 35 энергоблоков.

В дополнение к атомным электростанциям имеются около 300 научно-исследовательских и экспериментальных ядерных реакторов в 56 странах. Они используются для изучения ядерных технологий, при медицинской диагностике и лечении рака. Свыше 200 ядерных реакторов позволяют плавать кораблям.

По данным МАГАТЭ, к странам, в которых доля АЭС в общей выработке электроэнергии наиболее высока, относятся: Франция – 77,1 %; Литва – 77,7 %; Бельгия – 58 %; Словакия – 53,4 %; Украина – 46 %; Болгария – 41,6 %; Республика Корея – 39,3 % и др. В 16 странах с помощью АЭС удовлетворяется более четверти потребностей в электроэнергии. Сегодня отличается стабилизация установленных мощностей АЭС в Западной Европе и США и быстрый их рост в Азии (Япония, Китай, Тайвань, Южная Корея).

Таблица 1

Состояние мировой ядерной энергетики

СТРАНЫ	ДЕЙСТВУЮЩИЕ АЭС		СТРОЯЩИЕСЯ АЭС	
	Число энергоблоков	Общая мощность НЕТТО, МВт (эл.)	Число Энергоблоков	Общая мощность НЕТТО, МВт (эл.)
АРГЕНТИНА	2	935	1	692
АРМЕНИЯ	1	376		
БЕЛЬГИЯ	7	5 712		
БРАЗИЛИЯ	2	1 901		
БОЛГАРИЯ	6	3 538		
КАНАДА	14	10 018		
КИТАЙ	5	3 715	6	4 878
ЧЕШСКАЯ РЕСПУБЛИКА	5	2 560	1	912
ФИНЛЯНДИЯ	4	2 656		
ФРАНЦИЯ	59	63 073		
ГЕРМАНИЯ	19	21 283		
ВЕНГРИЯ	4	1 755		
ИНДИЯ	14	2503	8	2 693
ИРАН			2	2 111
ЯПОНИЯ	54	44 289	3	3 696
КОРЕЙСКАЯ НДР			1	1 040
РЕСПУБЛИКА КОРЕЯ	18	14 890	2	1 920
ЛИТВА	2	2 370		
МЕКСИКА	2	1 360		
НИДЕРЛАНДЫ	1	450		
ПАКИСТАН	2	425		
РУМЫНИЯ	1	655	1	650
РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ	30	20 793	2	1 875
ЮЖНАЯ АФРИКА	2	1 800		
СЛОВАКИЯ	6	2 408	2	776
СЛОВЕНИЯ	1	676		
ИСПАНИЯ	9	7 524		
ШВЕЦИЯ	11	9 432		
ШВЕЙЦАРИЯ	5	3 200		
СОЕД. КОРОЛЕВСТВО	33	12 498		
УКРАИНА	13	11 207	4	3800
СОЕДИНЕННЫЕ ШТАТЫ	104	97 860		
ВСЕГО В МИРЕ*	442	356 746	35	27 743

*В итоговый показатель включен Тайвань, Китай, где эксплуатируется шесть реакторов общей мощностью 4884 МВт (эл.) и строятся два блока [2700 МВт (эл.)].

Данные в таблице по состоянию на ноябрь 2004 г.

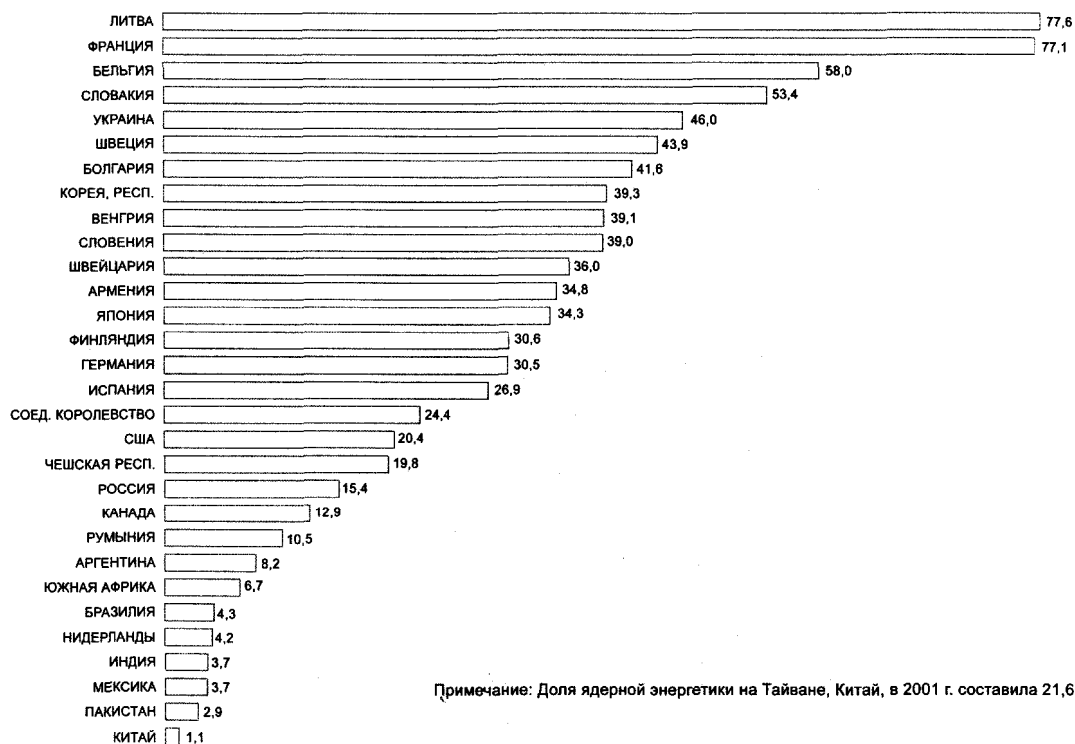


Рис.1. Доля ядерной энергетики в производстве электричества по состоянию на ноябрь 2004 г. (%)

Начиная с 1977 г. в США было модернизировано 70 энергоблоков из 103 и 18 получили лицензию на продление работы до 60 лет, в результате чего суммарная мощность реакторного парка возросла на 3244 МВт.

При вводе одной новой АЭС в Европе ожидается один фатальный рак (работа в течение года). Ежегодно в Европе умирают от рака 800 000 человек.

Кабинет Министров Японии издал программный документ, в котором одобрено приоритетное развитие атомной энергетики. В программе указывается: «С учетом экономичности, стабильности и экологической чистоты, следует признать атомную энергию наиболее важным энергоисточником, который должен получить в перспективе стабильное развитие при условии соблюдения требований безопасности». Это означает, что в дополнение к ныне действующим в Японии потребуется построить к 2010 году еще двадцать энергоблоков.

И это в стране, которая испытала ужас атомной бомбардировки, в стране самой высокой продолжительности жизни и самых совершенных технологий, стране повышенной сейсмической активности.

Особенности современного состояние российской энергетики можно охарактеризовать двумя взаимосвязанными фактами:

- время дешевых энергоресурсов в стране закончилось;
- «газовая пауза» в электроэнергетике завершается.

В пользу варианта максимального роста атомной промышленности говорит то стратегически важное обстоятельство, что для европейской части России из «газовой ловушки» есть только один выход через строительство АЭС.

АЭС, построенные по советским проектам в России и за рубежом, по-прежнему остаются в центре дискуссий. Одна из причин заключается в желании устранить все еще сильного российского конкурента с мирового ядерного рынка, а по возможности и с его внутреннего.

Расходуя свои природные органические ресурсы, Россия превращается в сырьевой придаток стран, интенсивно развивающих атомную энергетику. По доле АЭС в общем производстве электроэнергии Россия занимает лишь 20 место. Для решения экономических, экологических и социальных задач России, наряду с активной работой по рационализации, использованию и экономии электроэнергии, потребуется наращивать ее производство темпами не менее 2,5–3 % в год.

Обеспеченность собственной электроэнергией регионов Сибири недостаточно. Среди 9 регионов 7 регионов имеют дефицит в производстве электроэнергии.

Хотелось бы еще раз подчеркнуть, что одно лишь энергосбережение (о котором много и правильно сейчас говорят) не позволит повысить уровень жизни. В промышленности мы потребляем примерно столько же электроэнергии, сколько и США, но выпускаем продукции вдвое меньше, на социально-бытовые нужды тратим в 4 раза меньше. Для промышленно развитых стран потребление электроэнергии растет в строгом соответствии с ростом валового национального продукта. Лучший способ экономии ресурсов – использование электроэнергии. Так, в США с 1975 по 1990 гг. потребление первичной энергии было снижено на 6 %, но потребление электроэнергии возросло в полтора раза. Прирост электрогенерирующих мощностей США за этот период составил около 75 % суммарной мощности всех электростанций СНГ на сегодняшний день.

За время, прошедшее после аварии на Чернобыльской АЭС, отношение населения большинства стран к атомной энергетике изменилось в лучшую сторону. Об этом говорят результаты опросов общественного мнения, проведенные за последние несколько лет.

В Финляндии 38 % опрошенных поддерживают сохранение действующих АЭС, 28 % выступают за развитие атомной энергетики. Во

Франции поддерживают атомную энергетику свыше 70 %, в США – около 80 %. Такой же высокий рейтинг АЭС и в Великобритании, Японии, ФРГ, Ю. Корее и ряде других стран.

Объясняя отсутствие в США активной оппозиции расширенному строительству АЭС, Л. Уоллис говорит: «... американцы понимают, что легко ратовать за экологически чистую «зеленую лужайку», но крайне трудно жить на ней без всех тех благ, которые дает атомная энергетика. В США не воспринимают ее как исчадие ада, а ученых не считают злыми гениями, только и помышляющими о том, как бы извести доверчивое человечество».

В свое время мощное движение «зеленых» во Франции возглавлял Брис Лалонд. Сейчас он государственный секретарь Французской республики по вопросам окружающей среды. Вот что он писал в одной из газет: «Я сам очень долго и безуспешно боролся против АЭС... Теперь мы понимаем, что АЭС приносит большую пользу, имеет ощутимые преимущества по сравнению с электростанциями, работающими на угле».

Социологические исследования, проведенные Центром общественной информации по атомной энергии, показали, что около 50 % населения нашей страны не требует категорического отказа от развития атомной энергетики, среди них 25 % требует дополнительной информации, чтобы сформировать свое мнение.

Существует и такой взгляд на атомную энергетику: «Наша страна с уровнем экономики, технологии, культуры труда, а сегодня, как мы увидели, и просто культуры взаимоотношений и дискуссий, не имеет права использовать такую тонкую и опасную технологию, как атомная». Но, во-первых, невозможно резко вывести из эксплуатации уже действующие АЭС, во-вторых, атомная энергетика на сегодня одна из наиболее развитых отраслей. Закрыв атомную энергетику, разогнав высококвалифицированные кадры, мы повторим ошибку, допущенную с кибернетикой и генетикой. Ведь весь мир ищет способы сделать АЭС более безопасными, но пока не закрывает их. Необходимо научиться грамотно оценивать риск, пересмотреть критерии, по которым отбираются люди для управления объектами, несущими потенциальную опасность для окружающей среды.

Именно в этом, благодаря вниманию общества, заключается путь снижения риска возникновения аварий до столь низкого уровня, при котором использование таких технологий станет не только оправданным, но и желанным.

Ключевым в негативном отношении общества к атомной энергетике является боязнь аварий с выбросом радиоактивности.

Требования к уровню безопасности АЭС можно сформулировать на основе анализа социального и экономического риска тяжелых аварий АЭС. Социальный критерий основан на том, что даже одна тяжелая авария в мире в обозримом будущем окончательно подорвет доверие населения к атомной энергетике. Экономический критерий исходит из условия, что экономический риск от аварии должен быть заметно меньше доходов от производимой энергии.

Приемлемой считается вероятность самой тяжелой аварии 10^{-5} на один реактор в год. Вероятность выхода радиоактивных продуктов из под защитной оболочки реактора при расплавлении активной зоны реактора не должна быть более 10^{-7} на один реактор в год.

Это вполне реальная и технически осуществимая задача АЭС нового поколения, которая может быть решена как путем эволюционного совершенствования современных реакторов типа ВВЭР, так и разработкой альтернативных концепций атомных реакторов, обладающих внутренне присущими им свойствами безопасности и высоким уровнем самозащищенности. Важнейшее условие развития таких систем заключается в том, что безопасность АЭС нового поколения должна обеспечиваться не только и не столько введением в проект сложнейших систем контроля, автоматического управления с достаточным дублированием и т. д., сколько внутренней безопасностью установки, которая обеспечивается их физико-техническими характеристиками.

Для устранения причин, приведших к аварии на Чернобыльской АЭС, в кратчайшие сроки были разработаны и реализованы технические и организационные мероприятия. Благодаря их реализации на действующих реакторах теперь исключена возможность неуправляемого разгона при ошибочных действиях персонала. Следует также отметить, что проверявшие наши АЭС специальные миссии МАГАТЭ признали их полностью соответствующими международным требованиям по безопасности.

За прошедшие годы много сделано для повышения надежности и безопасности российских АЭС. Объективный показатель следующий: общее количество нарушений уменьшилось в 2 раза, количество «серьезных» нарушений – в 10 раз. По итогам 2004 года более надежно работали только АЭС Японии и Германии.

Большое беспокойство людей связано с качеством строительства и монтажа АЭС. Иногда оно вполне обоснованно. В данном случае необходим гласный общественный контроль за качеством строительства.

С 1 апреля 2002 года концерн «Росэнергоатом» преобразован в генерирующую компанию, в состав которой входят 10 АЭС (22242 МВт, эл.) эксплуатируются 30 энергоблоков, из них 15 ВВЭР, 11 РБМК и

БН-600.

Энерговыработка российских АЭС в 2002 году составила 140 млрд кВт·час, коэффициент использования установленной мощности АЭС – 72 %. С 1998 года атомная энергетика обеспечивает ежегодный прирост производства на 5–8 млрд кВт·час.

Доля атомной энергетики в настоящее время составляет 3,5 % в потреблении всех топливно-энергетических ресурсов и 16 % – в производстве электроэнергии России.

Доля электроэнергии, вырабатываемой АЭС в центре (60 км от Москвы) – до 25 %, Северо-Западный регион – до 50 %, Центрально-Черноземный – до 80 %, Кольский – до 70 %.

Производство энергии на АЭС обеспечивает экономию (замещение) до 40 млрд м³ природного газа или 30 % от его потребления в электроэнергетике для производства электрической и тепловой энергии на ТЭС.

Увеличение доли АЭС до 30 % может быть реализовано путем:

1. Продления ресурса 6 энергоблоков (3,2 млн кВт).
2. Повышения коэффициента установленной мощности (КУМ) до 0,8.
3. Управления издержками.
4. Завершения сооружения блоков высокой готовности Калининской, Курской, Балаковской, Ростовской АЭС.

Для достройки 4 энергоблоков высокой степени готовности требуются инвестиции около 1 млрд 300 млн долл. Дополнительный миллиард м³ газа стоит 200 млн долл. Как вступят в работу новые энергоблоки они будут высвобождать по 7 млрд м³ газа ежегодно при работе как минимум 40 лет, т.е. экономятся 280 млрд м³ стоимостью 50 млрд долл при нынешней цене газа, которая постоянно повышается. Сэкономленный газ можно продать за рубеж, где он стоит в 6 раз дороже.

Таблица 2

Действующие АЭС России

АЭС	Номер блока	Тип реактора	Электрическая мощность (брутто), МВт	Год ввода в эксплуатацию	Проектный год окончания эксплуатации
Белоярская	1	АМБ	100	1963	1980
	2	“	160	1967	1989
	3	БН-600	600	1980	2010
Билибинская	1	ЭГП	12	1974	2004
	2	“	12	1974	2004
	3	“	12	1975	2005
	4	“	12	1976	2006
Балаковская	1	ВВЭР-1000	1000	1985	2015
	2	“	1000	1987	2017
	3	“	1000	1988	2018
	4	“	1000	1993	2023
Калининская	1	“	1000	1984	2014
	2	“	1000	1986	2016
	3	“	1000	2004	–
Кольская	1	ВВЭР-440	440	1973	2003
	2	“	440	1974	2004
	3	“	440	1981	2011
	4	“	440	1984	2014
Курская	1	РБМК-1000	1000	1976	2006
	2	“	1000	1978	2008
	3	“	1000	1983	2013
	4	“	1000	1985	2015
Ленинградская	1	“	1000	1973	2003
	2	“	1000	1975	2005
	3	“	1000	1979	2009
	4	“	1000	1981	2011
Нововоронежская	1	В-1	210	1964	1984
	2	В-3	365	1969	1990
	3	ВВЭР-440	440	1971	2001
	4	“	440	1972	2002
	5	ВВЭР-1000	1000	1980	2010
Смоленская	1	РБМК-1000	1000	1982	2012
	2	“	1000	1985	2015
	3	“	1000	1990	2020
Волгодонская	1	ВВЭР-1000	1000	2001	–

Оптимальный вариант роста атомной энергетики

Основные показатели	
Повышение КИУМ	До 80–85 %
Продление назначенного срока службы действующих атомных энергоблоков, лет	До 40–50 %, что позволит выработать дополнительно более 2500 млрд кВт·ч электроэнергии
Вывод до 2020 г. 5,76 ГВт атомных энергоблоков	Билибинская АЭС – блоки 1–4 Кольская АЭС – блоки 1, 2 Курская АЭС – блоки 1, 2 Ленинградская АЭС – блоки 1, 2 Нововоронежская АЭС – блоки 3, 4
Доведение мощностей АЭС, ГВт	
В 2005 г.	До 26,2 с энергоснабжением – 174 млрд кВт·ч
В 2010 г.	До 32,0 с энергоснабжением – 224 млрд кВт·ч
В 2020 г. (с учетом АТЭЦ)	До 52,6 с энергоснабжением – 360 млрд кВт·ч и 7,8 млн Гкал/год
В том числе:	
до 2010 г.:	
рост установленной мощности АЭС	На 10,8 ГВт
достройка 4 ГВт атомных энергоблоков	Ростовская АЭС – блоки 1, 2 Курская АЭС – блок 5 Калининская АЭС – блок 3 Балаковская АЭС – блок 5
новое строительство 5,8 ГВт атомных энергоблоков	Калининская АЭС – блок 4 Курская АЭС – блок 6 Балаковская АЭС – блок 6 Нововоронежская АЭС – блок 6 Башкирская АЭС – блок 1 Белоярская АЭС – блок 4
до 2020 г.:	На 26,2
рост установленной мощности АЭС, ГВт	
ввод для замещения 6, 0 ГВт атомных энергоблоков	Ленинградская АЭС–2 – блоки 1,2 Курская АЭС–2 – блоки 1,2 Нововоронежская АЭС – блок 7 Кольская АЭС–2 – блок 1
новое строительство энергоблоков АЭС и АТЭЦ	На 20,2 ГВт: Южно-Уральская АЭС – блоки 1, 2 Башкирская АЭС – блоки 2–4 Смоленская АЭС – блок 4 Смоленская АЭС–2 – блоки 1, 2 Ленинградская АЭС–2 – блоки 3, 4 Архангельская АТЭЦ – блоки 1, 2 Северо-Кавказская АЭС – блоки 1–4 Дальневосточная АЭС – блоки 1, 2 Приморская АЭС – блоки 1, 2

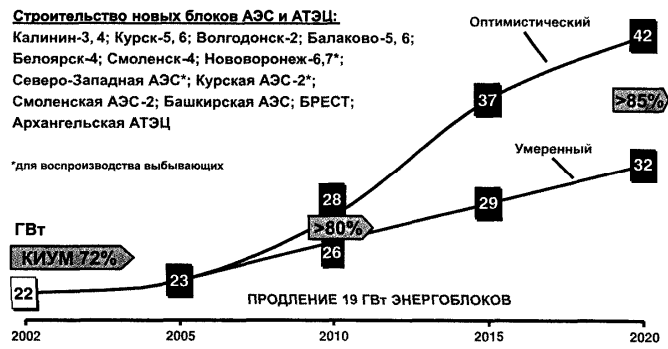


Рис. 2. Рост установленных мощностей атомных станций

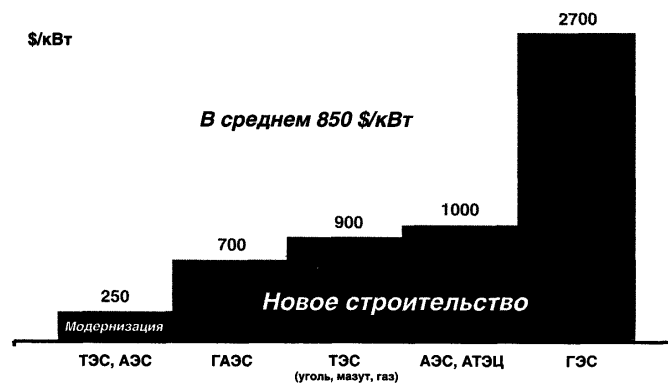


Рис. 3. Оценка удельных капитальных затрат на воспроизводство и развитие мощностей электроэнергетики России

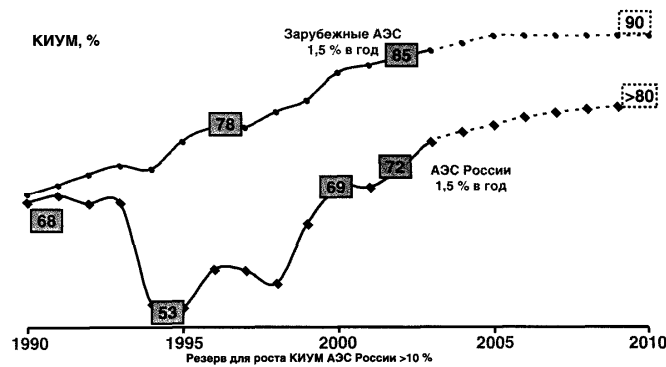


Рис. 4. Коэффициент использования установленной мощности атомных станций

Устройство ядерного реактора

В обычных электростанциях, работающих на угле или природном газе, ископаемое топливо сжигают в топке, и тепло пламени образует в котле пар. Этот пар, исторический двигатель индустриальной эпохи, вращает мощную турбину, соединенную с гигантским генератором, вырабатывающим электричество.

АЭС сжигает беспламенное топливо, представленное ураном. Тепло выделяется в результате деления ядер в условиях сдерживаемой человеком цепной реакции. Ядерная топка называется реактором. Основное различие между тепловыми и атомными станциями заключается в особенностях ядерного горючего, в том, что в последних отсутствует процесс сгорания и поэтому нет груженых углем поездов, нет загрязнения атмосферы углекислым газом, золой, дымом, не потребляют кислорода и т.д.

Одна урановая таблетка (вес примерно 20 г, диаметром с наперсток) эквивалентна по производимой энергии 730 кг угля, 570 л нефти.

Газовой энергетике уделено достаточно внимания, но также показано, что запасы природного газа ограничены, газопроводы дороги и опасны, новые газовые месторождения находятся в таких труднодоступных и экологически чувствительных регионах, что экономическая целесообразность их освоения, во всяком случае в течение ближайшего периода, относительна. Использование газа незначительно снижает остроту экологических проблем, связанных со сжиганием кислорода, парниковым эффектом и разрушением озонового слоя.

Ядерный реактор – устройство для осуществления управляемой реакции деления и преобразования выделившейся при делении энергии в тепловую для дальнейшего использования. Получающиеся при делении ядра осколки имеют большую кинетическую энергию (~160 МэВ), которая переходит в тепловую энергию вещества, увеличивая его температуру. При делении ядер кроме двух осколков образуются в среднем 2,5 новых нейтрона, которые могут вызвать деление соседних ядер делящихся изотопов (уран-235, уран-233, плутоний-239), и реакция может продолжиться.

Главным условием нормальной работы ядерного реактора является контролируемый процесс деления урана и надежная циркуляция теплоносителя через активную зону.

Для обеспечения безопасности реактора в аварийных ситуациях требуется: прекратить реакцию деления (заглушить реактор), обеспечить охлаждение заглушенной активной зоны, ограничить распространение радиоактивности.

Для этих целей предусматривается аварийная защита реактора, система аварийного охлаждения, локализирующие системы и средства ослабления выхода радиоактивности в окружающую среду.

Поток теплоносителя с помощью насосов прокачивается через активную зону и омывает тепловыделяющие элементы (ТВЭЛ), состоящие из топливного сердечника, заключенного в защитную оболочку. Оболочка предназначена для удержания продуктов деления от контакта с потоком теплоносителя и для предотвращения химических реакций теплоносителя с топливом. Аккумулируя выделившуюся в результате деления в ядерном топливе энергию, поток теплоносителя выносит ее за пределы активной зоны для производства пара. На атомной станции используются различные типы парогенераторов, через которые прокачивается вода, нагреваемая от теплоносителя и полностью или частично превращающаяся в пар. Затем пар пропускается через турбину, которая приводит в действие генератор электроэнергии. Отработавший пар турбины направляется в конденсатор, где он снова преобразуется в воду, повторно направляемую в парогенератор.

Принципиальное устройство ядерного реактора представлено на рис. 5.

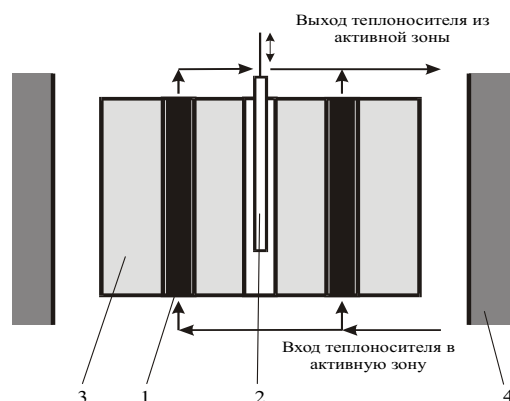


Рис. 5. Принципиальное устройство ядерного реактора: 1 – тепловыделяющие элементы (ТВЭЛ); 2 – управляющие стержни; 3 – замедлитель; 4 – биологическая защита

Мощность ядерного реактора зависит от количества нейтронов в активной зоне. Следовательно, изменяя это количество, можно управлять мощностью реактора. Поэтому для управления ядерным реактором используются регулирующие стержни, выполненные из сильно поглощающих нейтроны материалов. Каналы топлива и теплоносителя окружены замедлителем.

Процесс деления ядер сопровождается интенсивным излучением. Очень важно обеспечить надлежащую радиационную защиту вокруг активной зоны. Поэтому для снижения воздействия возникающих при работе ядерного реактора видов ионизирующего излучения на персонал и оборудование предназначена биологическая защита, окружающая активную зону. Эта защита включает обычно сталь, воду и бетон, которые задерживают нейтроны, гамма- и бета-излучение, тем самым снижая интенсивность излучения до приемлемо малых уровней вне защиты.

Атомная электростанция с реактором типа ВВЭР-1000

Достигнутый уровень освоения ядерной энергетической технологии, базирующейся на реакторах типа ВВЭР, позволяет рассмотреть их как неотъемлемую составляющую ядерной энергетики будущего с учетом их возможностей в решении прогнозируемых задач:

- расширение сферы использования ядерной энергии;
- потребление избыточного плутония;
- вовлечение тория в ядерный топливный цикл;
- повышение конкурентоспособности за счет совершенствования эксплуатации и оптимизация схем обращения с топливом;
- улучшение характеристик безопасности, повышение номинальной мощности энергоблоков и продление проектного срока службы;
- строительство новых энергоблоков с усовершенствованными реакторами;
- абсолютно низкая вероятность разрушения активной зоны реактора и полное исключение крупных аварий реактора с выбросом радиоактивности;
- значительное сокращение объемов радиоактивных отходов и решение всех вопросов, связанных с их удалением;
- внутренние присущие свойства самозащиты от распространения ядерных материалов.

АЭС ВВЭР-1000 с реакторными установками типа В-392 (рис. Приложение):

- отвечают всем современным требованиям по безопасности;
- учтены все недостатки предшествующих блоков, отмеченные экспертами МАГАТЭ;
- активные каналы систем безопасности имеют четырехканальную структуру;
- широкое использование пассивных средств защиты, основанных на естественных физических процессах;

- как активные, так и пассивные каналы независимо друг от друга способны выполнить функции безопасности во всех проектных аварийных режимах;

- более чем на три порядка повышена надежность систем безопасности с одновременным сокращением количества используемого оборудования;

- эффективность управления запроектными авариями за счет применения пассивных систем, являющихся универсальными средствами защиты, не зависящими или слабо зависящими от протекающих на АЭС процессов. Изменение технологических параметров является побудителем их действия.

При создании систем безопасности были использованы основные принципы, ценность которых доказана в инженерной практике: резервирование, физическое разделение, разнообразие, независимость каналов и систем безопасности, свойство самозащищенности.

Системы безопасности подразделяются на защитные, локализирующие, управляющие и обеспечивающие.

Защитные системы предотвращают или ограничивают повреждение реактора. К ним относятся системы аварийной остановки реактора и аварийного отвода тепла от него.

Локализирующие системы предназначены для предотвращения или ограничения распространения выделяющихся при авариях радиоактивных веществ.

Управляющие системы осуществляют приведение в действие систем безопасности или контроль и управление в процессе выполнения заданных функций.

Обеспечивающие системы снабжают системы безопасности энергией, рабочей средой и создают условия для их функционирования.

Не вдаваясь в техническую сторону вопроса, рассмотрим основные принципы, которые реализованы в данной установке.

В основу безопасности ВВЭР положено последовательное внедрение свойств внутренней самозащищенности и использование пассивных систем безопасности, обеспечивающих устойчивость реактора к ошибкам персонала и отказам оборудования. Внутренняя безопасность реализована на использовании естественных законов природы (гравитация, естественная циркуляция, испарение). Привлекательность использования естественных законов в концепции безопасности – постоянство их действия, независимость от внешних факторов.

В реакторе ВВЭР при повышении мощности, температуры или появлении пара за счет отрицательных обратных связей происходит самогашение реактора и процесс прекращается. Поэтому быстрое самопро-

извольное увеличение мощности исключено и тепловой взрыв реактора невозможен. Своей физической природой реактор препятствует разгону мощности. Он может быть сравнен с тяжелой вагонеткой, которая сама в гору не пойдет.

Саморегулирование и самоограничение, самоциркуляция и самоохлаждение – эти свойства легко проверяемы и позволяют реактору самому спасать себя в трудных ситуациях (по терминологии МАГАТЭ – «всепрощающий реактор»).

Таблица 4

Основные технико-экономические характеристики АЭС с реакторной установкой ВВЭР-1000.

№	Наименование показателя	Ед.изм.	ВВЭР-1000
1	Тепловая мощность реактора	МВт(т)	3000
2	Электрическая мощность энергоблока	МВт(э)	1068
3	Среднее обогащение стационарной топливной подпитки	% U235	4,0
4	Средняя глубина выгорания для стационарного цикла	МВт·сут/тU	43000
5	Срок службы энергоблока	лет	60
6	Расход электроэнергии на собственные нужды (система ТВС с градирнями)	%	6,4
7	КПД–нетто энергоблока	%	33,1
8	Допустимое время перерыва в снабжении переменным напряжением	с	20
9	Классификация проекта по международной шкале в отношении принятой концепции обеспечения безопасности	Поколение	III
10	Расчетная вероятность предельного аварийного выброса при запроектных авариях	1/реакт. ·год	Менее 10^{-7}
11	Удельные капиталовложения в промстроительство станции	Долл. US 2000г /кВт	990

Увеличено число органов регулирования. Предусмотрена система быстрого ввода бора (с использованием пассивных принципов) при отказе основной системы АЗ. Во всех режимах работы мощностной коэффициент реактивности активной зоны реактора всегда отрицателен; предел безопасной эксплуатации с точки зрения повреждения твэлов в новом проекте ужесточен и установлен на один порядок ниже, чем было для серийных блоков с ВВЭР-1000.

Важнейшей особенностью нового проекта является наличие системы пассивного отвода тепла, которая действует во всех режимах проектных и запроектных аварий и предназначена для гарантированного отвода тепла от активной зоны реактора при потере активных систем расхолаживания или всех источников электропитания. Предусмотрена система залива активной зоны при авариях с потерей теплоносителя, исключающая обезвоживание активной зоны.

В проекте, в качестве основной локализирующей системы, принята двойная защитная оболочка. Расчетное избыточное давление внутренней оболочки 0,4 МПа, проектная температура 150 °С. Допустимая утечка из внутренней оболочки не более 0,3 % объема среды в сутки. Кроме того, в комплекс локализирующих систем безопасности входит система аварийного сброса из оболочки и очистки выбросов на фильтрах, а также система улавливания и удержания расплавленного топлива.

Атомные станции малой мощности (АСММ)

Перспективы развития атомной энергетики связываются с применением ядерных энергоисточников для энергоснабжения потребителей, расположенных в труднодоступных, изолированных и других специфических топливодефицитных районах мира. Важность и актуальность этого направления определяется многочисленностью таких потребителей, целесообразностью вытеснения дорогого органического топлива. Из-за низкой калорийности, трудности заготовки и длительности срока восстановления лесных ресурсов в условиях Крайнего Севера использование дров в качестве топлива должно рассматриваться в самую последнюю очередь.

Транспортная схема доставки органического топлива от топливных баз, в основном трех-, четырехзвенная протяженность ее в среднем 2500–3000 км.

Как показала практика, при транспортировке угля на дальние расстояния потери его, как топлива, в результате измельчения достигают 30–50 %.

Короткие сроки навигационного периода приводят к необходимости накапливать и длительно хранить текущие и резервные запасы топлива, а также привлечения значительного количества морского, речного, автомобильного транспорта и людских ресурсов.

За рубежом (в США) созданы и находятся в опытно-промышленной эксплуатации АСММ с комбинированным производством электроэнергии и промышленно-отопительного тепла. На Аляске АЭС Fort-Cresley электрической мощностью 1,7 МВт и мощностью по

отпуску тепла 10 МВт, в штате Вайоминг на АЭС Sundancy с реактором PWR электрической мощностью 1 МВт и мощностью по отпуску тепла 2 МВт. АЭС Humboldt имеет кипящий реактор BWR с электрической мощностью 65 МВт и мощностью по отпуску тепла 200 МВт.

В настоящее время в России выполнено более 40 проектных разработок АСММ различных по назначению (АЭС, АТЭЦ, АСТ), по конструктивно-компоновочному исполнению (стационарные, блочно-транспортабельные, плавучие), по тепловой мощности (от 3 до 200 МВт), по виду замедлителя, теплоносителя и т.д.

Экономическая эффективность применения АСММ обусловлена прежде всего замещением дорогого дальнепривозного органического топлива.

Так, работа одной АТЭЦ электрической мощностью 75 МВт в одном из отдаленных районов Якутии высвободит ежегодно около 350 тыс. тонн условного топлива. Для доставки такого количества топлива потребуется 38 танкеров грузоподъемностью по 2150 тонн. Общая численность обслуживающего персонала танкеров составит порядка 1000 человек.

Минатом РФ начинает финансирование работ по строительству плавающей АТЭЦ мощностью 70 МВт в городе Виллюйске в Якутии. Строительство АТЭЦ будет проходить в г. Северодвинске, а затем будет переправлена в Якутию. Предполагается, что такая АТЭЦ будет построена уже через 3–4 года, а ее строительство обойдется менее чем в 200 млн руб. (в 5–6 раз дешевле строительства АЭС).

В будущем планируется построить АТЭЦ еще в двух российских городах – Северодвинске (Архангельская обл.) и Певеке (Чукотка).

Атомная станция теплоснабжения малой мощности бассейнового типа "РУТА"

Этот многочисленный тип установок имеет следующие важные особенности:

1. Небольшую мощность (1–60 МВт).
2. Высокую надежность и гарантированную безопасность.
3. Мобильность.
4. Экологичность.
5. Дешевизну.
6. Востребованность в условиях России.

Рассмотрим, как реализуются указанные признаки на примерах действующих и разрабатываемых установок.

Бассейновый тип ядерного реактора был создан в учебных и экспериментальных целях. Именно поэтому его неотъемлемыми качествами являются:

1. Легкость в управлении.
2. Высокая надежность и безопасность.
3. Простота эксплуатации.
4. Минимальные затраты на обслуживание.
5. Экологическая чистота, возможность размещения в населенных пунктах.

Для таких реакторов невозможна авария с разрывом корпуса или потерей теплоносителя. Вода бассейна является аккумулятором тепла большой емкости.

Необслуживаемые саморегулируемые атомные термоэлектрические станции (АТЭС “Елена”)

НС АТЭС “Елена” предназначена для снабжения теплом (до 3 МВт) и электроэнергией (до 100 кВт) небольшого поселка. Характерные размеры станции – диаметр 5 м, высота 10 м – не требуют большого объема строительных работ для сооружения бетонного бокса.

В последние годы в России широко проводились исследования необслуживаемых саморегулируемых атомных термоэлектрических станций малой мощности (НС АТЭС) на основе нового концептуального подхода с максимальным использованием внутренне присущих свойств безопасности. Использование такого подхода в сочетании с малой мощностью и малыми размерами установки позволяют использовать простые и, в то же время, эффективные меры, обеспечивающие ее полную безопасность при любых обстоятельствах.

В течение всего срока службы (определяемого конкретными потребностями и достигающего 25 лет) работа НС АТЭС не требует участия человека. Присутствие персонала ограничивается монтажом, запуском и выводом станции на номинальные параметры. В технологической схеме станции отсутствуют арматура, механизмы и устройства, требующие в процессе эксплуатации выполнения технологических операций и обслуживания. Весь ресурс обеспечивается первоначальной загрузкой активной зоны.

Таким образом, необслуживаемость станции снимает с рассмотрения такие вопросы, как ошибочные, непрофессиональные или даже злонамеренные действия персонала и обеспечение безопасности при выполнении потенциально опасных работ, например при перегрузке активной зоны.

Саморегулирование НС АТЭС обеспечивает компенсацию внешних и внутренних возмущений и изменение режима работы за счет естест-

венно протекающих физических процессов без вмешательства управляющих органов и механизмов. Отсутствие необходимости использования при работе на мощности активных средств автоматики и механизмов (в первую очередь органов регулирования реактором и насосов) исключает аварии, связанные с надкритичностью и недостаточным охлаждением активной зоны.

Система управления и защиты реактора в традиционном объеме, включая органы управления, исполнительные механизмы, датчики и т.п., служит только для запуска и останова реактора, в том числе и в аварийных ситуациях. Однако отказы в работе этой системы не приводят к развитию аварии и ухудшению обстановки.

Использование термоэлектрического метода преобразования тепловой энергии в электрическую существенно упрощает схему станции и способствует ее высокой надежности. Термоэлектрические батареи из низкотемпературных тройных сплавов имеют подтвержденный ресурс безотказной работы в несколько лет. Термоэлектрический генератор, как источник электроэнергии, обладает повышенной пожаробезопасностью электрических цепей, так как ток короткого замыкания превышает номинальный не более чем в два раза. Относительно невысокий КПД термоэлектрического метода преобразования в данном случае не является недостатком, так как непреобразованная часть тепловой энергии подается потребителю для теплоснабжения.

Малая мощность станции, ее компактность, подводное или подземное размещение в герметичном боксе исключают радиоактивные сбросы в окружающую среду как при нормальной эксплуатации, так и в аварийных ситуациях. Радиационные поля за пределами установки не превышают естественного фона, единственным видом воздействия на окружающую среду является тепловое.

Автономный источник энергоснабжения ЯППУ повышенной безопасности КЛТ-40

Высокое качество ядерной паропроизводящей установки (ЯППУ) КЛТ-40, обладающей повышенной безопасностью, достигнуто на базе опыта создания и эксплуатации аналогичного оборудования и систем на советских атомных ледоколах. Прежде всего это действующие атомные ледоколы “Арктика”, “Сибирь”, “Россия”, “Советский Союз”, ледоколы с ограниченной осадкой совместной советско-финской постройки “Таймыр” и “Вайгач”. Не имеет аналогов 30-летняя безаварийная эксплуатация родоначальника атомного флота – ледокола “Ленин”. О надежности и высоких ресурсных характеристиках его ЯППУ свидетельствует нара-

ботка, достигшая для отдельного оборудования более 107 тысяч часов. Накоплен ценнейший опыт: установками советских атомных ледоколов безаварийно наработано более 100 реакторо-лет, что подтверждает отработанность технических решений, положенных в основу создания ЯППУ КЛТ-40 лихтеровоза-контейнеровоза “Севморпуть”, вступившего в эксплуатацию в 1988 году.

Стоимость снятия блоков атомной станции на базе реакторной установки КЛТ-40 с эксплуатации составляет не более 10% от стоимости строительства.

Использование ПАЭС электрической мощностью 80 МВт с двумя реакторами КЛТ-40 эквивалентна сокращению ежегодного потребления в районах Крайнего Севера 200 тыс. тонн каменного угля или 120 тыс. тонн мазута. Для доставки такого количества топлива требуется 30 танкеров или 60 сухогрузов, а для доставки с баз – 10 000 автоцистерн и 15 000 автосамосвалов.

Кроме того, установка может быть использована для:

- плавучих водоопреснительных станций;
- плавучих электростанций;
- подземных электростанций;
- береговых электростанций, возводимых наплавающим способом.

Атомная плавучая водоопреснительная станция (АПВС-401) представляет собой специальное несамоходное судно.

Основные характеристики АПВС-40:

Длина – 160 м;

Ширина – 32 м;

Производительность по опресненной воде, м³/сут. – 40000;

Продолжительность работы в течение года, ч – 8000;

Общий срок службы, год – 25;

Численность персонала, чел. – 60.

Основными преимуществами АСММ на базе плавучего энергетического блока, по сравнению с наземным вариантом строительства станции такой же мощности, являются:

* сокращение сроков инвестиционного цикла и стоимости строительства по сравнению с наземным вариантом сооружения станции такой же мощности за счет минимальных объёмов строительно-монтажных работ;

* высокое качество изготовления плавучего энергоблока в условиях судостроительного завода и сдача его “под ключ”;

* возможность размещения станции в непосредственной близости от потребителя энергии;

* вахтовый метод эксплуатации;

* простота снятия с эксплуатации – после вывода из эксплуатации плавучий энергоблок буксируется на специализированное предприятие для утилизации.

Очевидно, что максимальный экономический эффект применение АСММ на базе ПЭВ обеспечивается при тепло- и электроснабжении федеральных государственных предприятий (ФГУП) и закрытых территориально-административных образований (ЗАТО) за счет резкого сокращения бюджетных затрат на завоз органического топлива и компенсацию тарифов. Например: на одной загрузке топлива ПЭВ работает 3 года, что позволяет за этот период экономить 360 тыс. тонн мазута (640,0 млн руб.) или 600 тыс. тонн угля (706,6 млн руб) (цены на топливо взяты по Архангельской области по состоянию на 01.01.2003 году), а также обеспечивает независимость потребителей от конъюнктуры рынка органического топлива; и неизменность тарифов на тепловую и электрическую энергию в течение 3 лет.

Жизненный цикл станции, включая строительство, эксплуатацию, капитальный ремонт плавучего энергоблока и его утилизацию, подготовку персонала, полностью обеспечивается действующей инфраструктурой российской ядерной промышленности.

При серийном изготовлении энергоблоков стоимость второго и последующих уменьшится на 15–20 %, что значительно повысит экономическую эффективность станций.

Параллельное развитие проекта может быть реализовано путем экспорта станции в составе ядерного опреснительного комплекса в страны, испытывающие дефицит пресной воды (по коммерческой схеме Строю–владею–эксплуатирую).

Сегодня рынок опреснения морской воды бурно развивается. В 1995 году его объем составлял ~ 3 млрд долларов США в год, а к 2015 году по прогнозам МАГАТЭ достигнет 12 млрд долларов США в год. Одним из основных препятствий для развития этого рынка является высокая энергоемкость процесса опреснения. По этой причине во многих случаях вырабатываемая пресная вода оказывается слишком дорогой для массового применения в промышленности и сельском хозяйстве.

Министр Росатома рассказал также о принципиально новом проекте по созданию атомных электростанций малой мощности морского базирования. Такие станции могут создаваться на базе подводных лодок и ледоколов, которые выводят из состава флота. Например, реакторы атомной подводной лодки “Курск” после подъема были в рабочем состоянии и их, по словам Румянцева, можно было запускать на полную мощность.

Американское министерство энергетики ведет разработку принципиально нового типа атомных электростанций. Новые ядерные реакторы создаются из расчета обеспечения потребностей развивающихся стран, причем эти страны не должны иметь возможности использовать побочные продукты или отходы АЭС для создания ядерного оружия.

По этим причинам реактор должен быть достаточно компактным, полностью герметичным и автономным. Во избежание проникновения внутрь реактора, он будет оснащаться многоуровневой системой сигнализации. Проданные в развивающиеся страны реакторы будут доставляться на место, устанавливаться и работать порядка 30 лет. После выработки ресурса реакторы будут вывозиться для утилизации в США. Никакой дозаправки и сложного техобслуживания реакторы не требуют, сообщает New Scientist.

Еще одна причина, по которой АЭС должна быть компактной, – это отсутствие в развивающихся странах инфраструктуры для передачи электроэнергии. Поэтому строить в них АЭС мощностью в несколько гигаватт нет смысла – передать энергию потребителям все равно не удастся. Выгоднее может оказаться строительство большого числа маломощных станций, которые не требуют наличия развитой сети электрообеспечения. Согласно расчетам американских специалистов, атомный реактор мощностью 100 МВт будет иметь высоту в 15 метров и диаметр 3 метра при массе порядка 500 тонн.

Для обеспечения долгого периода работы реактор должен будет обладать способностью к регенерации топлива, используя часть нейтронов для превращения неактивного урана-238 в активный плутоний-239. Сам реактор, скорее всего, будет иметь цилиндрическую форму, хотя разработка конкретных инженерных решений займет немало времени. Первые прототипы реакторов должны быть готовы только к 2015 году.

Японские специалисты в настоящее время разрабатывают по правительственному заказу миниатюрный ядерный реактор, который в перспективе можно будет использовать для электроснабжения жилых домов и даже колоний на других планетах. И если вторая сфера применения остается скорее фантастикой, то мини-АЭС в подвале многоэтажного дома может стать реальностью уже достаточно скоро.

Разрабатываемый реактор Rapid-L, при высоте 6 м и ширине 2 м, способен вырабатывать до 200 кВт электричества, чего достаточно для питания офисного небоскреба или жилого дома. По словам Мицуру Камбе (Mitsuru Kambe), возглавляющего группу исследователей в Центральном исследовательском институте электроэнергетики (CRIEPI), в будущем реакторы типа Rapid-L получат широкое распространение просто потому, что большие АЭС будет трудно построить из-за нехват-

ки места для их размещения. Мини-реакторы также могут использоваться для компенсации пиковых нагрузок в крупных городских зонах, таких как Токийский залив.

Принцип работы Rapid-L традиционен, однако вместо углеродных стержней, используемых в больших реакторах для регулирования интенсивности распада урана, в мини-реакторе используется жидкий литий-6 – изотоп лития, лучше других поглощающий нейтроны. Внутри реактора имеются трубки, заполненные инертным газом. Над трубками располагаются емкости с литием-6. При повышении температуры металл расширяется и спускается вниз по трубкам, поглощая нейтроны и замедляя реакцию. То есть литий-6 действует как “жидкий стержень”, естественно, что в этом случае нужда в сложном механическом приводе для спуска и подъема твердых стержней отпадает. Рабочая температура Rapid-L составляет 530° С, а охлаждение осуществляется жидким натрием. Реактор, по утверждению разработчиков, полностью безопасен.

2.3. Облученное ядерное топливо (ОЯТ) и техническая практика обращения с МОКС-топливом и радиоактивными отходами (РАО)

Тема ОЯТ, как одна из горячих и злободневных сегодня, безусловно, требует профессионального обсуждения, а не голословного осуждения. Дискуссия должна включать анализ имеющихся научных данных с учетом экономических реалий.

Спор о том, что «ОЯТ – это не радиоактивные отходы», разрешила наука радиохимия.

В отличие от политологии и других гуманитарных наук она не оставляет места для недосказанности и двойственных толкований.

ОЯТ – это ядерное топливо, отработавшее цикл в реакторе АЭС. После выгрузки оно помещается в специальный бассейн выдержки, имеющийся на каждой станции. Через год количество выделяемого тепла снижается примерно в 200 раз, а радиоактивность – в 10 раз, через 5 лет радиоактивность уменьшается в 35 раз. Через 30 лет – в 100 раз. Ядерное топливо после облучения в современных реакторах сохраняет все защитные барьеры безопасности. После 3–5-летней выдержки ОЯТ можно перевозить в централизованное хранилище или направлять на переработку.

В мире существуют два вида ядерного топливного цикла: закрытый и открытый. В соответствии с ними есть два подхода к обращению с ОЯТ. При закрытом цикле ОЯТ поступает на переработку с извлечением урана, плутония и других ценных компонентов и возвращением их в

ядерный цикл. При открытом цикле осуществляется, длительное хранение ОЯТ с его последующим захоронением без переработки.

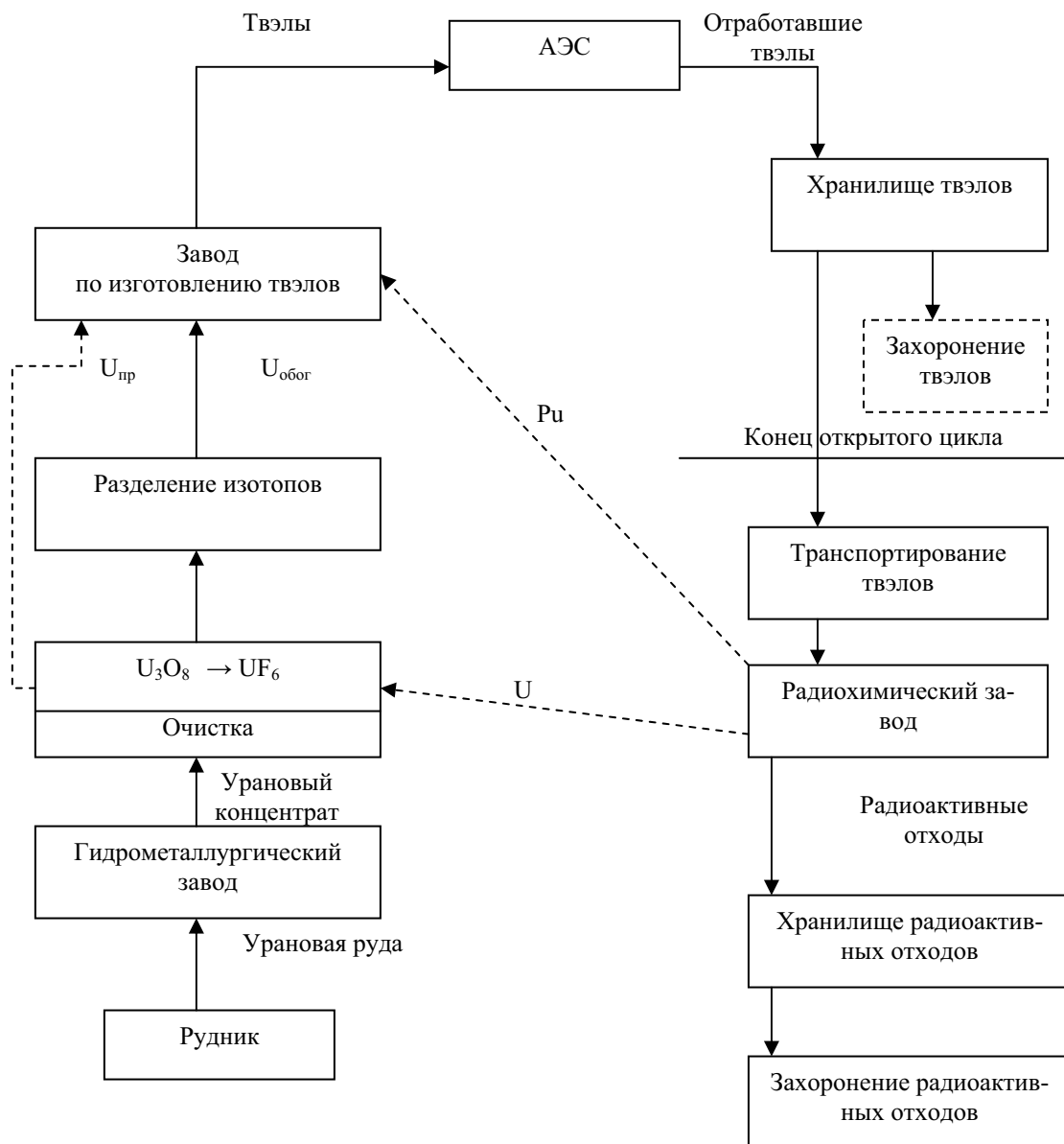


Рис. 6. Схема типичных открытого и замкнутого (с рециклом U и Pu) ЯТЦ для АЭС с реактором на тепловых нейтронах

Захоронение пока не производится ни в одной стране мира. С одной стороны, обоснование безопасности захоронения на десятки тысяч лет требует проведения масштабных исследовательских работ. Это детальные исследования геологической среды выбранного полигона для захоронения, надежности физических барьеров и т.д. С другой стороны, не все убеждены в целесообразности захоронения ОЯТ, предполагая,

что через определенное время ОЯТ может быть выгодно переработано. По этой причине создаются долговременные хранилища, где ОЯТ будет находиться в течение нескольких десятков лет до принятия решения об его окончательном захоронении или переработке.

В 2001 году были приняты три Федеральных закона:

1. «О внесении дополнений в статью 50 Закона РСФСР «Об охране окружающей природной среды». Этот закон является ключевым законопроектом, его принятие позволит с учетом ряда принципиальных условий по обеспечению радиационной и экологической безопасности ввозить в Россию облученное ядерное топливо (ОЯТ) для его хранения и (или) последующей переработки.

2. «О внесении изменений и дополнений в Федеральный закон «Об использовании атомной энергии». Этот закон дает возможность осуществления лизинга свежего ядерного топлива, что, в свою очередь, позволит существенно расширить присутствие российских производителей ядерного топлива на зарубежном рынке и, кроме того, добавляет «временное хранение» в перечень возможных услуг по обращению с ОЯТ.

3. «О специальных экологических программах реабилитации радиационно-загрязненных регионов Российской Федерации». Этот закон определяет механизм финансирования специальных экологических программ за счет средств, полученных в результате расширения участия российских предприятий на мировом рынке обращения с ОЯТ.

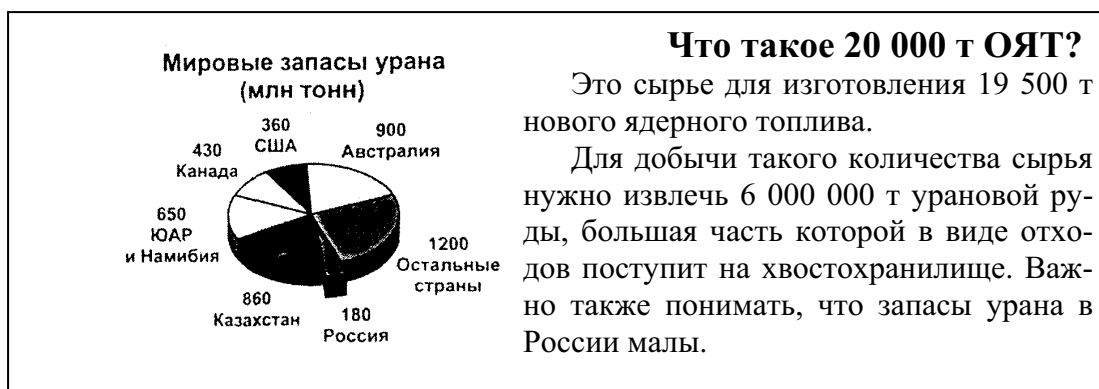
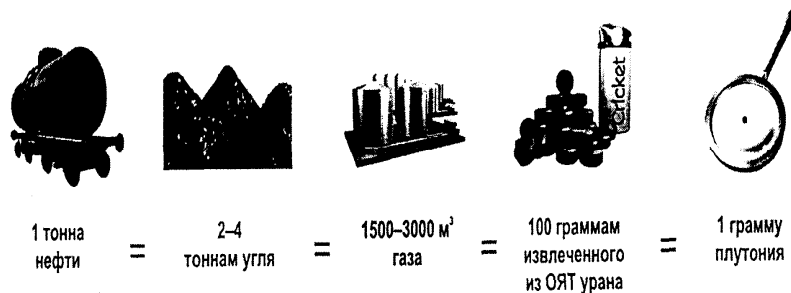
В настоящее время только 4 страны (Великобритания, Франция, Япония, Россия) уже имеют мощности для перерабатывания ОЯТ. К ним, безусловно, присоединится еще ряд стран. Из реакторов АЭС всего мира ежегодно выгружается около 12 тыс. т ОЯТ, в том числе около 800 тонн в России.

Емкость рынка уже сегодня превышает 200 млрд. долларов. Россия претендует лишь на 10 % рынка.

Состав облученного ядерного топлива: двуокись урана-238 – 95 %, двуокись урана-235 – 1,5 %, плутоний – 2,5 %, РАО и другие элементы – 1 %. Таким образом, около 99% ОЯТ – это ценнейшее энергетическое и технологическое сырье.

Изготовленное из 20 000 т ОЯТ новое МОКС-топливо при использовании на традиционных АЭС с реакторными установками ВВЭР или PWR и BWR позволит заместить 410–470 млн тонн нефти, или 630–730 млрд кубометров газа или 820–940 млн тонн угля. Что такое 450 млн тонн российской нефти – это 80 млрд долларов США.

Энергетическая ценность:



Современные прогнозные оценки Министерства топлива и энергетики РФ на 2020 год таковы: к 2020 году необходимо добывать не менее 360 млн тонн нефти, 430 млн тонн угля и 700 млрд кубических метров газа и вырабатывать 1620 млрд кВт·ч электроэнергии.

Таким образом, 20 000 тонн ОЯТ по энергетической ценности сравнимо с годовым производством органического топлива в России, даже при использовании традиционных ядерных технологий на уже действующих АЭС.

– Можно ли оценить опасность работ по обращению с ОЯТ зарубежных АЭС?

– Да, можно. Мировой и отечественный опыт обращения с ОЯТ (транспортировка, хранение и переработка ОЯТ) позволяет это сделать с высокой точностью. Радиационные риски прямо связаны с коллективной дозой.

Коллективная доза, полученная людьми, при обращении с 20 000 тонн зарубежного ОЯТ составит величину сравнимую с дозой, которую получает население России при обычных условиях жизни в течение пяти часов за счет естественного фона и статистически распределенных медицинских процедур.

При этом индивидуальные дозы персонала и населения лежат в диапазоне малых и сверхмалых доз, для которых нет достоверных данных о негативном воздействии на здоровье.

Ни на одном из этапов работы с ОЯТ человек напрямую не контактирует с радиационными веществами: процессы разгрузки, выдержки и собственно переработки (разделка кассет, рассеивание, растворение и извлечение полезных компонентов) полностью механизированы и осуществляются дистанционно в герметичных помещениях. Профессионал лишь производит манипуляции, сидя за монитором. Другое дело, что необходим постоянный жесткий контроль за соблюдением мер технической безопасности, на чем и базируются предприятия Росатома России.

Авария на ПО «Маяк» в 1957 году действительно привела к радиоактивному загрязнению больших территорий, но она никоим образом не связана с переработкой ОЯТ. Эта авария явилась прямым следствием высоких темпов производства ядерного оружия и вынужденным второстепенным отношением к вопросам безопасности производства. Напомним, что завод по переработке ядерного топлива начал функционировать в 1977 году. За все время работы на нем не происходило аварий, представлявших опасность для окружающей природной среды и населения. Авария на СХК в 1994 году, во-первых, не имеет прямого отношения к переработке ОЯТ АЭС, а во-вторых, она не привела к «загрязнению огромных пространств». Более того, она не представляла никакой опасности для населения. Дозы облучения населения наиболее загрязненной деревни не превысили допустимого значения в 1 мЗв (в среднем она составила 0,29 мЗв). Коллективная доза облучения населения в результате аварии (0,021 чел·Зв) составила 0,0003 % от ежегодной коллективной дозы облучения населения Томской области, обусловленной природным фоном и медицинскими процедурами. Что касается утверждений типа: «В результате переработки ОЯТ во всех местах (в Красноярске-26, в Томске-7, на «Маяке», в Димитровграде) газообразные и жидкие радиоактивные отходы в огромном количестве попадают в окружающую среду и создают угрозу экологической безопасности», то заметим только, что в Красноярске-26 и в Томске-7 переработка ОЯТ не ведется, а в Димитровграде действуют экспериментальные установки. Во всех случаях выбросы и сбросы радиоактивных веществ предприятий Росатома не превышают нормативов, установленных природоохранными органами и органами санитарного надзора.

В докладе Агентства сделан совершенно обоснованный вывод о том, что радиологическое воздействие на рабочих заводов по производству и переработке ядерного топлива, а также на население близлежащих территорий незначительно. Это облучение существенно ниже уста-

новленных дозовых пределов для персонала и населения и ничтожно мало по сравнению с облучением людей естественными природными источниками радиации.

Транспортные операции с облученным ядерным топливом осуществляются в России уже в течение 30 лет. За это время не произошло ни одного инцидента, связанного с выбросом радиоактивности. Хранение ОЯТ – также хорошо освоенная, безопасная технологическая операция, которую применяют все страны, развивающие атомную энергетику.

Если говорить более предметно, то предполагаемая работа Минатома на международном рынке обращения облученного ядерного топлива, способна обеспечить России ощутимые преимущества сразу на нескольких направлениях.

1. Политические “дивиденды”. Проект ввоза из-за границы ОЯТ на временное хранение и переработку – это самая крупная народно-хозяйственная программа последнего десятилетия. По своему масштабу она сопоставима, например, с программой разработки западно-сибирских нефтяных месторождений, а в финансово-экономическом плане превосходит практически все советские внешнеэкономические проекты (известную сделку «газтрубы», строительство АвтоВАЗа и др.). Впервые за многие годы может быть осуществлен высокотехнологичный проект, где наша страна имеет явные преимущества (космический проект «Союз–Аполлон» носит, скорее, «паритетный» характер).

2. Экономические и социально-экономические выгоды. Расчеты специалистов показывают, что в ближайшие 10–20 лет в Россию на хранение и переработку может быть ввезено до 20 тыс. тонн ОЯТ. Зарубежным странам услуги российских атомщиков обойдутся не менее чем в 20 млрд. долл. Из них на нужды собственно ядерной промышленности (модернизацию и проч.) уйдет всего 2,6 млрд долл. Налоги в федеральный и местный бюджеты составляют 3,3 млрд долл. Фонд затрат будущих периодов составит 7,8 млрд долл. (Из этого фонда предполагается ввести в том числе и долгосрочное кредитование федерального бюджета.) На реализацию общероссийских и местных экологических программ уйдет 7,3 млрд долл. (Для сравнения: существующие госпрограммы по утилизации оборонных ядерных отходов, реабилитации загрязненных территорий и защите населения “стоят” 6 млрд рублей, однако их ежегодное финансирование не превышает 10 % от запланированного).

Таким образом, реализация «Программы ОЯТ» обеспечит дополнительные возможности по выплатам внешнего долга; повысит шансы на принятие и успешное исполнение сбалансированных федеральных бюджетов; создаст реальную основу для снижения налогового бремени в

масштабах всего народного хозяйства за счет «привнесения» выпадающих доходов; откроет надежный источник финансирования экологических программ в масштабах всей России; внесет свой вклад в увеличение расходных социальных статей бюджета.

Безусловно, выполнение проекта ОЯТ способствовало бы притоку средств и в атомную промышленность со всеми вытекающими из этого последствиями для экономики страны.

3. Внешнеэкономические преимущества. Расширение участия России в международном рынке обращения с ОЯТ означало бы полноценное присутствие нашей страны в одном из самых доходных и престижных секторов мировой экономики. Это существенно подняло бы экономический и политический вес российского государства за рубежом, обеспечило бы растущий интерес инвесторов к экономике страны, повысило доверие со стороны международных и частных кредитных организаций.

Кроме того, возникла бы техническая и технологическая взаимозависимость зарубежных государств, участвующих в программе ОЯТ, и России. Налаживание на этой основе долгосрочных экономических связей привело бы также к общему повышению уровня безопасности в данной сфере. Одновременно упрочилась бы деловая репутация как страны в целом, так и ее регионов, отраслей и предприятий.

В результате переработки из 1 кг ОЯТ получается 10 граммов (1 %) долгоживущих необратимых отходов. Эту смесь надо хранить в остеклованном виде в защищенных и недоступных местах. В будущем предполагается, что радиоактивные актиноиды, которые составляют смесь необратимых отходов, все-таки можно будет переработать в короткоживущие, гораздо менее опасные отходы в реакторах на быстрых нейтронах. Этот процесс называется трансмутацией.

Многочисленные противники применения атомной энергии в народном хозяйстве выделяют как не разрешенную проблему – постоянную и растущую опасность для окружающей среды – радиоактивные отходы, получаемые в результате эксплуатации АЭС. Реальность же такова, что из всех форм энергии, способных к удовлетворению растущих мировых потребностей, ядерная энергетика производит наименьшее количество отходов, которые легче всего поддаются обработке.

На рис. 7 представлена структура годового объема отходов в Великобритании. Видно, что радиоактивные отходы в стране составляют менее 1% от общего объема. Примерно такая ситуация характерна и для России, но не следует забывать, что доля АЭС в выработке электроэнергии в Великобритании составляет 24,4 %, а в России – 16 %.

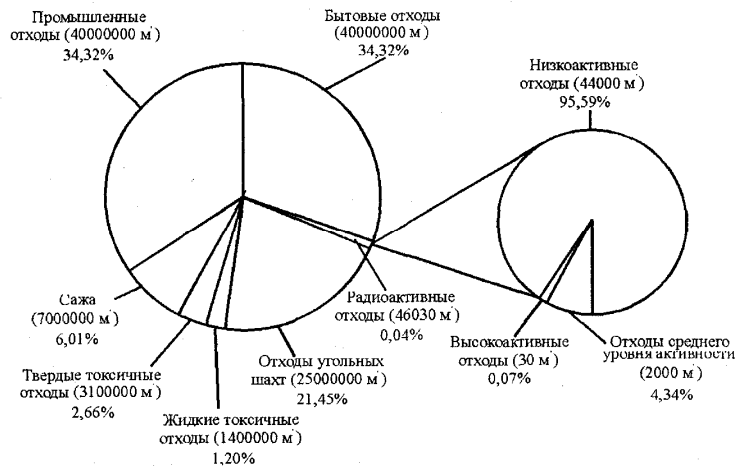


Рис. 7. Структура годового объема отходов в Великобритании

Многочисленные неядерные отходы содержат большое количество радиоактивных материалов. Так, в результате эксплуатации ТЭС на угле образуется зола с удельной активностью от 160 до 2500 Бк/кг. В США количество такой золы достигает 61 млн т ежегодно.

Напротив, ядерные отходы невелики.

Атомные станции извлекают большую энергию из малых количеств урана, поэтому радиоактивные отходы образуются в относительно малых количествах. АЭС мощностью 1000 МВт эл., снабжающая электроэнергией город с населением 700000 человек, вырабатывает ежегодно 2,5 м³ высокорadioактивных отходов, около 160 м³ средней активности и 48 м³ низкоактивных отходов.

Угольная электростанция такой же мощности дает ежегодно 500000 м³ твердых отходов, что выбрасывается с отфильтрованной пылью.

Благодаря естественному распаду радиоактивности, хранящиеся радиоактивные отходы со временем теряют сами по себе свою активность.

В конечном хранилище низко- и среднеактивных отходов количество активности спустя 300 лет сравнимо с активностью окружающих горных пород.

Процесс истощения, ослабления радиоактивности сильно отличается от того, как обстоят дела со многими специфическими отходами из других отраслей, например с тяжелыми металлами, свинцом, ртутью, кадмием, высокая токсичность которых сохраняется вечно.

В работающем реакторе АЭС радиоактивное вещество образуется в процессе деления ядер урана или плутония и активации нейтронами различных материалов, находящихся в активной зоне реактора.

Радиоактивные отходы можно разделить на три категории: газообразные, жидкие и твердые.

К газообразным относятся радионуклиды криптон, ксенон, йод, тритий, углерод-14 и ряд других. Для уменьшения активности осуществляется их временная задержка, либо их пропускают через радиохроматографическую систему очистки газов и выбрасывают в атмосферу через высокую трубу ($H = 150$ м), чтобы обеспечить лучшее разбавление в воздухе.

К жидким отходам относятся загрязненная вода, пульпы ионообменных смол и фильтроматериалы. Они подвергаются очистке, а концентрированные жидкие отходы хранятся в специальных емкостях, далее отверждаются и захораниваются. Сбросу могут подвергнуться только очищенные воды.

К твердым отходам относятся:

1) твердые отходы, возникающие после отверждения концентрированных жидких радиоактивных отходов;

2) детали оборудования, снятые с эксплуатации (насосы, задвижки, фильтры и т.п.);

3) использованный инструмент и материалы. Эти отходы подвергают обработке и помещают в хранилище твердых отходов на территории АЭС. Их количество зависит от типа реактора, но не превышает $2000 \text{ м}^3/\text{ГВт}\cdot\text{год}$.

Отходы средней и высокой удельной активности до $3,7 \cdot 10^2 \text{ ТБк}/\text{ГВт}\cdot\text{год}$ составляют от одного до нескольких процентов.

По степени опасности для людей радиоактивные отходы принято классифицировать по их удельной активности: низкоактивные, среднеактивные и высокоактивные отходы. Особых проблем с низкоактивными и среднеактивными отходами не возникает. Гораздо больше проблем связано с высокоактивными, но напомним, что их доля менее 1 %. Высокоактивные отходы состоят в основном из отработавшего топлива.

Все АЭС мира на настоящее время в процессе эксплуатации дали в 9 раз меньше твердых отходов, чем одна ТЭС мощностью 1500 МВт в течение года. Количество высокоактивных отходов в Западно-европейских странах составило за период 1986–2000 гг. лишь 0,001 часть объема неядерных токсичных отходов промышленности, накапливаемых ежегодно. Малое количество отходов является одним из основных преимуществ ядерной энергетики.

Перед обществом два варианта: бесконтрольное распространение по земному шару больших масс отходов, хотя и невызывающих немедленную катастрофу, но медленно отравляющих людей (угольная энергетика), либо получение отходов, которые могли бы принести вред живой природе, но имеют относительно малый объем и надежно локализируются (атомная энергетика). По оценкам США хранение сотен миллионов кубометров золы и шлака обойдется в 10–100 раз дороже, чем хранение отходов АЭС мощностью 100 ГВт.

Образующиеся в результате производства электроэнергии на АЭС радиоактивные отходы низкого и среднего уровней активности, объемы которых после кондиционирования по имеющемуся опыту их переработки составляют менее 800 тонн в год на один ГВт электрической мощности, можно окончательно захоранивать в приповерхностных или подземных хранилищах, что и имеет место на практике в ряде стран, располагающих технологиями переработки облученного ядерного топлива.

Отходы высокого уровня активности, содержащие 99 % радиоактивности всех отходов ядерной энергетики, составляют около 30 тонн в год на один ГВт (эл.) мощности или 3 кубических метра кондиционированных отходов после переработки. Такие отходы в большинстве зарубежных стран хранятся во временных хранилищах. Для их долговременного безопасного захоронения ищутся соответствующие технические решения.

В России осуществляется государственная техническая политика по обращению с радиоактивными отходами, сформулированная на уровне концепции и реализуемая через соответствующие нормативные документы.

Этими документами определена необходимость комплексного решения проблемы обращения с радиоактивными отходами (РАО), начиная с нормирования их образования, сбора, временного хранения, подготовки к захоронению и надежной изоляции радионуклидов и других биологически опасных компонентов РАО от биосферы. Сформированы требования к размещению, устройству и оборудованию хранилищ для жидких и твердых радиоактивных отходов, указаны основные барьеры, которые должны препятствовать распространению радионуклидов в процессе сбора, переработки и временного хранения РАО. Определен основной принцип подготовки РАО к захоронению – концентрирование и перевод в твердые формы методами цементирования, остекловывания и другими с дальнейшим удалением отвержденных отходов на специально созданные полигоны (могильники), хотя разрешен и на практике реализуется как временный метод – подземное захоронение жидких ра-

диоактивных отходов. Однако в дальнейшем он должен быть заменен на методы кондиционирования ЖРО, их отверждения с организацией долговременного хранения. Существующие полигоны для подземного удаления жидких радиоактивных отходов должны быть законсервированы.

Мы добываем уран из земли. Это природная радиоактивность. В результате замкнутого топливного цикла использования реакторов можно осуществить трансмутацию долгоживущих изотопов в короткоживущие. После хранения достаточно короткое время (сто–двести лет) они приходят к такому же уровню радиоактивности, как и та, которая извлекается из земли вместе с урановой рудой. Какой Бог Землю создал, такой мы ее и оставим.

У. Маршалл в своей книге «Мой радиоактивный сад» приводит аналогию между радиоактивными отходами от АЭС и естественной радиоактивностью, которая существует в вашем садовом участке.

Радиоактивный материал, рассеянный в тоннах земли верхнего метрового слоя вашего участка, будем называть «садовой единицей» радиоактивности. Таким образом, садовая единица радиоактивности, поверхностный слой участка размерами 10х40 м до глубины 1 м, содержит 700 кг калия, в том числе – 0,8 кг калия-40, 6 кг тория, 2 кг урана.

Что такое потенциальные и реальные дозы и риск? Если кто-нибудь вдохнул бы за год всю радиоактивность, содержащуюся в верхнем метре сада, т.е. садовую единицу, то он получил бы потенциальную дозу. Но в действительности, благодаря экранированию и удержанию радиоактивности в почве, она в 10 раз меньше.

Если выделить всю радиоактивность из сада и сконцентрировать ее, будет ли это опаснее? Если ее съесть или сесть на нее, то она будет опаснее, если выкопать глубокую яму, поместить радиоактивность в нее и залить бетоном, то сад будет безопасным.

Следует отметить, что к настоящему времени ни в одной стране окончательное захоронение высокоактивных отходов в промышленных масштабах еще не производится.

Одним из перспективных вариантов, вполне реальным для осуществления через несколько десятков лет, является трансмутация. Ее сущность состоит в переводе долгоживущего изотопа путем внедрения в его ядро нейтрона или другой частицы в короткоживущий и затем – в стабильный изотоп. В результате облучения радиоактивного изотопа, требующего для распада 500–1000 лет, можно получить короткоживущий изотоп, который после выдержки (2–3 года) превратится практически полностью в стабильный изотоп.

Что такое МОКС-топливо ?

МОКС-топливо – это смешанное оксидное уран-плутониевое топливо ($UO_2 + PuO_2$) для реакторов атомных электростанций. Слово произошло от английского Mixed Oxide fuel.

Весной 1941 года Г. Сиборг с сотрудниками обнаружили и впервые выделили четверть микрограмма плутония-239, образовавшегося при облучении урана-238 нейтронами. В 1947 году З. Ершова получила первые в России 73 мкг плутония.

Плутоний (Pu) – это химический элемент с порядковым номером – 94. Плутоний имеет 16 изотопов. Наиболее важными изотопами являются Pu-238, Pu-239, Pu-240, Pu-241. Период полураспада Pu-239 – 24400 лет. Плутоний искусственно полученный элемент, хотя можно вспомнить и такой природный источник плутония, как естественный ядерный реактор в Окло (Африка), действовавший в естественных условиях 2 миллиарда лет назад на богатейшем урановом месторождении и нарабатывавший плутоний (около 4 т) в те далекие годы никому не нужный и позднее благополучно распавшийся. Реактор действовал 500 тыс. лет. Небольшое количество плутония образуется из урана при взаимодействии с нейтронами космического происхождения (в малых количествах уран рассеян везде), так что говорить об абсолютной чужеродности плутония для биосферы не вполне корректно. Важно подчеркнуть, что в настоящее время ученые могут достаточно быстро и точно определить даже в ничтожных количествах присутствие радиоактивных элементов в воде, почве, растениях.

Дальнейшая биография плутония связана с историей создания ядерного оружия и ее мирным приложением – атомной энергетикой. В результате испытаний ядерного оружия значительное количество плутония (более 4 т) было рассеяно в окружающей среде.

С 1942 года плутоний в США производится в специальных атомных реакторах для использования в ядерном оружии. После окончания Второй мировой войны СССР, а затем Великобритания и Франция быстро осваивают плутониевый технологический цикл, и количество некогда исчезнувшего с земли металла стремительно нарастает. Наконец, со второй половины текущего столетия интенсивное развитие получила ядерная энергетика, в которой одним из компонентов топливного цикла является плутоний. Окончание холодной войны и последовавшие за этим шаги по демонтажу ядерных боеприпасов и передачи излишков плутония, находившегося в боеголовках, в гражданский сектор, а также перемены в ядерной промышленности, особенно задержки с вводом в эксплуатацию быстрых реакторов размножителей, использующих в ка-

честве топлива плутоний явились причинами обострения плутониевой проблемы.

Плутоний обладает уникальным комплексом ядерных и физико-химических свойств.

Не менее интересными являются и теплофизические, механические и радиологические свойства этого элемента. Из-за существенной альфа-активности металлический плутоний саморазогревается.

Плутоний из энергетических реакторов обычно называют «гражданским» или «энергетическим», а наработанный в специальных (промышленных) реакторах – «оружейным». Эти материалы существенно различаются по изотопному составу.

За прошедшие годы получено большое количество экспериментальных данных о поведении плутония в природе. Так, поступающий в окружающую среду Pu быстро переходит в форму оксида (PuO_2), который мало растворим в почве и воде (растворимость в воде сравнима с морским песком), очень плохо переходит из почвы в растения, что практически радиационно безопасно для животных, пасущихся даже вблизи радиохимических заводов. Попавший в водоемы, он быстро осаждается и закрепляется в донных слоях.

Плутоний является радиационно, химически и биологически токсичным элементом. Но все эти опасности сильно преувеличены «зелеными» движениями.

«Один фунт плутония (0,454 кг) может убить все человечество...»

«... Достаточно распылить всего два грамма оружейного плутония, чтобы у всей Западной Сибири были большие проблемы ...»

Такие (и подобные) заявления, растиражированы в печатных изданиях и на телеэкранах, формируют у людей неосознанный, интуитивный страх перед всем «атомным».

Значение смертельной дозы плутония составляет около 20 мг при вдыхании его аэрозолей и примерно 500 мг при заглатывании.

Радиотоксичность связана с облучением альфа-частицами тех тканей, где происходит его накопление (в печени и скелете). Период биологического выделения половины накопленного плутония из печени составляет 20 лет, а из скелета – 50 лет, что сопоставимо с длительностью человеческой жизни.

В недавно опубликованной в Германии работе был дан анализ гипотетической ситуации, когда плутоний использовался террористами при попытке отравить население такого крупного города, как Мюнхен. В случае растворения 300 г плутония в крупном водохранилище, снабжающем город питьевой водой, только 3 мг останется в воде, а основная его часть попадет в донные отложения. Если весь этот плутоний (3 мг)

будет потреблен жителями, то можно ожидать дополнительно не более 1 % смертей от рака.

При вдыхании его химическая токсичность сопоставима с парами ртути или кадмия. Анализ биологического воздействия плутония показывает, что «традиционные» загрязнители биосферы (соли тяжелых металлов, формальдегиды, нитраты, пестициды и т.д.) гораздо более опасны практически по всем контролируемым показателям.

Прием внутрь 1 мкг представляет риск в 1 % развития рака (естественная вероятность возникновения рака – 20 %).

Международная комиссия по радиологической защите установила, что максимально допустимая концентрация Pu-239 составляет 0,23 мкг для легочной ткани.

2.4. Радиация и ее воздействие на живой организм

Неверным, по крайней мере, в своем абсолютном выражении, является положение, будто ядерная энергия «не от Бога», что она противостественная, что человек и все живое в своем развитии не обрели защитных инстинктов против радиоактивности.

Радиация не является каким-либо новым фактором воздействия на живые организмы, подобно многим химическим веществам, созданным человеком и ранее не существовавшим в природе.

Другими словами, мы живем в условиях радиации, организм к ней адаптировался, а по убеждению ряда ученых, именно радиация является источником генных мутаций, лежащих в основе развития всего живого.

Введем некоторые термины и определения радиации.

Радиация – это один из многих естественных факторов окружающей среды. Естественный радиационный фон влияет на жизнедеятельность человека, как и другие факторы окружающей среды, с которыми организм находится в состоянии непрерывного обмена.

Радиоактивный распад – это процесс самопроизвольного распада неустойчивых ядер в другие ядра (в конечном итоге, стабильные).

Радиация – излучение энергии в виде частиц или электромагнитных волн. При превращениях (распадах) радиоактивных ядер возникают различные виды излучения: альфа-, бета-, гамма-излучение, рентгеновское излучение, нейтроны, тяжелые ионы. При взаимодействии с веществом энергия излучения передается атомам и молекулам, превращая их в заряженные частицы-ионы. В результате ионизации разрываются химические связи молекул, в живых организмах, и тем самым вызываются биологически важные (соматические и генетические) изменения. Про-

цесс радиоактивного распада происходит с постоянной скоростью, присущей данному виду радиоактивных ядер (радионуклидов). Время, за которое распадается в среднем половина всех имеющихся радионуклидов, называется ПЕРИОДОМ ПОЛУРАСПАДА ($T_{1/2}$). Хотя все радионуклиды нестабильны, одни из них более нестабильны, чем другие. Например, протактиний-234 распадается почти моментально ($T_{1/2}=1,17$ минуты), а уран-238 – очень медленно (4,47 млрд лет). Количество распадающихся радионуклидов в единицу времени в веществе определяют термином АКТИВНОСТЬ. Единицы измерения активности радиоактивных веществ – кюри (Ки) и беккерель (Бк). Численному значению активности 1 Ки приблизительно соответствует активность 1 г радия в равновесии с продуктами его распада. За масштаб единицы 1 Бк принят 1 распад в секунду. Между единицами активности существует взаимосвязь: 1 Ки=37 млрд Бк, 1 Бк=1 расп./с.

Понятие активности ничего не говорит о виде радиоактивного излучения или о величине его энергии, а указывает лишь число атомов, распадающихся в секунду. Более того, одинаковая активность различных радиоактивных веществ не подразумевает одну и ту же степень поражения биологических тканей. Разные виды излучений сопровождаются высвобождением разного количества энергии и обладают разной проникающей способностью, поэтому они оказывают неодинаковое воздействие на ткани живого организма. Количественную характеристику излучения, обычно называемую ДОЗОЙ, измеряют в величинах энергии, поглощенной тканями организма.

ПОГЛОЩЕННАЯ ДОЗА – количество энергии излучения, поглощенное единицей массы облучаемого вещества. Единицы измерения поглощенной дозы – грей (Гр) и рад. 1 рад = 100 эрг/г, 1 Гр = 1 Дж/кг, 1 Гр = 100 рад. Существует также количественная характеристика поля ионизирующего излучения, основанная на величине ионизации сухого воздуха при атмосферном давлении. Единицей измерения является рентген (Р). Доза 1 Р соответствует примерно 1 млрд пар ионов в см^3 воздуха. Доза 1 Р накапливается за 1 час на расстоянии 1 м от источника радия массой 1 г, т. е. активностью примерно 1 Ки. В последнее время, в соответствии с рекомендациями Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ), основными единицами измерения поглощенной и эквивалентной дозы, являются грей и зиверт, соответственно. В данной публикации мы воспользуемся специальными единицами рад и бэр, которые ранее широко использовались, более привычны и часто применяются на практике в настоящее время.

Отдельные виды излучений отличаются друг от друга различной способностью повреждать ткани организма. Равные поглощенные дозы

не обязательно должны вызывать одинаковые биологические эффекты. Обычно при одинаковой величине поглощенной дозы рентгеновские лучи, гамма- и бета-излучение вызывают меньшие повреждения по сравнению с излучением тяжелых ядер. Нейтронное излучение занимает промежуточное положение. Поэтому при одной и той же поглощенной дозе радиобиологический эффект тем выше, чем плотнее ионизация, создаваемая излучением. Для количественной оценки этого влияния вводится «переводной» коэффициент, **ОТНОСИТЕЛЬНАЯ БИОЛОГИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ (ОБЭ)** или **КОЭФФИЦИЕНТ КАЧЕСТВА (КК)** излучения.

ОБЭ или КК какого-либо излучения – численный коэффициент, который устанавливает некий эквивалент между различными видами излучений и равен отношению поглощенной дозы эталонного излучения (принято рентгеновское излучение с энергией 180–250 кэВ), вызывающей определенный радиобиологический эффект, к дозе рассматриваемого излучения, вызывающей тот же биологический эффект. Поэтому мерой биологического воздействия каждого вида радиационного облучения служит **ЭКВИВАЛЕНТНАЯ ДОЗА**, которая определяется как поглощенная доза, умноженная на коэффициент качества. Коэффициент качества ионизирующего излучения равен 1 для рентгеновского, бета- и гамма-излучения, $3 \div 10$ – для протонов и быстрых нейтронов, 20 – для альфа-частиц. Единицами измерения эквивалентной дозы является бэр (биологический эквивалент рада) и зиверт (Зв). 1 Зв соответствует поглощенной дозе в 1 Дж/кг (для рентгеновского, гамма- и бета-излучения), $1 \text{ Зв} = 100 \text{ бэр}$, $1 \text{ бэр} = 10 \text{ мЗв}$. $1 \text{ бэр} = 10^3 \text{ мбэр} = 10^6 \text{ мкбэр}$.

Органы и ткани человека имеют разную чувствительность к облучению. Наиболее уязвимы красный костный мозг, гонады. Менее восприимчивы печень, щитовидная железа, мышцы и другие внутренние органы. Например, при одинаковой дозе облучения возникновение заболевания легких более вероятно, чем щитовидной железы, а облучение гонад опасно из-за возможности генетических повреждений. Поэтому дозы облучения органов и тканей также следует учитывать с разными коэффициентами, так называемыми коэффициентами радиационного риска для различных органов и тканей. Умножив эквивалентные дозы на соответствующие коэффициенты и просуммировав их по всем органам и тканям, получим **ЭФФЕКТИВНУЮ ЭКВИВАЛЕНТНУЮ ДОЗУ**, отражающую суммарный эффект облучения для организма; она также измеряется в зивертах или бэрах. Эти понятия описывают индивидуальные дозы облучения. Просуммировав индивидуальные эффективные эквивалентные дозы, полученные каждым человеком, определяют КОЛ-

ЛЕКТИВНУЮ ЭФФЕКТИВНУЮ ЭКВИВАЛЕНТНУЮ ДОЗУ, которая измеряется в человеко-бэрах (чел·бэр) или человеко-зивертах (чел·Зв).

Поскольку многие радионуклиды распадаются очень медленно и останутся радиоактивными и в отдаленном будущем, существует еще одно определение.

Ожидаемая (полная) коллективная эффективная эквивалентная доза – это коллективная эффективная эквивалентная доза, которую получат многие поколения людей от какого-либо радиоактивного источника за все время его дальнейшего существования.

На рис. 8 проиллюстрирована связь понятий поля, дозы и радиобиологического эффекта и единиц их измерения.

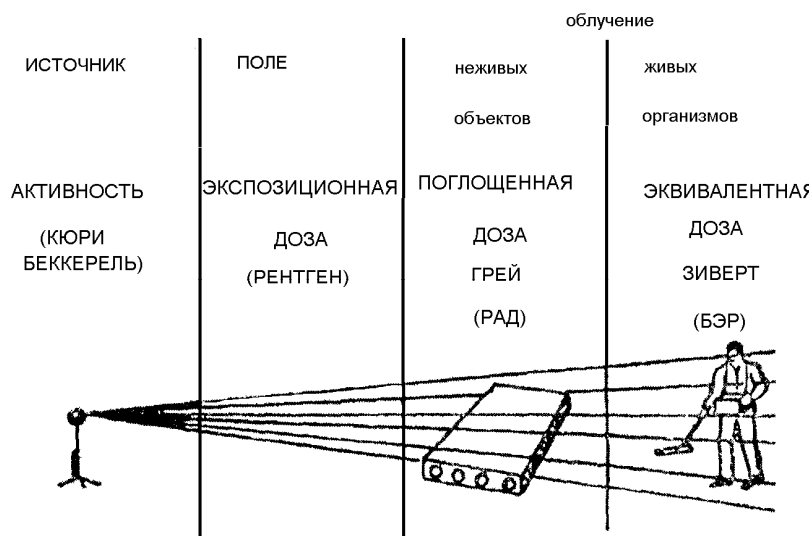


Рис. 8. Связь понятий поля, дозы, радиобиологического эффекта и единицы их измерений

Воздействие радиации на живой организм

Ионизирующее излучение, действуя на живой организм, вызывает в нем цепочку обратимых и необратимых изменений, которые приводят к тем или иным биологическим последствиям. Первичным этапом, инициирующим многообразные процессы, происходящие в биологическом объекте, является ионизация (от атома отрывается электрон).

В процессе ионизации происходит разрушение молекул вещества, образуются «свободные радикалы» и сильные окислители с высокой химической активностью.

Получающиеся в процессе радиолитического разложения воды (в биологической ткани 60–70 % по массе составляет вода), свободные радикалы и окислители,

обладая высокой химической активностью, вступают в химические реакции с молекулами белка и других структурных элементов биологической ткани, что приводит к изменению биохимических процессов в организме. В результате нарушаются обменные процессы, замедляется и прекращается рост тканей, возникают новые химические соединения, не свойственные организму. Это приводит к нарушению жизнедеятельности организма в целом.

Специфика действия ионизирующего излучения на биологические объекты заключается в том, что производимый им эффект обусловлен не столько количеством поглощенной энергии в облучаемом объекте, сколько той формой, в которой эта энергия передается (индуцированными свободными радикалами химические реакции вовлекают в этот процесс многие сотни и тысячи молекул, не затронутых излучением).

Никакой другой вид энергии (тепловой, электрической и др.), поглощенной биологическим объектом в том же количестве, не приводит к таким изменениям, какие вызывает ионизирующее излучение.

Например, смертельная доза ионизирующего излучения для человека, равная 600 рад (600 бэр), соответствует поглощенной энергии излучения $6 \cdot 10^4$ эрг/г. Если эту энергию подвести в виде тепла, то она нагрела бы тело едва ли на $0,001^\circ\text{C}$. Это тепловая энергия, заключенная в стакане горячего чая. Именно ионизация и возбуждение атомов и молекул обуславливают специфику действия ионизирующего излучения.

Радиоактивное облучение организма можно сравнить с артиллерийской стрельбой, большинство снарядов накрывает нечувствительные цели, рассеивая энергию в виде тепла и лишь малая часть поражает важные клеточные структуры. Химические яды бьют прицельно, реагируя только с определенными молекулами. Молекула угарного газа не успокоится, пока не найдет молекулу гемоглобина и не выведет ее из строя. Энергетический эквивалент химических реакций мал, но эффективность яда чудовищна.

В настоящее время среди ученых нет единой точки зрения по вопросу о биологических последствиях малых доз облучения. Некоторые считают, что зависимость доза–эффект имеет линейный вид, другие полагают, что вредные эффекты облучения выявляются, начиная с какого-то определенного порога. Третьи полагают, что небольшие дозы даже полезны. По-видимому, существуют как положительные, так и отрицательные радиационные эффекты малых доз. Науке еще только предстоит выяснить, какие – полезные или вредные для человека – эффекты будут преобладать в каждой конкретной ситуации и определить границу доз, за которой отрицательные эффекты доминируют.

Явной ложью является бытующее сейчас только у нас мнение «о непредсказуемости последствий радиационного воздействия на людей». На деле они известны лучше, чем каждодневное действие всех других вредных факторов.

В таблицах 5, 6 приведены средние годовые дозы облучения населения и дозы производственного облучения в мире [33].

Таблица 5

Средние годовые дозы облучения населения, мкЗв

Источники	Среднемировая доза	Типичный диапазон	Средняя доза по России
Природные			
Космическое излучение			
Ионизирующая компонента	280		280
Нейтронная компонента	100		100
Космогенные радионуклиды (C^{14} и др.)	12		12
Сумма	390	300–1000	390
Гамма-излучение	480	300–600	480
Ингаляция ^{210}Pb , ^{210}Po , ^{232}Th и др.	6		6
^{222}Rn и ДПР	1150		1730
^{220}Rn и ДПТ	100		150
Сумма	1260	200–10000	1890
Поступление с пищей и водой:			
^{40}K	170		170
^{210}Pb , ^{210}Po , ^{228}Ra , ^{226}Ra и др.	120		120
Сумма	290	200–800	290
Повышенное производственное облучение	2		
Итого	2400	1000–10000	3050
Источники	Среднемировая доза	Типичный диапазон	Средняя доза по России
Итого	2400	1000–10000	3050
Искусственные			
Медицинское облучение	400		1400
Глобальные выпадения	5		
Профессиональное облучение	0,5		
Загрязнение территорий	2		
Текущие выбросы и сбросы	<0,2		
Итого	400	0–1200	1200
Всего за счет всех источников	2800	1000–10000	4250

Таблица 6

Дозы производственного облучения в мире

Вид деятельности	Количество работников, тыс.	Ср. доза, (мЗв/год)	Кол. доза, чел.Зв/год
Ядерный топливный цикл			
Добыча урана	69	4,50	310
Дробление	6	3,30	20
Обогащение	13	0,12	1
Производство топлива	21	1,03	22
Эксплуатация реакторов	530	1,70	900
Переработка топлива	45	1,50	67
Научные исследования	120	0,78	90
ВСЕГО	800	1,75	1410
Медицинское использование излучения			
Диагностика	950	0,50	470
Дентальная практика	265	0,06	16
Ядерная медицина	115	0,79	90
Радиотерапия	120	0,55	65
Другие виды	870	0,14	120
ВСЕГО	2320	0,33	760
Промышленное использование излучения			
Радиография	106	1,58	170
Производство радиоизотопов	24	1,93	47
Другие виды	570	0,25	140
ВСЕГО	700	0,51	360
Военное использование излучения			
Вид деятельности	Количество работников, тыс.	Ср. доза, (мЗв/год)	Кол. доза, чел.Зв/год
Оружие	380	0,19	75
Суда и их обслуживание	40	0,62	25
ВСЕГО	420	0,24	100
Прочие виды использования			
Обучение	310	0,11	33
Ветеринария	45	0,18	8
ВСЕГО	360	0,11	41
Итого <i>Искусственные источники</i>	4600	0,60	2700

Промышленная деятельность человека и общественный риск

Повышенное внимание общества говорит о том, что ядерная энергетика не достигла уровня развития традиционной энергетике сжигания органического топлива или автомобилестроения, к проблемам которых

общество практически равнодушно. Сложившийся образ атомной энергетики, как врага природы и экологии, явно устарел.

Вся промышленная деятельность человечества (в том числе и атомная, и тепловая энергетика) оказывает техногенное воздействие на окружающую природную среду. Но когда начинаешь сравнивать вред от других технологий, общий риск для жизни, то приходишь к выводу, что без АЭС может быть ещё хуже.

Несмотря на высокую опасность производства связанного с радиацией, за 50 лет в мире от переоблучения погибло меньше людей, чем погибает ежедневно в результате автомобильных аварий. По данным ученых США вероятность погибнуть в результате аварии на предприятиях атомной промышленности в 100 раз ниже, чем в автомобильной катастрофе и в 1000 раз ниже, чем от болезни сердца.

Атомная отрасль – самая безопасная в промышленности. Среднестатистический риск для персонала в промышленности РФ составляет потерю 0,94 суток жизни за год работы (травматизм, профзаболевания и т.д.). В угольной промышленности – 2,21 суток, в атомной – 0,32.

Атомная отрасль не относится к числу главных источников ни по одному из основных показателей загрязнения окружающей природной среды:

- доля выбросов в общепромышленных выбросах – 0,6 %,
- доля в сбросе загрязненных сточных вод – 4,6 %,
- доля в суммарном объеме ежегодно образующихся и накопленных токсичных химических отходов – 1,1 %,
- доля в общей площади нарушенных земель – 1 %,
- площадь земель, пострадавших от р/а загрязнения не превышает 0,3-0,4 % от общей площади земель находящихся в состоянии экологического кризиса.

Доля лесов погибших от радиационного поражения за всю историю атомной промышленности (около 55 лет) составляет 0,3–0,4 % от массивов ежегодной гибели лесов в стране.

Гипотетический вклад техногенного радиационного облучения в ежегодную смертность населения России составляет 0,00005 %.

Вклад предприятий атомной отрасли в суммарное облучение населения составляет – 0,1 %. Согласно данным «Радиационно-гигиенического паспорта России за 2002 г.» ведущим фактором облучения населения являются природные и медицинские источники ионизирующего излучения.

Производство электроэнергии путём сжигания органического топлива – одна из самых экологически опасных технологий. Свыше 30 %

выбросов загрязняющих веществ, поступающих в природную среду, обусловлены работой тепловых электростанций.

Рассмотрим некоторые отрицательные эффекты, на которые «общественные» экологи практически не обращают внимание и от которых энергетика на органическом топливе не может избавиться в принципе.

Сжигание кислорода в атмосфере Земли. На сжигание 1 кг угля уходит 2 кг атмосферного кислорода, тогда как АЭС производит энергию, «не потребляя» кислород.

Специального внимания заслуживает вопрос о выбросах углекислого газа. При дыхании людей в атмосферу было выделено в 2000 году до 0,9–3,5 млрд т в год. За счёт сгорания угля – до 21 млрд т/год. Т.к. углекислый газ поглощает инфракрасное излучение, происходит аккумуляция части тепла, которое в противном случае рассеялось бы в космосе, что приводит к повышению температуры.

По мнению 49 ученых – лауреатов Нобелевской премии, последствия усиления парникового эффекта на планете могут быть сравнимы лишь с последствиями глобальной ядерной войны.

Средняя температура на планете к 2010 г. может повыситься на 1,3 °С, что приведет к повышению уровня Мирового океана, перераспределению осадков и изменению климатических систем.

В зоне вечной мерзлоты, занимающей примерно 58 % площади России, при потеплении климата из-за таяния будет разрушаться хозяйственная инфраструктура, под ударами окажутся области добывающей промышленности, энергетических и транспортных систем, коммунального хозяйства. В случае подъема уровня Мирового океана опасность грозит обширным низменным территориям Севера России, крупным приморским городам (например, затоплению Санкт–Петербурга).

Использование ядерной энергии уже в настоящее время позволяет почти на 10 % снизить выбросы в атмосферу углекислого газа в электроэнергетике.

Работа в течение 10 лет 34 реакторов мощностью 900 МВт (эл.) каждый сэкономила для Франции не менее 150 млрд франков и предотвратило огромное количество выбросов.

В заявлении ФРАМАТОМа говорится, что АЭС, производящие 1/3 всей электроэнергии в Европе, позволяют избежать выброса в атмосферу свыше 700 млн т углекислого газа в год, что равно количеству этого загрязняющего вещества, выбрасываемого автотранспортом в Западной Европе ежегодно.

По мнению специалистов, до 90 % всего объёма углекислого газа, основного «парникового» газа, может быть уловлено из дымовых газов с помощью химических абсорбционных процессов. При этом КПД

станции снизится с 40 до 29,3 %, а себестоимость производства электроэнергии увеличится на 2/3. Таким образом, улавливание «парникового» газа на ТЭС обойдётся даже дороже, чем очистка газов от золы, оксидов серы и азота и очистка сточных вод, вместе взятые.

Атмосферные выбросы от угольных станций стали причиной так называемых кислотных дождей, которые губят растительность, почву, водоёмы и, прежде всего, здоровье людей. Чтобы оценить объёмы выпадающих кислотных дождей достаточно представить себе, что одна ТЭС мощностью 1000 МВт, работающая на угле с содержанием серы около 3,5 %, несмотря на применение средств очистки, выбрасывает в атмосферу 140 тыс. т сернистого ангидрида в год, из которого образуется около 280 тыс. т серной кислоты. Двуокись азота способна вызвать отек легких. Сернистый ангидрид поражает верхние дыхательные пути. Канцерогенное действие тяжёлых металлов, выбрасываемых вместе с золой, в комментариях не нуждается. Итак, в результате сжигания угля возникает целый букет канцерогенных и мутагенных веществ. Ежегодный объём золошлаковых отходов ТЭС СНГ в настоящее время превышает 120 млн т. С поверхностей золоотвалов ветер поднимает золу, образуя пыльные бури. Использовать золу в качестве строительного материала не рекомендуется из-за повышенного радиационного фона.

Мало кто знает, что в процессе сжигания угля происходит радиоактивное загрязнение окружающей среды. При сжигании угля радионуклиды (уран, торий, радий, полоний-210, свинец-210 и т.д.) концентрируются в золе. Поэтому ТЭС являются более серьёзным источником внешнего и внутреннего облучения населения, проживающего на прилегающих территориях, чем нормально функционирующие АЭС.

ТЭЦ на угле ($N_{эл}=1000$ МВт) в течение года выделяет больше радиоактивности, чем АЭС, а в золе содержится столько урана-235, что достаточно для производства двух ядерных бомб при его выделении.

Мировой выброс урана и тория от сгорания угля составляет около 40000 т ежегодно.

ТЭЦ на угле России выбрасывают радионуклиды, превышающие 1000 т в год по урану. Для сравнения предприятиями Росатома России в 2001 г. в водные объекты выброшено 6,9 т урана, в атмосферу – 2,9 т.

Выбросы урана с угольной золой от ТЭЦ-4 г. Новосибирска превышает выброс урана от завода химических концентратов (изготовление тепловыделяющих элементов для реактора) в 7,5 раза.

Экспериментально установлено, что индивидуальные дозы облучения в районе расположения ТЭС мощностью 1 ГВт (эл) превышают аналогичную дозу вблизи АЭС в 5–10 раз. В настоящее время ядерная энергетика по-прежнему остаётся конкурентоспособной. Это можно

считать доказанным для Франции и большинства европейских и азиатских государств. Посмотрим на Запад, где безжалостная конкуренция определяет, что выгоднее. Капитальные затраты на АЭС выше, чем на ТЭС на ископаемом топливе, но и самые низкие затраты на топливо (в 2 и более раз). В капитальные затраты для АЭС включены отчисления на снятие станции с эксплуатации и хранение отходов. Во Франции, имеющей самое большое количество действующих АЭС в Европе, эти отчисления составляют 15 % от общих капитальных затрат. По предварительным оценкам отечественных специалистов, затраты на полную ликвидацию энергоблоков АЭС составляют до 20–30 % капитальных затрат на их сооружение (по оценкам специалистов США эти затраты – 7–10 %), что ведет к незначительному (1 %) увеличению стоимости энергии. В перспективе суммарные расходы на АЭС будут меньше благодаря более низкой стоимости ядерного топлива и устойчивости к инфляции. Эксплуатационные расходы на ТЭС возрастут, и значительно, т.к. потребуются дополнительные затраты, которые повлекут за собой ожидаемый пересмотр экологических нормативов.

Цена атомной энергии в странах Западной Европы ниже по сравнению со станциями, работающими на газе в 2,5 раза, на мазуте – в 2 раза и на угле – в 1,5 раза.

В США себестоимость 1 кВт·ч электроэнергии, вырабатываемой на ТЭС (уголь) – 2,07 цента; газа – 3,52 цента. По данным на август 2003 года, средняя стоимость 1 кВт·ч электроэнергии, производимой на АЭС составила 1,59 цента.

При средней мировой внешней цене 1 кВт·ч электроэнергии в 4 цента, внешняя стоимость, которая включает в себя затраты на ликвидацию всех воздействий на природу от способа преобразования энергии, не учитываемые, сейчас будет следующая: уголь ТЭЦ – 10,5 цента; мазутные – 4,7; газовые – 2,4; АЭС – 0,2.

По состоянию на конец 2001 г. себестоимость 1 кВт·ч на АЭС в европейской части России составила 19,2 коп. На ТЭС газ – 36,6 коп. (в два раза выше). Это цифры для тарифицированных газа и ядерного топлива. Если взять нетарифицированное топливо (установленную тарифом в несколько раз меньшую плату за него по сравнению с фактическими затратами на его добычу и транспорт), то разница в исходных издержках на производство электроэнергии на АЭС и ТЭС увеличится в 4–5 раз в пользу АЭС.

В 2001 г. в среднем тариф на шины (затраты на производство) АЭС в европейской части России составляет 19,2 коп./(кВт·ч), по газовым станциям – 23,6, мазутным – 72,7, газо-мазутным – 34,5, угольным – 44,5, по всем ТЭС в среднем – 36,6. Но собственные затраты на произ-

водство электроэнергии не учитывают еще затраты на сопровождение эксплуатации АЭС и развитие атомной энергетики, учет повысит стоимость до 35,2 коп./(кВт·ч).

Если учесть эти затраты РАО «ЕЭС России», то стоимость будет равной 40,8 коп./(кВт·ч), т.е. в 1,06 раза дороже.

Темпы роста тарифов для ТЭС опережают темпы роста тарифов на АЭС. 1 млрд кВт·ч атомной электроэнергии экономит стране 330 млн м³ газа.

Стоимость перевозки угля на угольные ТЭЦ в европейской части России выше, чем стоимость самого угля. Для парогазовых станций затраты на топливо 60–75 % от общей стоимости выработки электроэнергии, на АЭС – до 15 %.

Известно, что АЭС своей работой замещают природный газ на тепловых электростанциях. Если «Газпром» сможет использовать прямые договоры по покупке электроэнергии атомных станций, например в размере 5 млрд кВт·ч, то это позволит в течение года уменьшить потребление газа на ТЭС в размере 1,42 млрд м³ (при существующем КПД ТЭС на природном газе 38 процентов). За 10 лет уменьшение сжигания газа на ТЭС достигнет 14,2 млрд м³. Если в перспективе покупка электроэнергии АЭС будет, например, на 0,5–0,7 р. за кВт·ч ниже, чем покупка электроэнергии от ТЭС, то ежегодные затраты «Газпрома» на покупку 5 млрд кВт·ч в год электроэнергии будут на 2,5–3,5 млрд р. меньше.

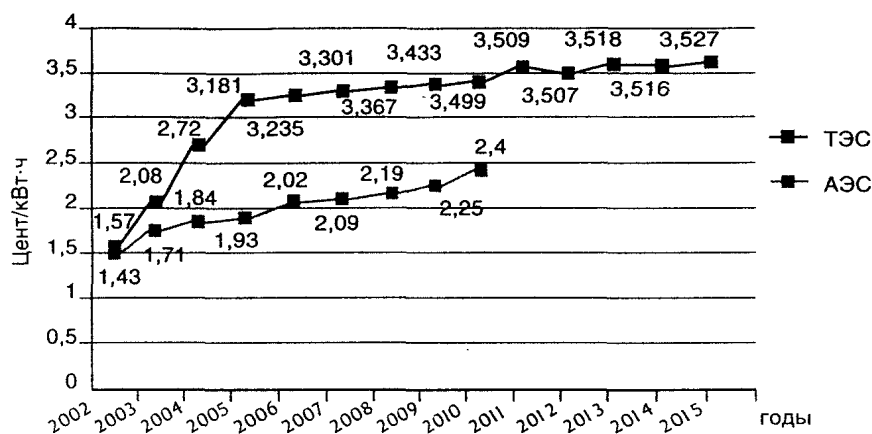


Рис. 9. Тариф на электроэнергию, производимую на ТЭС и АЭС

В декабре 2002 года «Газпром» и концерн «Росэнергоатом» подписали совместный протокол о намерениях по повышению эффективности транспортировки природного газа с использованием электроэнергии

АЭС для газотранспортных обществ. В протоколе отмечено, что поставка более дешевой (по сравнению с ТЭС) электроэнергии атомных станций позволит более эффективно использовать электроприводные ГПА, сократить объем газа, используемого на собственные нужды газотранспортных предприятий. При этом высвободившийся природный газ можно будет направить на обеспечение внутреннего газопотребления и на экспорт.

Мы живем в мире риска

Жизнь в промышленно развитом обществе сталкивает нас со многими опасностями, причем одни из них очевидны, например, риск автомобильной или авиационной катастрофы, другие более трудноразличимы, далеки от нашего сознания. Если под риском понимать вероятность погибнуть в течение года по той или иной причине (а таких причин в современной жизни достаточно), то в условиях каких рисков мы живём? Прежде всего надо отметить, что риск, обусловленный внутренней средой обитания человека, т.е. в результате различных заболеваний и старения, составляет $1 \cdot 10^{-2}$ в год. Это значит, что в среднем один человек из 100 умирает ежегодно от болезней и старости. Наибольший вклад в этот риск дают сердечно-сосудистые ($4,7 \cdot 10^{-3}$) и онкологические ($1,6 \cdot 10^{-3}$ в год) заболевания. Принято считать, что в среднем «житейский» риск составляет $1 \cdot 10^{-4}$, то есть из 10000 человек в течение года гибнет один (тонет, погибает на пожаре, землетрясении, наводнении, урагане и т.п.) в результате влияния естественной среды обитания. Кроме того, человек рискует погибнуть и от искусственной среды обитания, т.е. транспортных происшествий, загрязнения окружающей среды и т.д. Так, риск от курения (более 20 сигарет в день) составляет $5 \cdot 10^{-3}$ в год. По оценке американских экспертов, риск от 100 угольных и нефтяных электростанций (мощностью по 1000 МВт) в условиях США составляет $3 \cdot 10^{-5}$ в год. Это в 50 раз больше, чем для АЭС ($6 \cdot 10^{-7}$ в год). Из этих данных видно, что население добровольно подвергается достаточно высоким рискам (в результате курения, вождения автомобиля и т.п.), имеющим общее значение примерно $1 \cdot 10^{-3}$ в год. Риск же $1 \cdot 10^{-6}$ уже не вызывает тревоги и квалифицируется как «воля Божья». Естественный радиационный фон создаёт риск примерно около 30 % среднего «житейского».

Приведем несколько примеров.

Только в течение 2002 года в России, согласно данным МЧС, произошло 617 аварий техногенного характера, приведших к гибели 1157 че-

ловек. В то же время на предприятиях Минатома за последние 5 лет не произошло ни одной ядерной или радиационной аварии, повлекшей за собой гибель хотя бы одного человека.

От некачественного алкоголя в России погибает столько же народу, сколько в автоавариях. Радиационная опасность для жителя РФ меньше алкогольной в 15 тыс. раз.

Ежегодно в России в автокатастрофах погибает 30–40 тыс. человек, в результате убийств – 40 тыс. человек, от суицида – 120 тыс. человек.

Опасность, сопровождающая рентгенографию грудной клетки, равна риску, который мы испытываем при поездке на автомобиле, в больницу, если живем в 5–6 км от нее. Лечение с помощью радиоактивного йода щитовидной железы соответствует поездке на автомобиле в течение 6 месяцев или 4-месячному курению.

Радиационный риск, обусловленный работой 100 реакторов, производящих электроэнергию, сравним с риском при выкуривании 1/15 сигареты в год или движении в автомобиле на расстоянии 90 м в год.

В таблицах 7, 8 представлены индивидуальные риски для населения от различных источников опасности.

Людям свойственно не только различное отношение к риску, но и различие в оценке величины грозящей опасности. Различия в суждениях зависят от возраста, пола, воспитания, образования, рода занятий и т. д., и т. п. При этом угрожающие здоровью и жизни факторы, кажущиеся некоторым группам общественности самыми опасными, не являются таковыми на самом деле и наоборот. Недостаток информации или образования приводит к тому, что ряд факторов человеческая психика склонна преувеличивать и недооценивать.

Предлагаем уважаемому читателю расположить факторы по степени опасности.

Не знакомясь с данными столбцов (колонок) 1, 2, 3, 4, таблица 7 (Приложения), возьмите карандаш и в свободной колонке таблицы 8 проставьте места, на которые, по Вашему, мнению следовало бы поставить эти факторы по степени их опасности, причем против самого опасного, с Вашей точки зрения, фактора пишите цифру 1 и т.д., пока не дойдете до наименьшего опасного фактора, который окажется на 30-м месте.

Таблица 7

Риск, выраженный в сокращении средней продолжительности жизни

Деятельность, события	Сокращение средней продолжительности жизни в днях	Индивидуальный риск, 1/чел:год
Курение	1630	—
Работа в угольной шахте	1100	$1,2 \cdot 10^{-4}$ (США)
Излишний вес, 30 фунтов	920	—
Все несчастные случаи	450	$5,8 \cdot 10^{-4}$
Несчастные случаи на автотранспорте	200	$2,8 \cdot 10^{-4}$
Алкоголь	130	—
Самоубийство	85	$2,2 \cdot 10^{-4}$
Убийство	85	10^{-4}
Профессиональные несчастные случаи	655	—
Несчастные случаи на воде	42	$4 \cdot 10^{-5}$
Подъем ограничения скорости с 55 до 65 миль/час	40	—
Падения	40	$4 \cdot 10^{-5}$
Яды, удушья	38	—
Ожоги, пожар	28	$4 \cdot 10^{-5}$
Ядерная энергетика, вся энергетика США (оценка Союза обеспокоенных ученых)	2	—
Вся жизнь рядом с АЭС	0,05	$5 \cdot 10^{-8} \div 3 \cdot 10^{-7}$ (при дозе 1 мбэр на границе санитарной зоны)

Таблица 8

Фактор	Место по степени опасности	Фактор	Место по степени опасности
А. Курение		Р. Тушение пожаров	
Б. Употребление спиртных напитков		С. Работа в полиции	
В. Автомобили		Т. Противозачаточные средства	
Г. Ручное огнестрельное оружие		У. Гражданская авиация	
Д. Электричество		Ф. Атомная энергетика	
Е. Мотоциклы		Х. Альпинизм	
Ж. Плавание		Ц. Сельхозтехника	
З. Хирургическое вмешательство		Ч. Национальный футбол	

И. Рентгеновское облучение		Ш. Лыжи	
К. Железные дороги		Щ. Прививки	
Л. Авиация общего назначения		Э. Пищевые красители	
М. Большая стройка		а. Консерванты	
Н. Велосипеды		б. Пестициды	
О. Охота		в. Применение антибиотиков	
П. Бытовые травмы		г. Применение аэрозолей в быту	

А теперь сравните Ваши результаты с результатами колонок 1, 2, 3, таблицы 3 (Приложения), в которых представлены результаты интуитивных оценок опасности этих факторов, сделанных представителями трех групп населения (членами женской лиги, студентами и бизнесменами), и колонки 4 – результаты истинного положения вещей.

Насколько реальна Ваша интуиция?

По зарубежным данным, например, опасность электричества для жизни среди других причин женщины, студенты и бизнесмены дружно поставили на девятнадцатое место, в то время как реально, по числу со смертельным исходом (14000 в год в США), данный фактор находится на пятом месте.

К радиации, как к источнику опасности, отношение двойное, но в обоих случаях сопровождается значительными ошибками. Так, атомную энергетику женщины и студенты оценивают как самую большую опасность, а рентгеновское облучение все категории помещают примерно на одно (17–20-е) место, тогда как по числу летальных исходов рентгенодиагностика находится на девятом месте, а атомная энергетика – на двадцатом! Видно, что опасность первого источника недооценивается, а второго – значительно переоценивается. Обращает на себя внимание то, что общественное мнение меньше всего ошибается в случаях более простых и близких к обыденной жизни. Это, например, такие факторы, как курение, опасность хирургического вмешательства, травмы при строительстве.

Таким образом, риск, существующий при работе АЭС, очень мал и приемлем, когда он сравнивается со множеством различных опасностей, сознательно или бессознательно принимаемых человеком, ведущим активную или спокойную жизнь, и особенно когда этот риск сопоставляется с приносимой пользой и альтернативными решениями.

2.5. ЧЕРНОБЫЛЬСКАЯ АВАРИЯ. КАК ЭТО БЫЛО? ПОЧЕМУ ЭТО БЫЛО?

Даже сегодня, спустя 19 лет, Чернобыльская авария привлекает внимание общественности. Особенно наглядно это демонстрируют материалы, связанные с изучением ее причин. К настоящему времени выдвинуто уже свыше 110 версий причин чернобыльской аварии, среди которых есть и научно обоснованные, и спорные, и откровенно фантастические. Перечислим некоторые версии: диверсия, землетрясение, ядерный взрыв накопленного плутония, просто ядерный взрыв, ядерный взрыв в подпрыгивающем реакторе, реактор летающий в стратосфере, бесовская сила Чернобыля-2 и т.д.

Хотя средства массовой информации склонны трактовать любое событие на ядерных установках как потенциальную катастрофу, в действительности большинство этих событий, так же как и в других отраслях, характеризуется незначительными масштабами и последствиями. Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ) разработана и с 1990 года внедрена в России Международная шкала событий на АЭС, которая включает 7 уровней. Все страны обязаны в течении 24 часов сообщать МАГАТЭ о любых событиях, квалифицируемых на уровень 2 или выше по этой шкале.

Все возможные аварии на АЭС разделяются на две категории: аварии, не связанные с радиоактивными веществами, и аварии, при которых происходит выброс радиоактивных веществ в окружающую среду.

Конечно, на АЭС может сгореть трансформатор, выйти из строя подшипник насоса или даже возникнуть пожар, но подобные случаи в принципе не могут привести к выбросу радиоактивных веществ и создать радиационную опасность. Именно такие аварии на АЭС обычно и происходят, но происходят, как показывает практика, значительно реже, чем на ТЭЦ. Некоторые специалисты их даже вообще авариями не считают, а называют «происшествие» или «инцидент».

Аварии, связанные с радиацией, могут произойти, если разрушится реактор, нарушится герметичность первого контура. Для предотвращения подобных аварий существует специальная система аварийной защиты, которая должна остановить цепную реакцию и предотвратить разрушение реактора из-за перегрева. Если авария произойдет, то на пути радиоактивных продуктов стоят многочисленные барьеры, которые ограничивают их выход в окружающую среду. Так что в целом реактор является хорошо защищенной системой.

То, что это действительно так, подтверждает следующий факт.

В мире за более чем 50 лет функционирования атомной энергетики произошло две аварии со значительным выбросом радиоактивности – авария в Англии в Уиндскейле в 1957 году (7×10^{11} Бк) и авария в Чернобыле в 1986 году (2×10^{18} Бк). Обе аварии произошли на реакторах с графитовым замедлителем. В обоих случаях авариям сопутствовал пожар из-за возгорания графита. На водо-водяных энергетических реакторах за 7000 реакторо-лет (такой величиной измеряется сегодняшний опыт эксплуатации) не было ни одного случая значительного выброса. Авария на АЭС «Три-Майл-Айленд» в США привела к частичному расплавлению зоны, но выброса в окружающую среду практически не было. Концепция глубокоэшелонированной многобарьерной защиты от источников радиации показала здесь свое совершенство.

Несколько подробнее коснемся аварии на АЭС «Три-Майл-Айленд».

Вследствие грубейших ошибок персонала перегрелись и частично расплавились тепловыделяющие элементы. Однако конструкция внешней оболочки выдержала и никаких разрушений не произошло. Выброс радиоактивности оценивается в 9×10^{16} Бк, но она не вышла за пределы защитной зоны. Три сотрудника получили дозу втрое меньше той, которую большинство из нас ежегодно получают при прохождении флюорографии. Реальные расходы компании, потерявшей энергоблок, оцениваются в 2 млрд долларов. Интересно сравнить этот выброс с тем выбросом радиоактивности, который произошел при извержении вулкана Сент-Хемис 18 мая 1980 года. Природа сама рождает радиоактивность, и при извержении было выброшено $1,1 \times 10^{17}$ Бк – даже больше, чем при аварии на АЭС. Причем в выбросах вулкана радиоактивность была образована радием, торием, полонием, свинцом, калием, которые биологически потенциально более опасны.

Реактор РБМК, установленный в Чернобыле, относится к классу так называемых уран-графитовых реакторов. Тепловая мощность реактора 3200 МВт, электрическая – 1000 МВт. В реакторе РБМК в качестве замедлителя нейтронов применен графит, топливом служит двуокись урана, для охлаждения ТВЭЛов используется кипящая вода.

Перед остановкой четвертого блока ЧАЭС на плановый ремонт в пятницу, 26 апреля 1986 г., при проведении испытаний произошла Чернобыльская катастрофа.

В докладе экспертов, привлеченных МАГАТЭ из разных стран для анализа причин аварии на ЧАЭС, сказано: «Серия преднамеренных нарушений процедуры управления, чрезвычайных самих по себе, в сочетании со специфическими конструктивными особенностями реактора при работе на малой мощности привела к катастрофе».

Основной фактор, определивший масштабы последствия, – это положительный паровой эффект (т.е. быстрый рост мощности при вскипании теплоносителя), проявившийся при наложении ряда грубых ошибок персонала. Во многом этому способствовала неудачная конструкция систем глушения реактора, которая имела возможность в начальный момент вносить положительную реактивность и служить инициатором разгона реактора.

Последствия аварии были в 3–4 раза увеличены возгоранием графита в реакторе.

Несмотря на грубейшие ошибки персонала, физической причиной аварии явился положительный паровой коэффициент реактивности Чернобыльского реактора РБМК в состоянии на малой мощности, в котором он оказался при подготовке к проведению эксперимента. При положительном коэффициенте реактивности увеличение количества пара вызывает увеличение мощности, за ростом мощности следует рост паросодержания и т.д., происходит стремительный разгон реактора.

Чернобыльский реактор в состоянии перед аварией был подобен человеку, находящемуся над пропастью: чуть подтолкни его или просто оступись, и трагедия неизбежна. А на физическом языке это означает, что система неустойчива, флуктуация мощности или паросодержания может быть причиной развития аварийного процесса.

К сожалению, широкой и открытой экспертизы безопасности ЧАЭС с объективным рассмотрением свойств самозащитенности реактора не проводилось.

Не все знают, когда и с чего началась чернобыльская авария – за сутки до взрыва с безобидного звонка диспетчера республиканской энергосистемы, настойчиво просившего из-за острой нехватки мощностей отложить остановку четвертого блока на плановую перегрузку топлива. Выгоревшая, выдохшаяся, забитая под завязку радиоактивными шлаками активная зона реактора РБМК должна была протянуть еще 24 часа. Уже еле тлевшую цепную реакцию персоналу пришлось «раздуть», форсировать методами, запрещенными регламентом эксплуатации. Манипулируя управляющими стрелками в недопустимых масштабах, они фактически превратили РБМК в другой аппарат, и именно на нем начали в ночь на 24 апреля эксперимент с выбегом генератора. Насколько этот реактор отличался от стандартного РБМК, ясно по результату: когда в последний момент оператор нажал на кнопку АЗ-5, после чего РБМК должен вставать (и всегда вставал) как вкопанный, этот реактор пошел в разгон и взорвался...

Авария произошла не при нормальной эксплуатации реактора, а во время эксперимента, проведение которого было навязано эксплуатаци-

онному персоналу, хотя это вовсе и не входило в его функциональные обязанности.

Причины «организационного» характера связываются не столько со спецификой РБМК, сколько с общими особенностями развития атомной энергетики СССР в 80-е годы. В современных понятиях безопасности эти причины формируются следующим образом:

- низкий уровень «культуры безопасности» при эксплуатации, когда персоналом не осознается опасность нерегламентных действий;
- слабая надзорная деятельность, не позволившая выявить и устранить серьезные недостатки в эксплуатации и технических решениях по проекту Реакторной установки, запущенному в серийное производство.

Почему персонал реактора нарушил основные требования техники ядерной безопасности. По-видимому, имелось несколько причин:

1. Психологически персонал реактора не был подготовлен к возможности возникновения аварии, т.к. в течение длительного времени работали вполне нормально.
2. Возникшая самоуспокоенность автоматически была перенесена на штатную (испытание) работу реактора.
3. В связи с четкой работой реактора (что породило миф о его полной надежности) реактор постепенно превратился с точки зрения обслуживающего персонала в заурядный технический агрегат.
4. Производственная дисциплина должна была неукоснительно выполняться, но она должна обязательно опираться на глубокие профессиональные знания.

Вплоть до чернобыльской аварии общественное мнение было настроено благоприятно по отношению к развитию ядерной энергетики, однако общественное понимание сложности и потенциальной опасности ядерных технологий полностью отсутствовало. Чрезмерная лакировка положительных особенностей АЭС для общественности привела к трагическим последствиям для самой отрасли.

Вопросы безопасности не получили всей полноты внимания, которой они заслуживали, а были подчинены конъюнктурным, политическим и производственным целям. Ответственные за ядерную безопасность органы играли второстепенную роль. Операторы не были подготовлены к работе в аварийных условиях.

Не был учтен, как следовало бы, международный опыт в области реакторной безопасности, а также отсутствовало международное сотрудничество по вопросам безопасности.

Фактически эти реакторы РБМК рассматривались в качестве уникальных и не подлежащих лицензированию вне пределов страны.

Государственная пропаганда и цензура, пропускавшая в печать только хвалебные статьи о ядерной энергетике, сыграла двоякую роль: с одной стороны, успокоила население, которое не имело более другой информации, с другой стороны, успокоила и персонал.

Получило распространение «панибратское» отношение к сложной и потенциально опасной технике.

В то же время в среде специалистов одновременно шли острые дискуссии о путях развития энергетике, росла тревога об обеспечении безопасности при массовом строительстве АЭС, но их голос легко игнорировался.

Ни в коем случае не преуменьшая радиационную опасность ядерной энергетике следует подчеркнуть, что у нее нет той исключительности, с точки зрения опасности для людей, которую ей порой приписывают. В.А. Легасов говорил: «Ядерная энергия будет служить человечеству. Не может пропасть, исчезнуть величайшее открытие человеческого разума. Надо только до конца осознать, что мы не в конце пути, как думали до Чернобыля, а где-то в начале».

Есть ли возможность избежать многих катаклизмов? Да есть. Под угрозой катастрофического землетрясения, предсказанного учеными жил Сан-Франциско. Все жители готовились к нему, и когда оно случилось последствия оказались минимальными.

Так и с АЭС. Они безопасны, когда эксплуатируются высококлассными специалистами, а окрестные жители спят спокойно, если обладают всей полнотой информации и знают, что надо делать в любых нестандартных ситуациях.

Урок Чернобыля – это не только урок опасности атомной энергетики, но и урок опасности некомпетентности в современном мире. Большинство людей в Чернобыле пострадали не столько от самой радиоактивности, сколько из-за неумения обращаться с ней в экстремальных условиях. В Чернобыле профессионалов по ликвидации аварии не оказалось, потому что их не было в стране.

Это относится ко всем сферам нашего бытия. Мы пропадаем не без атомной энергетики, а без высококомпетентных специалистов.

Без доверия к экономистам, не прислушиваясь к их советам, экономика дойдет до коллапса. Дело главным образом заключается не в законах и структуре власти, а в наполнении эшелонов этой власти энергичными и компетентными людьми, для которых высшим мерилем истины является логика расчета, исторического, социального и научно-технического знания.

Отечественная и главным образом зарубежная практика показывает, что только надежная и безопасная эксплуатация АЭС, а также наличие у населения оперативной и полной информации о ее работе будут способствовать укреплению доверия к ядерной энергетике.

В наши дни даже самые горячие противники энергетики признают, что в режиме нормальной работы АЭС оказываются экономически выгоднее и экологически чище любых других источников энергии.

Основная критика сконцентрирована поэтому на возможных последствиях гипотетически тяжелых аварий. В любой сфере человеческой деятельности, в том числе и на объектах неядерной энергетики, происходят аварии, сопровождающиеся многочисленными человеческими жертвами и многомиллионными убытками.

В 1984 году произошли две крупные аварии. В Мексике на газораспределительном заводе взорвались емкости со сжиженным газом. В результате погибло 452 человека, пропало без вести 1000, ранено 4248, в радиусе до 1 километра разрушены здания.

Другая авария случилась в Бхопале (Индия). Произошла утечка смертоносного газа. Погибло 2,5 тысячи человек, пострадали сотни тысяч, ущерб составил 50 миллиардов американских долларов.

При добыче угля возможны аварии в шахтах: взрывы, вызванные накоплением метана, пожары, возникновение завалов. Появилась даже неофициальная мрачная статистика: за каждый миллион тонн добытого угля приходится расплачиваться одной человеческой жизнью.

В 1989 году в результате взрыва в продуктопроводе погибло 575 человек и еще 623 человека получили ожоги и ранения. Только в этом же продуктопроводе до катастрофы под Уфой произошло 40 аварий меньшего масштаба.

В периоде 1959 по 1987 гг. в мире произошла 31 крупная авария плотин, в результате которых погибло более 23 тыс. человек и был причинен ущерб свыше 1 млрд американских долларов.

Землетрясение в Армении, когда мгновенно рухнули многоэтажки, построенные с нарушением всех технических законов, унесло жизни 30 тыс. человек.

Для сравнения землетрясение в Калифорнии было точно такое же, как в Армении, и в гораздо более густонаселенном районе, а людей погибло в 100 раз меньше. Кстати, при этом из 5 калифорнийских АЭС не пострадала ни одна, а три из пяти не прекращали работу.

В течение года в результате несчастных случаев на производстве, и особенно в быту, в России гибнет не менее 100 тыс. человек и 1 млн. получают травмы.

Не считая транспортных катастроф, в США от несчастных случаев погибают втрое, а на душу населения – вчетверо меньше, чем в России. Такая статистика никого не волнует. Ядерную энергетику критикуют справедливо, но при этом забывают об основных положениях логики и объективности. По всем правилам требуется сравнение.

Бывшие руководители атомной промышленности, которые подверглись резкой критике за оптимистическую оценку безопасности АЭС, никого не пытались ввести в заблуждение! Их уверенность основывалась на том, что аварийность на АЭС невелика. В среднем погибал 1 человек в два года, а наша национальная норма, не вызывающая ни у кого возражений, – 200 тысяч человек в год.

Однако, перечисленные катастрофы практически не оставили следов в научной литературе и публицистике, а катастрофа в Чернобыле породила огромное количество научных трудов (компетентных и некомпетентных) и оставила неизгладимый след в общественном сознании.

Приведем данные официальной медицинской статистики из отчета научного комитета по действию атомной радиации (НКДР), выпущенного в 2002 г.

Чернобыльская авария стала самой крупномасштабной в истории человечества катастрофой, связанной с облучением. Она привела к серьезному социальному и психологическому надлому в жизни пострадавших людей, нанесла огромный экономический ущерб. На ликвидацию последствий аварии было затрачено 20 млрд долларов.

Общее число задействованных на ликвидации чернобыльской аварии людей составило ≈ 227 тыс. человек. На сегодня в результате аварии погибло 43 человека, количество заболевших острой лучевой болезнью – 134 человека. На 2000 г. в Украине, Белоруссии медиками поставлен диагноз рака щитовидной железы ~ 2000 человек. К счастью, этот рак достаточно хорошо лечится. Это заболевание единственное основополагающее радиологическое последствие аварии. Большая часть населения подверглась облучению в низких дозах с малой их мощностью. До настоящего времени не зафиксировано увеличение общей заболеваемости злокачественными опухолями или смертности, которые можно было бы отнести за счет действия радиационного облучения.

Всего за последние 50 лет атомной эры в нашей стране заболели острой лучевой болезнью 344 человека, включая моряков подводников, из них 71 человек умер. Неблагоприятные симптомы выявлены у 568 человек, среди них – 434 чернобыльца.

2.6. Перспективы атомной промышленности Сибири и Томского региона

В предыдущих разделах учебного пособия мы постарались дать читателю информацию, необходимую для выработки собственного осознанного и обоснованного отношения к проблемам развития энергетики вообще и ядерной энергетики в частности.

Несмотря на то, что в Сибири извлекаемые разведанные запасы нефти составляют 77 % запасов Российской Федерации, природного газа – 85 %, угля – 80 %, меди – 70 %, никеля – 68 %, свинца – 85 %, цинка – 77 %, молибдена – 82 %, золота – 41 %, металлов платиновой группы – 91 %, гидроэнергетические ресурсы – 45 %, биологические – более 41 %, ее экономическое развитие недостаточно.

К числу основных факторов, сдерживающих экономическое развитие Сибири относятся: качественное ухудшение сырьевой базы (доля трудноизвлекаемых запасов нефти и газа составляет 55–60% и продолжает расти); недостаточный уровень развития транспортной инфраструктуры; повышенный расход топливно-энергетических ресурсов на производственные и социальные нужды из-за суровых природно-климатических условий.

В соответствии с утвержденной Правительством РФ «Стратегией экономического развития Сибири» для повышения эффективности энергообеспечения, необходимо развитие атомной энергетики в Сибири, в регионах, где уже накоплен соответствующий научно-технический потенциал.

«Программа социально-экономического и технического развития Сибирского химического комбината на период с 2003 до 2012 года» предусматривает обеспечение устойчивого экономического и социального развития предприятия, сохранение рабочих мест и социальной стабильности как на комбинате, так и в г. Северске.

Она создает предпосылки для дальнейшего развития области, повышения конкурентоспособности не только самого производства, но и территории. 60 % продукции СХК идет на экспорт, который дает выручку в 100 млн долларов. Доля комбината в экспорте всей томской продукции составляет 80 %.

Программа получила поддержку областной администрации, а губернатор В. Кресс обещал обеспечить поддержку программе на политическом уровне. Важными элементами программы являются строительство завода по производству МОКС-топлива и строительство АЭС с двумя энергоблоками ВВЭР-1000.

Если первая задача уже начинает реализовываться и 7 апреля

2003 года министр РФ по атомной энергии А. Румянцев подписал приказ о рассмотрении вопроса по площадке для создания на СХК нового завода по конверсии плутония и изготовлению МОКС-топлива, то вторая задача находится в стадии рассмотрения.

В 2001 году в перечень мероприятий федеральной целевой программы «Энергоэффективная экономика» на 2002–2005 годы и на перспективу до 2010 года включены строки – «Разработка технико-экономического обоснования строительства Северской АЭС (2 энергоблока по 1000 МВт) со сроком окончания – 2009 г.».

В 2003 году закончены технико-экономические исследования по этому вопросу, которые выполнил Московский специализированный институт «Атомэнергoproject». Техничко-экономические исследования показали, что строительство АЭС выгодно, стоимость капитальных затрат на 1 кВт электрической энергии ниже 900 долл. США (обычно 1200–1500 долл.) при КПД ~ 43 %.

Кроме того, в 2005 – 2006 годах планируется остановка двух ядерных реакторов АДЭ–4 и АДЭ–5 на реакторном заводе СХК, производящих оружейный плутоний. Предположительно к 2013 году завершится программа ВОУ–НОУ. Поэтому перспективы создания нового перспективного производства отчасти позволят и далее развивать передовые атомные технологии в Томском регионе.

Завод по производству МОКС-топлива будет создаваться в рамках реализации российско-американской программы по утилизации оружейных материалов, которая предполагает перевод 68 метрических тонн оружейного плутония (по 34 тонны с каждой стороны: и американской, и российской) в МОКС-топливо с последующим использованием для производства электроэнергии.

Проблема обращения с плутонием является частью общего процесса ядерного разоружения, поскольку в ходе него в России и США высвобождаются значительные количества оружейных делящихся материалов – высокообогащённого урана и плутония. Политической целью действий по ее решению является необратимость процесса ядерного разоружения. Кроме того, плутоний является неизбежным спутником урановой ядерной энергетике, т.к. накапливается в активной зоне при работе любого энергетического реактора с урановым топливом.

Общее количество хранящегося в мире во всевозможных формах плутония оценивается примерно в 1200 т, из которых 2/3 находятся в отработавшем (облученном) ядерном топливе (ОЯТ) АЭС. Этот запас ежегодно возрастает на 50 т. Количество оружейного плутония оценивается в 270 т, из которых 150 т находится в России, 100 т в США, менее чем по 10 т во Франции и Китае.

Существуют два способа утилизации оружейного плутония. Первый – это его остекловывание с последующим хранением в глубоких геологических формациях. Второй – сжигание в атомных реакторах. По всем параметрам (экологическим, экономическим, стратегическим) и с точки зрения безопасности преимущество у второго способа. С этим сегодня согласны во всем мире. Для примера, на 1 кг плутония нужно 100 кг стекла или керамики. Цена способа – не менее 5 долл. США за каждый грамм плутония.

В сентябре 2000 г. Россия и США подписали межправительственное соглашение об утилизации оружейного плутония, где каждая из сторон взяла на себя обязательства утилизировать не менее 34 тонн плутония, изъятого из военных программ. Основные принципы этого соглашения поддержаны также другими странами Большой восьмерки. Российская программа будет нуждаться в финансовой поддержке западных промышленных стран.

Миссия разоружения может считаться выполненной только тогда, когда материал оружейного качества будет преобразован в форму, которая более не является опасной с точки зрения возможности ее использования для создания оружия. Оружейный плутоний, накопленный в результате демонтажа боеголовок, все еще опасен. Нужно гарантировать, что он не будет в будущем использован жаждущими ядерного оружия государствами или другими группами или организациями в неприемлемых для мирового сообщества целях.

Таким образом, оружейный плутоний будет использован для производства электроэнергии, и в этом процессе изотопный состав плутония будет меняться таким образом, что отработавший в реакторе плутоний не будет пригоден для изготовления ядерного оружия. С точки зрения разоружения это облучение представляет собой решающий (хотя и не обязательно конечный) этап процесса.

На строительство и эксплуатацию новых установок, модернизацию российских реакторов и т.д. необходимо, по оценкам экспертных групп, примерно 2 млрд долл. Экспертные группы предлагают полное международное финансирование проекта.

Чтобы исключить военные характеристики оружейного плутония, к нему будет добавлено до 4 т «гражданского» плутония, полученного при переработке топливных элементов легководных реакторов. В результате на установке СНЕМОХ будет получено 38 т двуокиси плутония и на установке ДЕМОКС, которую планируют соорудить в г. Северске, будет получено около 800 т МОКС-топлива.

Выход энергии этих топливных сборок составит приблизительно 320 млрд кВт·ч электроэнергии (эквивалент сжиганию приблизительно 96 млн т угля на угольной ТЭЦ).

На текущий момент реальными потребителями российского МОКС-топлива могут быть как АЭС России, так и зарубежные АЭС.

МОКС-топливо давно и успешно применяют во многих ядерных державах. В большинстве стран с развитой ядерной энергетикой – во Франции, Японии, Германии, Великобритании, Бельгии и других уже накоплен 10–15-летний опыт разработки, производства и эксплуатации смешанного уран-плутониевого оксидного топлива (МОКС-топливо). Лидерами в этой перспективной области, безусловно, являются страны Европы: Франция и Германия. Сейчас к ним присоединятся Россия и Америка. В США работы параллельно ведутся по двум направлениям – иммобилизация плутония с целью окончательного захоронения и сжигание в форме МОКС-топлива в действующих реакторах.

В России по своей оригинальной технологии МОКС-топливо изготавливают и используют в НИИ Атомных реакторов в г. Димитровграде, на производственном объединении «Маяк» действует опытная установка «Пакт», изготавливающая экспериментальные ТВС с МОКС-топливом для реактора БН-600 Белоярской АЭС.

Впрочем, северский завод будет возведен по французскому адаптированному «сценарию». Хотя ранее рассматривался другой вариант с перемещением на российскую землю уже построенного, но пока не запущенного в эксплуатацию завода из Федеративной Республики Германии. В настоящее время план выглядит так: поскольку свои 34 тонны оружейного плутония в МОКС-топливо должны превратить и американцы, они купили французский проект завода, который от аналогичных европейских отличается тем, что в нем основательно продумана система защиты от несанкционированного проникновения и возможных покушений террористов.

Для производства МОКС-топлива может служить обедненный уран с перерабатывающих заводов или из отходов обогатительных производств, а также природный уран. Плутониевый компонент МОКС-топлива выделяется из облученного топлива ядерных реакторов или из ядерных боеголовок. МОКС-топливо может использоваться как в тепловых, так и в быстрых реакторах. При этом содержание плутония в топливе для тепловых реакторов составляет 4...5 %, а для реакторов на быстрых нейтронах существующие технологии обеспечивают значения до 45 %. Наиболее эффективно применение МОКС-топлива в реакторах на быстрых нейтронах.

В настоящее время существуют два принципиально различных метода получения МОКС–топлива.

Первый заключается в механическом смешивании исходных порошков диоксидов урана и плутония (МСО), подготовке пресс-порошка с высокой равномерностью перемешивания диоксидов, смешивании его со связкой (например, стеаратом цинка). Далее осуществляется обычный процесс прессования и спекания таблеток, их шлифовка (если это необходимо) и контроль качества. Другой способ состоит в соосаждении порошкообразного твердого раствора (U, Pu)O₂ из нитратных растворов соединений урана плутония. В этом методе предъявляются высокие требования к степени очистки азотнокислых растворов урана и плутония.

Независимо от способа получения, МОКС-топливо должно удовлетворять ряду требований, из которых основные – это высокая гомогенность твердого раствора диоксидов урана и плутония для обеспечения равномерности энерговыделения и его хорошая растворимость в азотной кислоте для перевода в раствор облученного ядерного топлива при его химической переработке. Основная доля МОКС-топлива в мире производится с использованием технологии механического смешивания.

Поведение МОКС-топлива под облучением в целом соответствует достаточно изученному поведению диоксида урана (UO₂).

Одно из главных возражений против строительства завода по изготовлению МОКС-топлива связано с опасностью самого производства МОКС-топлива.

Такая аргументация усиливается ссылками на «международный опыт», опыт «цивилизованных» стран. Приведем пример такого опыта.

В 2003 году Правительство Великобритании приветствовало решение постоянного арбитражного суда в Гааге, отклонившего требование Правительства Ирландии о прекращении эксплуатации завода по изготовлению МОКС-топлива в Селлафилде. «Даже в доказательствах, представленных Ирландской стороной, нет научного обоснования выдвинутых обвинений в загрязнении окружающей среды и оснований для каких-либо экстраординарных юридических действий. Такие решения находятся в компетенции международных инстанций, которые в состоянии определить, выполняем мы свои обязательства или нет. Я хотел бы напомнить, что во всех предыдущих случаях, когда этот вопрос выносился на обсуждение, обвинения против завода оказывались несостоятельными», – сказал Премьер-министр Т. Блэйр.

Результаты исследования, опубликованного в США в 1989 г., свидетельствуют, что риск от внешнего топливного цикла ВВЭР (добыча

руды, обогащение урана, изготовление, переработка и изготовление МОКС-топлива, транспортировка, захоронение РАО) составляет примерно 1% риска эксплуатации АЭС. Для сравнения: риск при проживании в течение всей жизни рядом с АЭС, работающей в штатном режиме, составляет 10^{-7} /год.

Основные технические причины, лежащие в основе меньшего риска от переработки ядерного топлива (изготовление МОКС-топлива), заключаются в том, что радиоактивность продуктов деления в результате распада снижена до приемлемых значений.

Специалистами были проведены предварительные расчеты: доля облучения от радиоактивных веществ, поступающих в атмосферу, не превысит 0.1% от установленного предела, что в тысячу раз меньше допустимого предела.

Доза от радиоактивных воздействия на окружающую среду завода по производству МОКС-топлива, взятого за прототип нашего (французский завод «МЕЛОКС», эксплуатируемый с 1995 года) в 2000 раз меньше естественного природного радиационного фона.

С учетом того что в Северске будет закрыт реакторный завод, экологическая обстановка в нашем регионе, наоборот, даже улучшится.

Ни на одном из этапов изготовления МОКС-топлива человек напрямую не контактирует с радиационными веществами: процессы разгрузки, выдержки и собственно переработки полностью механизированы и осуществляются дистанционно в герметичных помещениях. Профессионал лишь производит манипуляции, сидя за монитором.

Контейнеры для ОЯТ обеспечивают безаварийность перевозки и хранения в чрезвычайных ситуациях – падения с высоты 9 метров, нахождения в зоне пожара и даже при падении на него самолета.

«Есть опасения, что, после того как завод по производству МОКС-топлива будет построен, г. Томск утратит инвестиционную привлекательность, кто отправит учиться ребенка в город, где построен завод».

«Что даст строительство завода по производству МОКС-топлива России и Томску?»

В настоящее время заводы по изготовлению МОКС-топлива построены и успешно работают во Франции, Японии, Англии и др.

При сравнимых занимаемых площадях плотность населения в Томской области составляет ~ 3 человека на км^2 , в то время как во Франции – 100 чел/ км^2 , Англии – 224, Японии – 327. Следует отметить, что доля ядерной энергетики в производстве электроэнергии составляет: Франция – 77,7 %, Англия ≈ 30 %, Япония – 35 %, Россия – 15 %.

Вряд ли можно говорить, что эти страны утратили свою инвестиционную привлекательность, и если есть такая возможность, то любая

семья готова отправить своего ребенка учиться в университеты этих стран.

Их образовательный престиж объясняется главным образом тесным контактом системы образования с передовыми технологиями и производством, где эти технологии используются для создания материальных благ.

Завод по производству МОКС-топлива, как часть атомной энергетики, есть результат лучших мировых достижений в области высоких, наукоёмких технологий, призванных решить проблему не только утилизации оружейного плутония, но также и энергодефицита.

Производство МОКС-топлива неизбежно приведёт к посещениям города Томска крупными специалистами по контролю из ООН, МАГАТЭ, аппаратов правительств мировых держав, учёными, юристами, экономистами, деловые и научные контакты с которыми повысят образовательный уровень. Необходимость в специалистах в новых мировых стандартах улучшит практику стажировки томских студентов и аспирантов в лучших зарубежных университетах.

Решаются радиационно-экологические проблемы современной России – продукт гонки ядерных вооружений времен холодной войны. Соблюдается режим нераспространения и решаются проблемы обращения с РАО. На сегодня необходимо согласиться, что имеется всего три варианта долгосрочного и достаточного обеспечения первичными энергоресурсами: ядерная энергетика, солнечная энергетика и термоядерная энергетика. Два последних варианта обоснованы пока только теоретически. Это положение нельзя изменить ни политикой, ни экономикой, ни общественными движениями или референдумами. Чтобы избежать энергетический кризис уже в обозримом будущем, Россия должна иметь дополнительный запас энергоресурсов МОКС-топлива.

Кроме того, расширение участия России в международном рынке обращения с ОЯТ означало бы полноценное присутствие нашей страны в одном из самых доходных и престижных секторов мировой экономики, это существенно подняло бы экономический и полигамический вес России за рубежом, обеспечило бы растущий интерес инвесторов к экономике страны. Налаживание долгосрочных экономических связей привело бы к общему повышению уровня безопасности в данной сфере. Одновременно упрочилась бы деловая репутация как страны в целом, так и её регионов, отраслей, предприятий. Перспектива создания нового производства отчасти снимет проблему занятости на градообразующем предприятии, позволит и дальше развивать атомную энергетику в регионе.

Потребление энергоресурсов и электроэнергии в Томской области более чем на 60 % зависит от поставок извне. Поэтому энергетическая независимость Томского региона является ключевым вопросом, а взятие курса на достижение региональной энергетической безопасности далеко не простое дело. Бедность энергоресурсами и забота об экологии побуждают к сооружению такого типа энергоисточника, экономические показатели которого не зависят ни от его дефицитности, ни от топливной конъюнктуры, ни от места расположения.

Согласно данным современных социально-гигиенических исследований непосредственный вклад загрязнения окружающей среды в ухудшение состояния здоровья населения города составляет более 25 %.

По данным экологического обзора, выполненным Государственным комитетом экологии и природных ресурсов Томской области, несмотря на значительную занимаемую площадь (около 320 тыс.км² – 2 % площади РФ), низкую численность населения (~ 1,1 млн человек) и относительно невысокий народно-хозяйственный потенциал, экологическая обстановка области является напряженной.

Основной вклад в выброс вредных веществ вносят предприятия сельского хозяйства (41 %), предприятия топливной промышленности (нефтегазодобывающий комплекс 29 %), ЖКХ (12,5 %), электроэнергетики (7,4 %). Наибольшая степень улавливания на предприятиях электроэнергетического комплекса до 82 %, наименьшая на предприятиях топливной промышленности – 0,015 %. Кроме того, за счет особенностей климатических условий Томска (среднегодовая температура воздуха – 0,5 °С), потенциальные способности атмосферы к рассеиванию существенно меньше, чем в других регионах.

В области имеется 9 предприятий электроэнергетики и 191 котельная. Наиболее крупным источником централизованного теплоснабжения г. Томска является ГРЭС–2. Значительная часть основного оборудования изношена и морально устарела. В северном промузле г.Томска сооружается ТЭЦ–3.

В 1999 году предприятиями области было использовано 2082 тыс. т угля и 1414,9 млн м³ газа. Наиболее крупными потребителями топлива являются Сибирский химический комбинат (56 % всего потребляемого угля) и ОАО «Томскэнерго» (24 %). Сегодняшний потенциал Томскэнерго – 400 МВт эл. энергии, 2055 Гкалл/ч тепловая мощность. Ежегодно вырабатывается 1,5 млрд кВт·ч электроэнергии. В отходящих газах от котлов ТЭК, сжигающих твердое топливо, в значительных количествах содержится летучая зола, окислы серы, оксиды азота и углерода. Зона распространения высоких концентраций золы от ГРЭС–2 составляет 8–10 км и по следу факела может достигать 7 ПДК. По газооб-

разным ингредиентам, как и на всех объектах ТЭК России, очистка не производится.

Улавливание углекислого газа обойдется дороже, чем очистка газов от золы, оксидов серы и азота, и очистка сточных вод, вместе взятые. Концентрации диоксида азота и серы от ГРЭС–2 могут превышать 2 ПДК.

Золоотвалы служат источниками негативного воздействия на состояние подземных и поверхностных вод на почву и воздушную среду, а в конечном итоге – на здоровье населения. ГРЭС–2 имеет в настоящее время два золоотвала в пределах города общей площадью 94 га, где накоплено свыше 3,4 млн т золошлаковых отходов.

Экологическая проблема могла бы быть частично решена за счет перевода объектов ТЭК на природный газ. При всех достоинствах газа нельзя забывать, что с его использованием связано очень много проблем, возникающих при его добыче, транспортировке и конечном потреблении. Кроме того, Томская область все еще пользуется «чужим» газом и в смысле запасов органического сырья является неперспективной (газа хватит на 35 лет, нефти – на 20 лет). Цены на газ сегодня в результате государственного регулирования ниже цен на отечественный уголь и существенно ниже зарубежных цен (~1,5÷2 раза), и поэтому в ближайшее время они будут подтянуты до мировых, как произошло с углем.

В Томске разработана областная программа энергосбережения, которая получила высокую оценку на федеральном уровне. Но, по нашему мнению, в ней недостаточно внимания уделено развитию ядерной энергетики. А ведь она является энергосберегающей технологией, т.к. удовлетворяет основным требованиям минимального потребления энергии на собственные нужды (около 4 % в ядерном топливном цикле) и отработанное топливо используется в качестве вторичных ресурсов.

Первое тепло от ядерных реакторов в Томск поступило в декабре 1973 года. За все 30 лет эксплуатации комплекса дальнего теплоснабжения на базе АЭС–2 не было ни одного случая аварийного прекращения подачи тепла потребителям. Как указывал бывший начальник управления «Химстрой» П. Пронягин, во-первых, томские энергетики с малыми заботами получили готовое тепло, построенные сооружения и разводящие тепломагистрали, во-вторых, получили теплоноситель по цене 1 руб. 30 коп. за гигакалорию, тогда как теплоноситель с ГРЭС–2 стоил 3 руб. 40 коп., реализуя его получателям по 4 руб. Ежегодная прибыль обещала быть до 8 млн руб. (цены 1974 г.). Доказательством большого экономического, экологического и социального эффекта от использования ядерного источника тепла является присуждение коллек-

тиву создателей комплекса теплоснабжения г. Томска Государственной премии СССР за 1978 год.

Теплоснабжение, за счет которого обеспечивалось более 20 % потребностей в тепле г.Томска, служило и продолжает служить интересам населения города и области.

Попробуем оценить последствия гипотетической ситуации, при которой АЭС–2 была бы заменена на ТЭС, работающую на Березовском угле.

Результаты оценочных расчетов показали, что если бы такое же количество тепла выработала ТЭС, аналогичной мощности, то за 30 лет работы:

- понадобилось бы добыть, перевезти и сжечь около 25 млн т угля;
- в окружающую среду поступило бы более 65 млн т углекислого газа, 300 тыс. т оксидов серы, 220 тыс. т оксидов азота;
- накопилось бы около 5 млн. т твердых отходов (зола и шлак), причем летучая зола составила бы 230 тыс. т;
- объем потребленного кислорода составил бы 52 млн. т;
- золошлаковые отвалы содержали бы токсичные элементы (мышьяк – до 300 т, ртути – до 100 т, ванадия – до 400 т и др.);
- золошлаковые отвалы содержали также естественные радионуклиды (калий – 40 до 3,9 т; уран – 238 – до 60 т; радий – 226 до 5 г; свинец – 210 до 0,2 г; полоний – 210 – $2 \cdot 10^{-3}$ г).

Активность естественных радиоактивных нуклидов в шлаках и золе составила бы около 430 Ки; выбросы радионуклидов в атмосферу в виде летучей золы до 15 Ки.

Проведем оценочные экономические расчеты.

Если бы в течение 30 лет АЭС–2 работала на угле, то топливная составляющая достигла бы 7 млрд рублей без транспортных расходов.

В мировой практике существуют различные экономические оценки экологических ущербов. Внешняя стоимость топливного цикла (ВСТЦ) включает ущерб (полная экономическая стоимость вреда, связанная с физическим воздействием), наносимый естественной и техногенной окружающей среде, – глобальное потепление, профессиональные заболевания, аварии, влияние газоаэрозольных и радиоактивных выбросов на здоровье населения, сельскохозяйственные культуры, леса, радиационные и нерадиационные воздействия.

В противоположность угольным циклам стадия производства энергии в ядерных не является доминирующим источником вредных выбросов в окружающую среду. В ряде зарубежных исследований разработаны экономические эквиваленты удельным экологическим ущербам от различных загрязнителей. Например, стандартные экономические экви-

валенты выбросам в атмосферу, разработанные в рамках программы TEMIS (Total Emission Model for Integrated System, Институт прикладной экологии, Германия, 1993 г.), составляют за одну тонну выбросов оксидов серы – 5 000 нем. марок; оксидов азота – 4 000 и т.д.

Следует иметь в виду, что приводимые данные относятся к современным западным энергетическим технологиям, от которых, как известно, Россия отстает по экологическим показателям. На основании этих показателей рассчитаны экономические значения экологических ущербов. Если бы АЭС–2 была бы замещена на ТЭС аналогичной мощности – АЭС–2 за 30 лет работы сэкономила 13,9 млрд экологических долларов.

Некоторые факторы, которые здесь количественно не оцениваются, должны значительно увеличить эколого-экономический эффект от развития атомной энергетики: потребление тепловой энергетикой кислорода и природоохранные мероприятия для его восстановления, выбросы тяжелых элементов на ТЭС и нарастание парникового эффекта, последствия которого в настоящее время широко обсуждаются и ощущаются. Большое значение имеет также экологический ущерб, связанный с временным или постоянным отчуждением земельных ресурсов.

В Сибирском регионе в 2000-м году дефицит электрической энергии составил:

- в Омской области – 3 млрд кВт·ч;
- в Кемеровской области – 5 млрд кВт·ч;
- в Алтайском крае и республике Алтай – 6,5 млрд кВт·ч;
- в Томской области – 3,6 млрд кВт·ч;
- в Новосибирской области – 800 млн кВт·ч.

В Сибирском регионе имеются все предприятия, обеспечивающие полный ядерный цикл от добычи и переработки уранового сырья и изготовления топливных сборок до утилизации облученного ядерного топлива, что обеспечит и оптимизирует функционирование АЭС.

- Добыча руды и производство уранового концентрата размещается в Краснокаменске (Читинская область);
- производство гексафторида урана – в городах Ангарске (Иркутская область), Северске (Томская область);
- производство низкообогащенного урана – в Ангарске, Северске, Зеленогорске (Красноярский край);
- изготовление топлива для атомных станций осуществляется в Новосибирске. Прорабатываются вопросы производства диоксида урана и МОКС-топлива в Северске;

- «сжигание» ядерного топлива осуществляется на АЭС городов Северска и Железногорска (Красноярский край);
- долговременное хранение отработанного топлива – в Железногорске.

Современная потребность г. Томска в электроэнергетических мощностях составляет 1000 МВт и постоянно будет возрастать. Наиболее рационально, надежно и на долгую перспективу решить энергетические проблемы области можно на базе атомных энергоисточников, в частности за счет строительства двухблочной АЭС с реакторами ВВЭР-1000.

Наличие в г. Северске необходимой инфраструктуры, кадрового потенциала, способного эксплуатировать объекты ядерной энергетики, существенно ускорит и удешевит строительство.

ВВЭР-1000 – это реактор повышенной безопасности, соответствующий всем международным требованиям, предъявляемым к атомным станциям, ввод которых намечен после 2000 года. В настоящее время – это базовый проект атомной энергетики России. Саморегулирование и самоограничение, самоциркуляция и самоохладение – эти свойства легко проверяемы и позволяют реактору самому спасти себя в трудных ситуациях (по терминологии МАГАТЭ – «всепрощающий реактор»).

Геологическое строение Томской области благоприятствует созданию здесь АЭС – это спокойный в сейсмическом отношении район, имеющий породы, пригодные для захоронения РАО (объем РАО – мал).

Основные технико-экономические показатели ТЭС и АЭС с реакторами ВВЭР мощностью 1000 МВт(эл.) представлены в табл. 9.

Особо обратим внимание на топливные составляющие для этих электростанций (цены 2002 года).

Угольная – 2.0 – 2.8 млрд руб. в год.

Газовая – 1.0 – 1.8 млрд руб. в год.

АЭС – 260 – 500 млн руб. в год.

Кроме того, для АЭС (N = 1000 МВт) необходима ежегодная загрузка 29,1 т U-238 и 0,9 т U-235. Эти количества ядерного топлива имеют активности 10 кюри по U-238 и 2 кюри по U-235. Активность ежегодной загрузки угля составляет до 50 Ки.

Таблица 9

Показатели	ТЭС	АЭС
Затраты на топливообеспечение, млрд руб.	2,1	0,26÷0,5
Стоимость сооружения, млрд руб.	20,4	23,4÷26,3
Средний тариф на шинах (затраты на производство) коп./кВт·ч	36,3	19,2
Продолжительность строительства, годы	3÷5	4÷6
Потребление топлива для ТЭС и АЭС мощностью 1ГВт(эл), т/год	$3 \cdot 10^6$	30 (200т природного урана)
Трудоёмкость энергопроизводства, чел/ГВт·год	1016	878
Топливные, эксплуатационные, капитальные затраты, %	40 20 40	10 20 70
Отчуждение земли, га	120÷160	30÷60
Потребление атмосферного кислорода, м ³ /год	$5,5 \cdot 10^9$	–
Вода (безвозвратные потери), млн м ³	19,2	+
Твёрдые отходы, т/год (м ³ /год)	700000 (420000)	Среднеактивные + низкоактивные < 800 (160) отработанное ядерное топливо (высокоактивные) 25÷30 (2,5).
Выбросы в атмосферу, т/год		
CO ₂	8146800	–
SO ₂	30660	–
NO _x	32412	–
Зола	25839	–
C ¹⁴ (ПДА, Бк/м ³)		$17,2 \cdot 10^{-7}$ ($1,1 \cdot 10^2$)
T ³ (ПДА, Бк/м ³)		$20,6 \cdot 10^{-6}$ ($7,6 \cdot 10^3$)
Активность свежезагруженного топлива, Ки	3,51÷57,09	11,76
Активность отходов, поступающих в биосферу, Ки	65,65	$1,8 \cdot 10^{4**}$
Мощность тепловых сбросов в конденсатор, % от общей тепловой мощности	52	67
Мощность тепловых сбросов через трубу в атмосферу, % от общей тепловой мощности	15	0
Число случаев преждевременной смерти	0,055 (360*)	0,11
Потеря трудоспособности, чел·лет	1,4 (7200*)	2,2
Сокращение продолжительности жизни, чел·лет	2,2 (10 ⁴ *)	3,3
Раковые заболевания с летальным исходом	+	$3,2 \cdot 10^{-2}$
Раковые заболевания без летального исхода	+	$7,6 \cdot 10^{-2}$
Генетические повреждения	+	$6,4 \cdot 10^{-3}$
Коллективная доза облучения населения, чел·Зв/ГВт·год	4	0,4÷1,8

* Заболевания нерадиационной этиологии.

** Активность поступающих в биосферу отходов от АЭС зависит от учета категории радионуклидов. Например. Активность газов в случае выдержки их в газгольдере перед выбросом их в атмосферу уменьшается за счет распада короткоживущих радионуклидов.

В Томской области наблюдения за радиационной обстановкой и радиоактивным загрязнением объектов окружающей среды в 2002 году

осуществляли 9 организаций. По данным ежегодного отчета «Состояние окружающей среды Томской области. Экологический мониторинг», г. Томск 2003 г., радиационная обстановка на территории Томской области в 2002 году по сравнению с прошлыми годами продолжала постепенно улучшаться. Накопление на почве радионуклидов, выпавших из атмосферы, повсюду было незначительным. Аварий на радиационно-опасных объектах не было. В целом в 2002 году радиационная обстановка на территории Томской области оставалась удовлетворительной и стабильной.

В работе [40] показано, что основной вклад в дозу внешнего облучения вносят природные радионуклиды (87 %) и предприятия энергетики, работающие на органическом топливе (12,5 %), а уровни облучения населения ниже предельно допустимых, согласно НРБ-99 (таблица 10).

Таблица 10

Дозовые нагрузки для населения Томского района

Радионуклиды		Эффективная эквивалентная доза, мкЗв/год*	Вклад в суммарную дозу, %			
Техно- генные	Глобальный	^{137}Cs	$0,8 \pm 0,2$	0,3		13
	Локальные	^{137}Cs	$0,5 \pm 0,2$	0,2	12,7	
		^{40}K	13 ± 4	4		
		^{232}Th	21 ± 6	6,5		
		^{238}U	$6,0 \pm 0,5$	1,9		
		^{235}U	$0,28 \pm 0,09$	0,09		
Природ- ные	Естественные (фоновые)	^{40}K	102 ± 5	31	76,6	87
		^{232}Th	100 ± 15	30,8		
		^{238}U	43 ± 12	14		
		$^{235}\text{U}_n^{**}$	$2,2 \pm 0,4$	0,67		
		$^{235}\text{U}_n^{\#}$	$2,0 \pm 0,4$	0,61		
	Геологических аномалий ^{###}	^{235}U	$0,6 \pm 0,15$	0,185		
		^{238}U	12 ± 4	3,7		
		^{232}Th	21 ± 6	6,5		

* – средневзвешенное по всей территории Томского района; ** – естественный равновесный изотоп; # – естественный неравновесный изотоп; ### – обусловлено мо-
нацитовыми песками.

Таблица 11

Уровни облучения, обусловленные источниками радиоактивности
природного и техногенного происхождения

Источники радиоактивности	Годовая эффективная эквивалентная доза облучения, мкЗв/год	Вклад в суммарную дозу внешнего облучения, %
Глобальные выпадения*	0,8	0,3
Предприятия ЯТЦ (СХК)	0,4	0,2
ТЭЦ, ГРЭС, Аграрно-промышленный комплекс	40,3	12,5
Природа[#]	283	87

* – за счет испытаний ядерного оружия; [#] – с учетом геологических аномалий (месторождения монацитных песков с выходом на поверхность).

Вот уже много лет «зеленые» исследователи пугают население Томской области ростом онкологических заболеваний, увеличением детской смертности, генетическими изменениями и т.д., объясняя все деятельностью СХК. Иногда «зеленые» в виде хобби «консультируют» население по вопросу обращения с радиоактивными отходами. Но они совершенно не принимают во внимание и не хотят понять того, что, во-первых, такая обстановка наблюдается по всей России, что обусловлено социальными факторами, и во-вторых, Северный промузел включает в себя не только СХК, но и Нефтехим, ТЭЦ–3, агрокомплексы и т.д., которые образуют широкий спектр выбросов, формируя качественно новые факторы воздействия на человека. Поэтому можно только говорить о влиянии на здоровье населения Северного промузла в целом, но отнюдь не только одного СХК.

Самый опасный техногенный фактор который влияет на окружающую среду – обычное загрязнение воздуха, которое обеспечивают нам транспорт, энергетические и химические предприятия. Для здоровья конкретного человека фактор загрязнения воздуха в 12–13 раз опаснее, чем проживание в Чернобольской зоне. Примером могут служить следующие данные. Заболеваемость злокачественными новообразованиями в подвергнутом воздействию радиации Красноармейском районе Челябинской области (ПО «Маяк») по многолетним исследованиям Института Биофизики составило 319,4 на 100 тыс. человек, в то время как онкозаболеваемость людей, живущих вблизи Челябинского электрометаллургического комбината, не попавшего в зону влияния «Маяка», – 1114 случаев.

Здоровье призывников в последние годы резко падает: 30 % призывников не попадают в строй по психическим заболеваниям, число увлекающихся наркотическими препаратами возросло в 14 раз, 18 % то-

мичей не смогут надеть форму из-за сколиоза или плоскостопия. По словам начальника военно-врачебной комиссии Томской области В.Перминова, недавно проведенная диспансеризация детей выявила у 72 % хронические патологии.

Разве можно объяснить такую ситуацию деятельностью СХК?

Специалисты областного государственного учреждения «Облком-природа» определили, что за 2002 год объем выбросов вредных веществ вырос на 33 тысячи тонн. Наибольшее загрязнение воздуха отмечается в местах размещения предприятий добывающих отраслей, топливно-энергетического комплекса химических и нефтеперерабатывающих предприятий.

Если в 1994 году Томск по сравнению с другими городами Сибири по загрязнению атмосферы все-таки выглядел лучше (индекс загрязнения Томска – 9.55, Искитима – 73, Прокопьевска – 62, Кемерово – 32, Новосибирск – 24), то в 2001 году г. Томск попал в число 30 самых грязных городов России.

По словам начальника лаборатории гидрометеоцентра Н. Черных («Вечерний Томск» № 202, 2003 г.), наш индекс загрязненности атмосферы уже стал 16.82. С этим показателем мы немного уступаем Бийску (17.6), но опережаем кажущиеся загрязненными донельзя Новосибирск (13.03), Новокузнецк (12.22) и Кемерово (14.1).

Однако этот индекс не учитывает так называемых специфических примесей. В каждом городе они – «свои» и зависят от особенности основных производств. Наши «родные» – формальдегид и хлористый водород. (Анализ биологического воздействия плутония показывает, что формальдегиды, нитраты, пестициды и др. гораздо более опасны). Высокие концентрации формальдегида вызывают головную боль, повреждение дыхательных путей и легких, слизистых тканей желудочно-кишечного тракта. Затрагивается и генетический аппарат.

По результатам проверки в 2001 году из 13 городов Западной Сибири зафиксирован самый большой уровень формальдегидов в атмосфере города Томска. Он превысил санитарную норму в несколько раз и имеет тенденцию к повышению. Средняя за 2002 год концентрация формальдегида составила 6 ПДК. За девять месяцев этого года превышения предельно допустимой концентрации по диоксиду азота наблюдались 214 дней и держались на уровне 2 ПДК. И как результат такого загрязнения атмосферы показатели общей заболеваемости у взрослых и детей, а также младенческая смертность продолжают расти, и уже превысили среднероссийские.

Среди жителей Чаинского района Томской области была поднята тревога: в результате исследований «зеленых» в 1994–1995 гг. в почве и

воде обнаружены явные радиоактивные аномалии: радионуклиды урана, цезия, стронция. Итог тщательной, почти годовой проверки действительных специалистов Госсанэпиднадзора показал: «Результаты радиологических исследований проб объектов внешней среды Чаинского района ничем не выделяется среди других районов области и значительно ниже допустимых». Существующие законы логики должны быть задействованы в обязательном порядке. Можно привести пример, когда заключение, которое было воспринято обывателем как истинное, получено, как минимум, при одной ложной посылке. Согласно этому заключению, в результате технологической аварии на Сибирском химическом комбинате в г. Северске Томской области 6 апреля 1993 года пострадало население деревни Наумовка. Для того, чтобы прийти к данному заключению, был использован действительный факт появления повышенной частоты клеток с хромосомными нарушениями в человеческом организме. При этом факте, что частота появления клеток с хромосомными абберациями зависит от общего состояния организма, его иммунного статуса, а не только от токсичности среды обитания, не было отдано должного внимания. Кроме того, деревня Наумовка находится за пределами следа выброса. Об этом свидетельствуют результаты работы межведомственной комиссии Правительства РФ по факту аварии и модельные расчеты параметров формирования поля загрязнения на поверхности прилегающих территорий.

В России есть лишь два научных центра, занимающихся генетическими исследованиями, – в Москве и в Томске. Исследования, проведенные специалистами Томского института медицинской генетики (ТИМГ) свидетельствуют, что «вывод о том, что генофонд томичей в опасности, – неправда...». Обвинять СХК в том, что он «гробит» томичей, можно с той же уверенностью, как и в том, что по его вине голодают дети в африканском племени мумба-юмба.

Клиническая часть исследований показала, что наша область вполне благополучна в плане генетических мутаций.

Не так давно Томский институт медицинской генетики изучал в течение двух лет генетическое здоровье жителей Томска и Северска. Ученые института генетики сравнивали количество легко диагностируемых врожденных пороков, однозначно интерпретируемых врачами любой специальности (таких пороков по международной шкале 19: «заячья» губа, врожденный порок сердца, патология почек, синдром Дауна и т.д.), с российскими и зарубежными данными. Частота врожденных пороков в Томске составила 12,4 на 1000 новорожденных, в Северске – 12,5. Сравните с данными российскими: г. Люберцы – 17,2; г. Новомосковск – 14,6; Курская область – 14,19; и европейскими – от 8,7 до 21,2

на 1000 новорожденных. То есть частота врожденных пороков у томи- чей не превышает средних значений статистических данных европей- ских государств. Так что генофонд у нас не хуже, чем у европейцев.

Заместитель директора Института биофизики (г. Москва) профес- сор А.Иванов так объясняет тот факт, что проблема онкологических за- болеваний в г. Северске стоит несколько острее, чем даже в Томске.

«Я проиллюстрирую свой ответ картой онкологических заболева- ний по Российской Федерации. Ни за что не угадаете, где эта заболе- ваемость наиболее высока. В Москве и Московской области! А дело в том, что если нет онколога и генетика, то как можно диагностировать соответствующее заболевание? Когда появляется врач, то появляется и статистика. В г. Северске к здоровью людей по понятным причинам по- вышенное внимание, поэтому проводятся исследования НИИ генетики. Вот откуда высокий уровень генетических нарушений у тамошнего на- селения. В Томске эта работа проводится очень пассивно, а в других бо- гом забытых местах даже слова «генетика» не слышали. В Москве же, где уровень медицины высок, где в каждой поликлинике целое подраз- деление генетиков, картина совершенно иная».

Кроме того, среди жителей ЗАТО продолжительность жизни с 1959 по 1989 гг. на 4–5 лет выше, чем среди населения России. Именно большая, чем в среднем по России, продолжительность жизни в ЗАТО и служит причиной увеличения заболеваемости некоторыми видами па- тологии, включая и частоту злокачественных новообразований.

Уместно напомнить, что так называемое «самое благополучное» положение с онкологической заболеваемостью в мире обнаружено в России. У нас всеми видами рака успевает заболеть не более 10–12 % населения. А самое «катастрофическое» положение сложилось в Шве- ции, Канаде, США, где онкологическая заболеваемость и смертность от нее составляют 20–22 % населения. Нам никогда не догнать по этому показателю социально благополучные страны из-за короткой средней продолжительности жизни россиян. У нас более 60 % людей умирают от заболеваний сердечно-сосудистой системы. В этом отношении жите- ли ЗАТО только приближаются к уровню заболеваемости в передовых странах мира.

Уместно также напомнить, что состояние здоровья достоверно лучше у лиц, проживающих в регионах с повышенным радиационным фоном. У этих людей большая продолжительность жизни, меньше час- тот злокачественных новообразований и врожденной аномалии разви- тия, более устойчива иммунная система, значительно выше репараци- онная способность повреждений на молекулярном и клеточном уровне. На эту тему опубликовано более 1200 специальных исследований.

– Так что страхи заболеть раком, находясь под боком СХК, сильно преувеличены.

– Поэтому запугивание опасностью малых доз ионизирующего излучения проф. Гуннар Уалиндер назвал «величайшим научным скандалом XX века».

У многих томичей возникают опасения, что со строительством атомных комплексов закаченные под землю жидкие РАО попадут в питьевую воду, увеличится число онкологических заболеваний и т.д.

У кого лучше узнать, как обстоят в Томской области дела с захоронением радиоактивных отходов (РАО)? Разумеется у тех, кто компетентен в этой сфере и независим от ядерного предприятия.

Вот что говорит по этому вопросу первый заместитель директора государственного унитарного предприятия «Томскгеомониторинг», к.г. - м. н., Ю.В. Макушин: «Со всей ответственностью могу заявить, что на нашу питьевую воду закаченные под землю жидкие РАО не влияют. Более того, мы проводили моделирование ситуации на будущее. Так вот, в обозримом будущем жидкие РАО ни в Томском, ни Северском водозаборах не могут появиться.

Исследования, проводимые московскими и томскими специалистами (Комитет природных ресурсов, Томскгеомониторинг, ТПУ, ТГУ и т.д.), а также специалистами по нетрадиционным методам биолокационной индикации, показали, что эксплуатация этих полигонов безопасна в экологическом отношении и сейчас, и в будущем. Те люди, что утверждают обратное, просто не знают или не хотят знать, как реально обстоят дела, или преследуют какие-то политические цели, нагнетая обстановку вокруг этого вопроса».

А вот мнение известного гидрогеолога, профессора Г. Шварцева. «Ближайшую тысячу лет подземным путем никакие РАО в Томский водозабор не попадут. Это я могу строго доказать. Но это касается подземного пути, через поры горных пород. Артезианские воды могут «загрязниться» лишь через поверхность, через осаждение радиоактивных веществ в атмосферных осадках. Но глубина артезианских скважин 80–100 метров, и от поверхности земли водозабор отделен слабопроницаемыми отложениями. Этот путь тоже практически перекрыт».

Следует обратить внимание, что психологическая мотивация в формировании социальной приемлемости АЭС у населения России и населения западных ядерно-энергетических стран разная. При значительно более низком жизненном уровне россиян определяющим может стать заинтересованность в получении выгод и дополнительных экономических льгот в обмен на согласие терпеть присутствие АЭС.

Таким образом, аргументы атомной энергии в Томском регионе:

- демонополизация и диверсификация энергетического производства;
- увеличение энергетического потенциала;
- наличие крупного налогоплательщика;
- снижение экологического и экономического прессинга на регион;
- снижение социальной напряженности населения (новые рабочие места для энергетиков и работников смежных областей, получение льгот на оплату тепла и электроэнергии, отчисления в процессе строительства на нужды социальной сферы, после введения АЭС в эксплуатацию отчисляется 2 % от себестоимости в специальный инвестиционный фонд на развитие социальной сферы региона (40–50 млн р. ежегодно));
- экономия углеводородного топлива, резкое уменьшение транспортных проблем области (независимость от угольщиков и газовиков, выделяемые лимиты газа не сжигать, а направить на ТНХК, а собственный газ продавать за пределы области);
- стабильность в поставке ядерного топлива, т.к. СХК охватывает практически всю цепочку ядерно-топливного цикла;
- возможность продавать вырабатываемую электроэнергию на прямую, минуя распределительные системы РАО ЕЭС России и посредников;
- возможность привлечения инвестиций на строительство из соседних энергодефицитных областей (Новосибирская, Омская, Барнаульская и т.д.) и решение энергетической проблемы в рамках территориального объединения «Сибирского соглашения»;
- если газовый вариант ориентирован на «штопанье дыр» в условиях постоянного недостатка собственного топлива, то атомный, конечно же, является проектом на перспективу и в рамках долгосрочной энергетической политики призван обеспечить регион дешевой и чистой электроэнергией.

Во всей Сибири только Томская область обладает возможностью улучшить свое энергетическое и экономическое положение, так как имеет уникальный ядерный комплекс, в который входят: наука, подготовка кадров, производственная и строительная база. Такой комплекс мог быть усилен соответствующими экологическими проработками томских ученых-экологов.

Практически нет ни одного предприятия или научной организации России и стран СНГ, работающих в атомной энергопромышленности, где бы не трудились высококвалифицированные кадры инженеров-физиков, подготовленных в Томске.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мир в цифрах. – М., 1998, 2002.
2. Россия в цифрах. – М., 1996, 2000.
3. Энергетика: цифры и факты. – М.: ЦНИИАтоминформ, 1993–1998.
4. Бюллетень Центра общественной информации по атомной энергии. 1991. № 2; 1992. № 4; 1993. № 3; 1996 № 1.
5. Атомная энергия. 1989. Т. 67, вып. 1; 1996. Т.81, вып.2.
6. NuCLEnergy. 1996. V.5, №3.
7. Справочные данные МАГАТЭ. 2000, вып. 1.
8. Справочник по ядерной энерготехнологии, – М.: Энергоатомиздат, 1989.
9. Бюллетень Центра общественной информации по атомной энергии, – ЦНИИАтоминформ, 1991. № 4; 1992. № 2; 1997. № 7 – 8, 11.
10. Там же. – ЦНИИАтоминформ, 1998. № 3 – 4.
11. Бюллетень Центра общественной информации по атомной энергии. – ЦНИИАтоминформ, 1998. № 7 – 8, № 12.
12. Энергия. 1999. № 1; 1996. № 1, 2, 5, 9; 1998. № 2; 1999. № 4.
13. Атомная техника за рубежом. 1998. № 5.
14. Экологическое состояние, использование природных ресурсов, охрана окружающей среды Томской области в 1994 году. Государственный комитет экологии и природных ресурсов Томской области. – Томск, 1995.
15. Бойко В.И., Кошелев Ф.П., Колчин А.Е. Нужна ли АЭС Томскому региону? (Экология, экономика, безопасность). – Томск, 1995.
16. Концепция теплоснабжения Томска и Томска–7. Т. 1 . Томсктеплоэлектропроект, 1991.
17. Э. Дж. Холл. Радиация и жизнь. Пер.с англ. – М.: Медицина, 1989.
18. У. Маршалл. Мой радиоактивный сад. – Москва. Энергоатомиздат, 1991.
19. С.Н. Бабаев и др. Ядерная энергетика, человек и окружающая среда. – М.: Энергоатомиздат, 1984.
20. О.Б. Самойлов и др. Что такое АСТ. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
21. Радиация. Дозы, эффекты, риск. Пер. с англ. – М.: Мир, 1973.

22. Мещеряков В.Н., Бойко В.И., Кошелев Ф.П. Ядерная энергетика в системе энергообеспечения города Томска / Ядерная энергетика. 2000. № 1.
23. Nucl.Net: News, – 1994. № 418.
24. Левченко Н. Есть ли будущее у ядерной энергетики? // Бюллетень ЦОИ по АЭ, 1996. № 10–11 .
25. Бюллетень МАГАТЭ. 1997. Т. 39 № 1–2; 1999. Т 41, № 2.
26. Постановление Правительства Российской Федерации № 815 от 20 июня 1998 г.
27. Материалы научно–практической конференции: Перспективы и проблемы развития атомной энергетики России и ряда государств бывшего СССР на пороге XXI века. – Санкт-Петербург.: Изд-во СПбГТУ, 1999.
28. Реакторная установка АСТ–500. Безопасность и экологичность ОКБМ. – Нижний Новгород, 1991.
29. Е.О. Адамов. Белая книга ядерной энергетики. – М.: Изд-во ГУП НИКИ–ЭТ, 1998.
30. Г. Сиборг. Человек и атом. – М.: Мир. 1973
31. Л. Феокистов. Оружие, которое себя исчерпало. – Москва, 1999.
32. Бюллетень Центра общественной информации по атомной энергии. 2000. № 2.
33. АНРИ 2000. № 1.
34. Состояние окружающей среды Томской области. Экологический мониторинг. – Томск, 2003.
35. Бюллетень по атомной энергии. 2004. № 3, 4.
36. Бойко В.И., Кошелев Ф.П. Аргументы и проблемы атомной энергетики. Безопасность, экономика и экология ядерных технологий. Учебное пособие. – Томск.: Изд-во ООО «Компания Янсон», 2001. – 80 с.
37. Колдобский А.Б., Насонов В.Н. Вокруг атомной энергии: правда и вымыслы. – Москва, 2002.
38. Радиация. Дозы, эффекты, риск. – М.: Мир, 1988.
39. Медицинские последствия аварии на ЧАЭС: прогноз и фактические данные национального регистра. Медицинский радиологический научный центр РАМН. – Обнинск: ООО Комтехпринт, 2001.
40. Д.Э. Эргашев. Метод определения естественного и техногенного урана в объектах окружающей среды. Автореф. – Томск, 2004.

41. Бойко В.И., Кошелев Ф.П. Что необходимо знать каждому человеку о радиации. – Томск: Изд-во «Красное знамя», 1993.
42. Бойко В.И., Евстигнеев В.В., Кошелев Ф.П. Жителям Алтайского края о ядерных взрывах и радиации. Кн. 1. – Барнаул: Изд-во АГПУ, 1994.
43. Бойко В.И., Кошелев Ф.П. Нужна ли АЭС Томскому региону. Экология, экономика, безопасность. – Томск: Изд-во «Орбита», 1995.
44. Бойко В.И., Кошелев Ф.П. Роль ядерной энергетики в экономике России. – Томск: Изд-во «Орбита», 1999.
45. Бойко В.И., Кошелев Ф.П. Аргументы и проблемы атомной энергетики. Безопасность, экономика и экология ядерных технологий. – Томск: Изд-во ООО «Компания Янсон», 2001.
46. Мещеряков В.Н., Кошелев Ф.П., Демянюк Д.Г. Перспективные ядерные топливные циклы и реакторы нового поколения. Часть 1. – Томск: Изд-во ТПУ, 2003.
47. Шидловский В.В., Мещеряков В.Н., Кошелев Ф.П., Шаманин И.В., Демянюк Д.Г. Перспективные ядерные топливные циклы и реакторы нового поколения. Часть II. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004.
48. Бойко В.И., Кошелев Ф.П. Топливный цикл. Проблемы решения. Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004.
49. Сибирский химический комбинат. Центр информации СХК, 2005.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Хронология основных событий в атомной отрасли СССР и России

1937 год

Начало активных экспериментальных исследований по изучению структуры атомного ядра в Советском Союзе. Получение первого пучка протонов и «импульсных» количеств нептуния и плутония в ленинградском Радиевом институте на первом в Европе циклотроне.

1938 год

Пуск большого электростатического генератора в Харьковском физико-техническом институте.

1939 год

Начало исследований по осуществлению цепной ядерной реакции. Закладка самого мощного в Европе циклотрона в Ленинградском физико-техническом институте.

1940 год

Открытие явления самопроизвольного деления ядра урана. Расчетно-теоретическое обоснование советскими учеными принципиальной возможности осуществления цепной реакции деления ядер урана с высвобождением ядерной энергии. Создание Специального комитета по урановой проблеме. Разработка плана работ по осуществлению цепной реакции деления.

1942 год

Открытие Московского механического института (ныне Московский инженерно-физический институт).

28 сентября. Подписано распоряжение Государственного комитета обороны СССР № 2352сс «Об организации работ по урану», положившее начало работам по атомной энергии в СССР. Распоряжение предписывало создать при АН СССР Специальную лабораторию атомного ядра (Лаборатория № 2) для координации работ по Атомному проекту.

27 ноября. Государственный комитет обороны СССР принял Постановление «О добыче урана».

27 ноября. И. В. Курчатов направил докладную записку В.М. Молотову, содержащую анализ разведывательных материалов о развитии атомного проекта в Великобритании и предложения о создании атомного оружия в СССР.

1943 год

11 февраля. Распоряжение ГКО об организации работ по урану определило руководителями работ по урановой проблеме

М.Г. Первухина и С.В. Кафтanova. Научное руководство проблемы было возложено на И.В. Курчатова.

10 марта. И.В. Курчатov назначен начальником Лаборатории № 2 АН СССР (ныне РНЦ «Курчатовский институт»), научного центра Атомного проекта.

30 июля. Государственный комитет обороны СССР принял распоряжение об организации геолого-разведочных работ и добыче урана.

1944 год

15 мая. Начато промышленное производство графитовых деталей высокой чистоты.

25 июня. В Лаборатории № 2 пущен циклотрон.

Ноябрь. Начало разработки технологии получения металлического урана.

Декабрь. В системе НКВД создан НИИ-9 (ныне ВНИИ неорганических материалов им. А.А. Бочвара, г. Москва) для разработки технологий получения металлического урана, его специальных соединений и металлического плутония.

1945 год

15 мая. ГКО принял Постановление о создании Горнохимического комбината № 6 (Ленинабадский горно металлургический комбинат) по добыче и переработке урановых руд Средней Азии.

20 августа. Госкомитет обороны СССР принял Постановление № 9887сс/оп о создании Специального комитета при ГКО для руководства всеми работами по использованию атомной энергии. Председателем комитета назначен Л. П. Берия. При Спецкомитете был создан Технический совет во главе с Б. Л. Ванниковым. При Техсовете были созданы комиссии по электромагнитному разделению урана (руководитель – А.Ф. Иоффе), по получению тяжелой воды (руководитель – П. Л. Капица), по изучению плутония (руководитель – В.Г. Хлопин), по химико-аналитическим исследованиям (руководитель – А.П. Виноградов) и секция по охране труда (руководитель – В. В. Ларин).

30 августа. Решением СНК СССР было образовано Первое главное управление при СНК СССР. Начальником назначен Б.Л. Ванников, его заместителями – А.П. Завенягин, П.Я. Антропов, Н.А. Борисов, А.Г. Касаткин и П.Я. Мешик, членами коллегии – А.Н. Кемеровский, Г.П. Корсаков и С.Е. Егоров.

8 октября. Технический совет Спецкомитета принял решение о создании Лаборатории № 3 (ныне Институт теоретической и экс-

периментальной физики, г. Москва) по разработке реакторов на тяжелой воде.

1 декабря. Решением СНК СССР создан комбинат № 817 (ныне ПО «Маяк», г. Озерск). В его состав вошли объект «А» – промышленный реактор, завод «Б» – радиохимический завод, завод «В» – металлургический завод по производству плутония (первые директора – П.Т. Быстров, Е.П. Славский и Б.Г. Музруков; научный руководитель – И.В. Курчатов; главный конструктор – Н.А. Доллежал).

1 декабря. Решением СНК СССР создан комбинат № 813 (ныне Уральский электромеханический завод, г. Новоуральск) для разделения изотопов урана газодиффузионным методом (директор – А.И. Чурин, научный руководитель – И.К. Кикоин, главный конструктор – И.Н. Вознесенский).

17 декабря. СНК СССР принял Постановление о создании Лаборатории № 4 ПГУ по разработке технологии разделения изотопов урана центрифужным методом.

19 декабря. Принято постановление СНК СССР об организации в составе НКВД Лаборатории «В» (ныне РНЦ «Физико-энергетический институт», г. Обнинск) для разработки новых типов реакторов.

1946 год

Март. Начало разработки двух вариантов промышленных реакторов (главный конструктор вертикальной схемы реактора – Н.А. Доллежал, главный конструктор горизонтальной схемы реактора – Б.М. Шолкович).

9 апреля. Правительство СССР приняло Постановление о создании КБ-11 (г. Арзамас-16, ныне Российский федеральный ядерный центр «ВНИИ экспериментальной физики», г. Саров), центра по разработке ядерного оружия (директор – П.М. Зернов, главный конструктор и научный руководитель – Ю.Б. Харитон).

Апрель. Правительство СССР приняло Постановление о создании в Институте химической физики средств диагностики ядерного взрыва (научный руководитель работ – М.А. Садовский).

1 июля. Ю. Б. Харитон подготовил тактико-техническое задание на атомную бомбу.

9 декабря. В состав Первого главного управления передан завод № 544 (ныне Челябинский механический завод, г. Глазов), переоборудованный для производства металлического урана.

16 декабря. Создана Радиационная лаборатория (ныне Институт биофизики, г. Пущино) для изучения воздействия радиации на человека.

25 декабря. Запущен первый ядерный реактор Ф-1 в Лаборатории № 2.

В Радиевом институте создана технология по переработке облученного реакторного топлива и выделению из него плутония (научный руководитель – В.Г. Хлопин).

1947 год

21 апреля. Правительство СССР приняло Постановление о создании полигона (Семипалатинский испытательный полигон) для испытания атомной бомбы (начальник полигона – П. М. Рожанович, научный руководитель – М.А. Садовский).

6 июня. Правительство СССР приняло Постановление о создании завода № 418 (г. Свердловск-45, ныне завод «Электрохимприбор», г. Лесной) по электромагнитному разделению изотопов (директор завода – Д.Е. Васильев, научный руководитель – Л.А. Арцимович).

19 июня. Совет Министров СССР принял Постановление о развертывании в КБ-11 работ по разработке атомной бомбы и создании при Лаборатории № 2 Научно-технического совета для обсуждения связанных с этим вопросов. Совет возглавил И.В. Курчатов, его заместителем назначен Ю.Б. Харитон, членами совета – Н.Н. Семенов, К.И. Щелкин, А.С.Александров и П.М. Зернов, экспертами – А.П.Александров, И.К. Кикоин, Я.Б. Зельдович, А.А. Бочвар, А.С. Займовский, Б.А. Никитин и К.В. Селихов.

Август. Правительство СССР приняло решение о создании специального управления Министерства здравоохранения СССР для организации медицинского обслуживания работников атомной промышленности, которое возглавил А.И. Бурназян.

1948 год

15 июня. Промышленный реактор (объект «А» комбината № 817) выведен на проектную мощность.

22 декабря. На комбинате № 817 состоялся пуск радиохимического завода «Б».

Декабрь. На комбинате № 813 получена пробная партия высокообогащенного урана (75 % изотопа уран-235).

Конец года. Введен в эксплуатацию завод № 418 по электромагнитному разделению изотопов.

1949 год

Июнь. На комбинате № 813 получена промышленная партия высокообогащенного урана (75 % изотопа уран-235).

26 июля. Завершена подготовка Семипалатинского полигона к испытанию атомной бомбы РДС-1.

29 августа. В 7 часов утра по местному времени состоялось успешное испытание первой атомной бомбы РДС-1.

Осень. Начато строительство комбината № 816 для производства оружейного плутония и высокообогащенного урана в г. Томске-7 (ныне Сибирский химический комбинат, г. Северск).

1950 год

14 февраля. Правительство СССР приняло Постановление о выделении в КБ-11 завода № 551 по серийному производству атомных бомб.

26 февраля. Правительство СССР приняло Постановление о создании комбината № 815 для производства оружейного плутония в г. Красноярске-26 (ныне Горно-химический комбинат, г. Железногорск).

1951 год

На комбинате № 817 состоялся пуск первого промышленного тяжеловодного реактора (научный руководитель – А.И. Алиханов).

1952 год

24 января. Правительство СССР приняло Постановление о создании завода № 933 (г. Златоуст-36, ныне ПО «Приборостроительный завод», г. Трехгорный) для производства ядерного оружия (директор – К.А. Володин).

1953 год

26 июня. Президиум ЦК КПСС принял решение о ликвидации Специального комитета при Совете Министров СССР. Вместо него создано Министерство среднего машиностроения СССР во главе с В. А. Малышевым.

12 августа. Успешно испытана первая советская одностадийная термоядерная бомба РДС-6с.

1954 год

27 июня. В г. Обнинске Калужской области состоялся пуск первой в мире атомной электростанции.

31 июля. Правительство СССР приняло Постановление о создании НИИ-1011 – второго ядерного центра СССР (г. Челябинск-70, ныне Российский федеральный ядерный центр «ВНИИ технической физики», г. Снежинск). Директором назначен Д.Е. Васильев, научным руководителем – К.И. Щёлкин.

31 июля. Правительство СССР приняло решение о создании на Новой Земле испытательного полигона (руководитель работ – Е.Н. Борковский).

1955 год

25 февраля. Министром среднего машиностроения назначен А.П. Завенягин.

14 ноября. Правительство СССР приняло Постановление о строительстве завода № 825 по разделению изотопов урана (Красноярск-45, ныне г. Зеленогорск).

22 ноября. Состоялось первое испытание мощного двухстадийного термоядерного заряда РДС-37 в СССР.

Декабрь. Пуск в Лаборатории «В» первого экспериментального реактора на быстрых нейтронах (научный руководитель – А.И. Лейпунский).

1957 год

30 апреля. Министром среднего машиностроения СССР назначен М. Г. Первухин.

24 июля. Министром среднего машиностроения СССР назначен Е. П. Славский.

9 августа. Спущена на воду первая атомная подводная лодка Проекта-627.

10 октября. Проведено ядерное испытание боевой торпеды Т-5, запущенной с подводной лодки на Новой Земле.

5 декабря. Спущен на воду первый атомный ледокол «Ленин».

1958 год

17 декабря. Принята в опытную эксплуатацию первая советская атомная подводная лодка.

1959 год

31 декабря. Правительство СССР приняло Постановление о принятии атомного ледокола «Ленин» в опытную эксплуатацию.

1961 год

11 октября. На Семипалатинском полигоне осуществлен первый в СССР подземный ядерный взрыв.

1962 год

24 декабря. На Семипалатинском полигоне осуществлен последний наземный ядерный взрыв.

25 декабря. На Новоземельском испытательном полигоне осуществлен последний воздушный ядерный взрыв.

1963 год

5 августа. В Москве подписан Договор о запрещении испытаний ядерного оружия в атмосфере, в космическом пространстве и

под водой, вступивший в силу 10 октября после его ратификации парламентами депозитариев – СССР, США и Великобритании.

1964 год

26 апреля. Дал промышленный ток первый реактор Белоярской АЭС. Мощность первого энергоблока АМБ-100 с реактором на тепловых нейтронах канального типа составила 100 МВт.

30 сентября. Пущен первый энергоблок Нововоронежской АЭС ВВЭР-210. На станции использовался реактор корпусного типа, топливом служил слабообогащенный уран, теплоносителем – вода под давлением.

1965 год

15 января. Проведен первый в СССР мирный ядерный взрыв на выброс на территории Семипалатинского полигона. С помощью подземного ядерного взрыва создано искусственное озеро Чаган. Общая емкость водохранилища составила 20 млн кубометров.

1967 год

Пуск в г. Серпухове протонного синхротрона на энергию 76 ГэВ – крупнейшего в мире для своего времени ускорителя.

25 апреля. Распоряжением Правительства СССР на базе Центрального бюро научно-технической информации в Москве образован Центральный научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по атомной науке и технике (ЦНИИАтоминформ).

1968 год

Осуществление нагрева водородной плазмы до 10 млн градусов на установке с магнитным удержанием плазмы «ТОКАМАК-3».

1 июля. В Вашингтоне, Лондоне и Москве страны-депозитарии подписали Договор о нераспространении ядерного оружия.

Начато строительство нового реактора на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем БН-600 на Белоярской АЭС электрической мощностью 600 МВт.

1970 год

5 марта. Вступил в силу Договор о нераспространении ядерного оружия.

1972 год

18 мая. Вступил в силу Договор о запрещении размещения на дне морей и океанов и в его недрах ядерного оружия и других видов оружия массового уничтожения.

1973 год

Пуск первой в мире опреснительной установки с реактором на быстрых нейтронах БН-350 в г. Актау.

Сдача в эксплуатацию источника дальнего теплоснабжения на базе АЭС-2 г. Северск.

29 июня. Вступил в строй первый энергоблок Кольской АЭС с реактором ВВЭР-440.

12 сентября. Осуществлен физический пуск реактора первого энергоблока Ленинградской АЭС РБМК-1000. 23 декабря этот блок был принят в эксплуатацию.

1974 год

11 января. На самой северной в мире Билибинской ТЭЦ на Чукотке пущен первый энергоблок ЭГП-6. В 1976 г. Билибинская ТЭЦ стала первой в стране атомной теплоэлектроцентралью, построенной в зоне вечной мерзлоты. Энергетическая мощность энергоблока – 12 МВт.

1976 год

19 декабря. Введен в эксплуатацию первый энергоблок РБМК-1000 Курской АЭС.

Декабрь. Введен в эксплуатацию первый энергоблок ВВЭР-440 Армянской АЭС.

1977 год

На ПО «Маяк» пущен первый отечественный завод по переработке ОЯТ энергетических и силовых реакторных установок. Технология позволила выделять «энергетический» плутоний.

17 августа. Впервые в истории мореплавания атомный ледокол «Арктика», преодолев мощный ледовый покров Северного Ледовитого океана, достиг Северного полюса.

Сентябрь. Введен в эксплуатацию первый энергоблок РБМК-1000 Чернобыльской АЭС.

1978 год

Начало по инициативе Советского Союза под эгидой МАГАТЭ международной программы ИНТОР по разработке демонстрационного термоядерного реактора типа ТОКАМАК.

1980 год

Апрель. Введен в эксплуатацию третий энергоблок БН-600 Белоярской АЭС.

Декабрь. Введен в эксплуатацию первый энергоблок ВВЭР-440 Ровенской АЭС.

1982 год

Включение в состав Краснознаменного Северного Флота атомного ракетного крейсера «Киров».

9 декабря. Введен в эксплуатацию первый энергоблок РБМК-1000 Смоленской АЭС.

Декабрь. Введен в эксплуатацию первый энергоблок ВВЭР-1000 Южно-Украинской АЭС.

1983 год

31 декабря. Пущен первый энергоблок Игналинской АЭС (Литва) с реактором РБМК-1500 с усовершенствованным уран-графитовым реактором канального типа электрической мощностью 1500 МВт.

1984 год

9 мая. Введен в эксплуатацию первый энергоблок ВВЭР-1000 Калининской АЭС.

Декабрь. Введен в эксплуатацию первый энергоблок ВВЭР-1000 Запорожской АЭС.

1985 год

28 декабря. Введен в эксплуатацию первый энергоблок ВВЭР-1000 Балаковской АЭС.

1986 год

26 апреля. В 1 ч 23 мин 49 с на четвертом энергоблоке Чернобыльской АЭС при работе реактора РБМК-1000 на мощности 200 МВт (6 % от номинальной) произошла крупнейшая в истории техногенная катастрофа с полным разрушением реакторной установки.

21 июля. Образовано Министерство атомной энергетики СССР. Министром назначен Н.Ф. Луконин.

29 ноября. Министром среднего машиностроения назначен Л.Д. Рябев.

1987 год

31 декабря. Введен в эксплуатацию первый энергоблок ВВЭР-1000 Хмельницкой АЭС.

1988 год

СССР принял решение о полном прекращении производства высокообогащенного урана для военных целей.

Сдача в эксплуатацию атомного лихтеровоза-контейнеровоза «Севморпуть» – крупнейшего в мире судна с ядерной энергоустановкой. Начало программы по разработке Международного термоядерного экспериментального реактора (ИТЭР). Начало работ по конверсии военного производства отрасли в рамках экономической реформы.

1989 год

Создание независимой общественной организации – Ядерного общества СССР, объединившей специалистов и предприятия, работающие в области атомной науки и техники в России и в странах СНГ. Ядерное общество всеми доступными средствами способствует мирному и безопасному использованию ядерной энергии на благо народов Содружества.

27 июня. Образовано Министерство атомной энергетики и промышленности СССР. Министром назначен В. Ф. Коновалов.

19 сентября. СССР провел последнее ядерное испытание на Семипалатинском испытательном полигоне.

1990 год

Пуск установки «Токамак-15» – прототипа промышленного термоядерного реактора. Первую навигацию открыл атомный ледокол нового поколения «Советский Союз». Он сменил ледокол «Ленин».

1991 год

Подписание в Москве соглашения о техническом проектировании ИТЭР мощностью около 1000 МВт – прообраза будущего реактора термоядерной электростанции. В проекте принимают участие Россия, США, Япония и Евратом – организация Европейского сообщества.

24 октября. На испытательном полигоне на Новой Земле проведено последнее ядерное испытание Советского Союза.

1992 год

29 января. Образовано Министерство Российской Федерации по атомной энергии.

2 марта. Министром Российской Федерации по атомной энергии назначен В.Н. Михайлов.

1993 год

Подписание президентами России Б.Н. Ельциным и США Дж. Бушем договора СНВ-2, по которому сокращаются и ограничиваются в течение 7 лет стратегические наступательные вооружения. Начало переработки высокообогащенного российского оружейного урана (ВОУ) в соответствии с российско-американским Соглашением о ядерном разоружении.

22 января. Введен в эксплуатацию первый после распада СССР четвертый энергоблок ВВЭР-1000 на Балаковской АЭС.

1994 год

23 июня. Россия и США подписали соглашение о прекращении производства плутония.

1995 год

21 ноября. Принят Федеральный закон Российской Федерации «Об использовании атомной энергии».

1996 год

Утверждение программы поддержки основных научных школ отрасли. Окончание ходовых испытаний атомного крейсера «Петр Великий». Завершение вывоза советского ядерного оружия из стран СНГ на территорию России.

24 сентября. Открыт к подписанию Договор о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний.

1998 год

4 марта. Министром Российской Федерации по атомной энергии назначен Е. О. Адамов.

Принятие решения об изготовлении первой партии экспериментальных тепловыделяющих сборок (ТВС) с уран-плутониевым топливом. Создание опытной партии конверсионных твэлов реакторов АДЭ-2, -4, -5. Утверждение программы развития атомной энергетики Российской Федерации на 1998–2005 гг. и на период до 2010 г. Начало разработки проекта «Стратегия развития атомной энергетики» (прогноз на 50 лет).

Разработка и реализация в ГНЦ РФ «НИИ атомных реакторов» технологии получения смешанного топлива на основе высвобождающегося оружейного плутония. Нарботка опытной партии такого топлива для реакторов БОР-60 и БН-600.

Создание Ситуационно-кризисного центра Минатома России для информационно-аналитической поддержки руководства Министерства и Отраслевой Комиссии по чрезвычайным ситуациям как в условиях нормальной эксплуатации, так и при возникновении нештатных (аварийных) ситуаций на объектах отрасли.

1999 год

Введение в работу энергоблока 2 Курской АЭС после капитального ремонта с контролем состояния всех технологических каналов и с частичной их заменой по результатам проверки. Такая работа выполнена впервые в отрасли.

Начало выполнения широкомасштабных мероприятий по ускорению утилизации атомных подводных лодок, выведенных из боевого состава ВМФ, и экологической реабилитации опасных объектов Минобороны, переданных Минатому России по постановлению Правительства Российской Федерации.

50 лет ядерному оружию России. В настоящее время ядерно-оружейный комплекс является образцом научно-конструкторских объединений с мощными опытными производствами мирового

значения, способными осуществлять крупные наукоемкие разработки.

2000 год

31 мая. Россия ратифицировала Договор о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний.

23 августа. Президент России В. В. Путин подписал Указ № 1563 «О неотложных мерах социальной поддержки специалистов ядерного оружейного комплекса Российской Федерации».

6 сентября. Президент В. В. Путин выступил на Саммите тысячелетия в ООН с инициативой решения проблемы энергообеспечения, экологии и нераспространения.

2001 год

23 февраля. Состоялся вывод реактора первого энергоблока Волгодонской АЭС на минимально контролируемый уровень мощности.

28 марта. Министром Российской Федерации по атомной энергии назначен А. Ю. Румянцев.

30 марта. Осуществлен энергетический пуск первого энергоблока Волгодонской АЭС.

11 июля. Президент Российской Федерации В. В. Путин подписал закон, разрешающий ввоз в Россию для хранения и переработки отработавшего ядерного топлива других государств.

Ноябрь. Впервые в истории ядерной энергетики России продлен срок эксплуатации третьего энергоблока Нововоронежской АЭС на 5 лет. Проведенные на блоке работы позволят продлить его эксплуатацию на 15 лет.

2002 год

24 мая. В Москве президенты Российской Федерации и Соединенных Штатов Америки подписали Договор о сокращении стратегических наступательных потенциалов.

13 июня. Соединенные Штаты Америки вышли из Договора по противоракетной обороне.

14 июня. В ответ на выход США из Договора по ПРО Российская Федерация заявила, что больше не считает себя связанной обязательствами Договора СНВ-2.

Июнь. Лидеры восьми наиболее развитых стран мира на встрече в Кананаскисе (Канада) заключили соглашение о Глобальном партнерстве против распространения оружия и материалов массового уничтожения.

2003 год

Июнь. На встрече в Эвиане (Франция) лидеры «восьмерки» подтвердили свою приверженность идеям Глобального партнерства против распространения оружия и материалов массового уничтожения и приняли план действий «Группы восьми» по его реализации.

2004 год

9 марта. Президент России подписал Указ «О системе и структуре федеральных органов исполнительной власти», в соответствии с которым было упразднено Министерство Российской Федерации по атомной энергии. Согласно новой структуре федеральных органов исполнительной власти было образовано Министерство промышленности и энергетики Российской Федерации, в состав которого вошло Федеральное агентство по атомной энергии, по вопросам ядерного оборонного комплекса, подведомственное Министерству обороны.

12 марта. Распоряжением Правительства Российской Федерации руководителем Федерального агентства по атомной энергии назначен А. Ю. Румянцев.

28 июня. Указом Президента Российской Федерации от 20 мая 2004 г. «Вопросы структуры федеральных органов исполнительной власти» руководство Федеральным агентством по атомной энергии передано Правительству Российской Федерации.

16 декабря. На Калининской АЭС состоялся энергетический пуск третьего энергоблока. На церемонии пуска нового блока присутствовал президент В. В. Путин.

Относительная опасность ядерного и угольного топливных циклов

Перспективы роста современного энергопроизводства, истощение традиционных технически и экономически доступных энергоресурсов и загрязнение окружающей среды порождают проблему выбора оптимальной структуры энергетики. Причем возникает необходимость в оценке не только экономической стоимости и конкурентоспособности различных способов производства энергии, но и их относительной опасности для окружающей среды и здоровья человека.

Выбор для сравнения циклов двух типов энергетики – ЯТЦ и УТЦ – обусловлен тем, что в ближайшие десятилетия они будут преобладающими способами производства энергии.

Как правило, ядерный топливный цикл (ЯТЦ) и угольный топливный цикл (УТЦ) включают в себя такие стадии, как начальная (добыча, переработка и транспортирование топлива), основная (производство энергии АЭС или ТЭС), заключительная (транспортирование и переработка топлива и отходов, удаление отходов). ЯТЦ может включать возврат (рецикл) невыгоревшего топлива на повторное использование.

При сравнении ядерного и угольного топливных циклов обобщена имеющаяся отечественная и зарубежная информация [1–17].

В этом сравнении учитываются все стадии цикла (не только работа АЭС и ТЭС) и все возможные факторы воздействия как радиационного, так и нерадиационного воздействия.

Ядерный топливный цикл (ЯТЦ)

При рассмотрении нерадиационных факторов воздействия ЯТЦ в качестве исходных выбраны данные, отвечающие современному уровню технологии.

Удельная потребность ЯТЦ в природном уране 200–240 т на 1 ГВт·год. Содержание урана в руде 0,2 %, степень извлечения урана из руды и при ее переработке – 95 %. 50 % руды добывают закрытым (в рудниках) способом, 50% – открытым (в карьерах). 80 % обогащенного урана получают газодиффузионным методом, 20 % – газовыми центрифугами.

Ущерб для здоровья человека оценен по трем показателям.

1. Число случаев преждевременной смерти (от рака, в результате облучения; от профессиональных заболеваний, не связанных с облучением; от несчастных случаев; от рака, вызванного у населения химическими канцерогенами).

2. Потеря трудоспособности, чел·лет.

3. Потеря продолжительности жизни, чел·лет.

Рассмотрим ЯТЦ для АЭС с легководным реактором на тепловых нейтронах электрической мощностью 1000 МВт.

Начальная стадия **Добыча и переработка урановой руды**

При добыче топлива из земли извлекается $1,2 \cdot 10^5$ т урановой руды и несколько миллионов тонн пустой породы на 1 ГВт·год.

В результате переработки руды количество шлама равно примерно $1,3 \cdot 10^5$ т.

Стоимость природного урана 40–90 долл. за 1 кг. Расход земли: временно отчуждаемая – 20÷60 га, постоянно отчуждаемая – 2 га.

Общая эффективная эквивалентная доза за счет добычи урановой руды составляет 1,7 чел·Зв/ГВт·год.

В настоящее время разработана технология получения урана без предварительной добычи руды, путем его подземного выщелачивания из рудного тела. При такой технологии на поверхность земли извлекается гораздо меньше руды и отчуждается во много раз меньше земли.

Число случаев преждевременной смерти – 0,13.

Потери трудоспособности – 2,6 чел·лет.

Потери продолжительности жизни – 3,9 чел·лет.

Раковые заболевания с летальным исходом $1,4 \cdot 10^{-2}$ /ГВт·ч, без летального исхода – $3,4 \cdot 10^{-2}$ /ГВт·ч, генетические повреждения – $2,8 \cdot 10^{-2}$ /ГВт·ч.

Конверсия оксида в гексафторид – 6–11 долл. на 1 кг урана.

Тепловая мощность источника энергии, необходимая для данной стадии, – 15 МВт.

Разделение, обогащение

Стоимость работы разделения 80–130 долл./кг ЕРР (единица работы разделения).

Нерadioактивные отходы – до 400 т/год.

Выход радиоактивных отходов при конверсии уранового концентрата в UF_6 : ^{235}U – 4 кг/ГВт·год, ^{238}U – 595 кг, при обогащении: ^{235}U – 0,1 кг; ^{238}U – 297 кг.

Эффективная эквивалентная доза – 1,1 чел·Зв/ГВт·год.

Временное отчуждение земли – 0,15 га.

Число случаев преждевременной смерти – 0,001.

Потери трудоспособности – 0,2 чел·лет.

Потери продолжительности жизни – 0,3 чел·лет.

Раковые заболевания с летальным исходом – $1,2 \cdot 10^{-6}$, без летального исхода – $2,9 \cdot 10^{-6}$, генетические повреждения – $5,7 \cdot 10^{-8}$.

Тепловая мощность источника энергии – 97 МВт.

Изготовление топлива

Потребность 30–50 тонн UO_2 (3%).

Стоимость изготовления топлива 200–350 долл./кг U.

Временное отчуждение земли – 0,02 га.

Выбросы ^{235}U – 4,2 кг, ^{238}U – 59 кг.

Ущерб для здоровья такой же, как и на этапах разделения и обогащения.

Тепловая мощность источника энергии – 0,5 МВт.

Основная стадия

Производство энергии

АЭС ($N_{эл.}=1000$ МВт) потребляет за кампанию (3 года) $50 \div 80$ т UO_2 (3 %).

Потребление в год ~ 25 т UO_2 (~ 200 т природного урана).

Накапливает в год среднеактивных и низкоактивных отходов – 800 т (160 м^3), высокоактивное облученное ядерное топливо – $25 \div 30$ т ($2,5 \text{ м}^3$).

Радиоактивные отходы (РАО) составляют не более 3 %.

Себестоимость электроэнергии $2 \div 4$ цент/кВт·ч.

Временное отчуждение земли составляет $30 \div 60$ га при охлаждении градирнями, постоянно отчуждаемая земля – 0,02 га.

Коллективная эквивалентная доза для персонала составляет 4 чел·Зв/ГВт·год, для населения $0,4 \div 1,8$ чел·Зв/ГВт·год. Раковые заболевания с летальным исходом – $3,2 \cdot 10^{-2}$, без летального исхода – $7,6 \cdot 10^{-2}$, генетические повреждения – $6,4 \cdot 10^{-3}$.

Число случаев преждевременной смерти – 0,11.

Потери трудоспособности – 2,2 чел·лет.

Потери продолжительности жизни – 3,3 чел·лет.

В 2000 г. себестоимость электроэнергии АЭС США – 1,83 цент/кВт.

В облученном топливе с выгоранием 36 МВт·сутки/кг содержится 204 кг урана-235; 28,3 т урана-238; 280 кг нуклидов плутония; 1,1 т продуктов деления; 15 кг нептуния-237 и 6 кг трансплутониевых элементов.

Мощность тепловых сбросов в конденсатор составляет 67 % от общей тепловой мощности.

Мощность тепловых сбросов через трубу в атмосферу – 0.

Стоимость сооружения 0,8÷0,9 млрд долл.

Затраты на топливообеспечение – 12 млн долл.

Заключительная стадия **Транспортировка и хранение ОЯТ**

В ЯТЦ не приходится иметь дела с перевозкой значительных грузов на большие расстояния. Транспортировка ОЯТ обходится в 20–80 долл./кг. Хранение ОЯТ – 40–200 долл./кг.

Коллективная доза и ущерб для здоровья персоналу и населению очень незначительны и могут не приниматься во внимание.

Переработка ОЯТ обходится в 720 долл./кг.

Захоронение остеклованных ВАО – 100–580 долл./кг.

Количество РАО на 1 ГВт·год:

Хвосты от переработки руд – $(3÷6) \cdot 10^4 \text{ м}^3$.

Отходы с низкой и средней удельной активностью – 600 м^3 , высокой – 4 м^3 .

Коллективная эквивалентная доза 2–10 чел.Зв/ГВт·год.

Число случаев преждевременной смерти – 0,1.

Сокращение продолжительности жизни 2,5 чел·лет.

Потери трудоспособности – 1,5 чел·лет.

Раковые заболевания с летальным исходом – $1,6 \cdot 10^{-1}$, без летального исхода – $4 \cdot 10^{-1}$, генетические повреждения – $3,3 \cdot 10^{-2}$.

Демонтаж реакторов

Доля затрат на снятие с эксплуатации АЭС 7÷15% от капитальных вложений.

Доза облучения не более 0,4 чел.Зв/ГВт·год.

Число случаев преждевременной смерти – 0,003.

Потеря продолжительности жизни 0,03 чел·лет.

Потери трудоспособности – 0,015 чел·лет.

Общая стоимость АЭС – 1–2 млрд долл.

Угольный топливный цикл (УТЦ)

В УТЦ основное воздействие на население обусловлено выбросами в атмосферу на этапе производства электроэнергии. Остальные этапы цикла обуславливают воздействие главным образом на персонал, занятый добычей, переработкой и транспортировкой топлива.

Добыча, транспортировка, углеобогащение

Для получения 1000 МВт·год электроэнергии необходимо 4 млн т угля (стоимость 600 руб./т, США – 15–30 долл./т).

Сбросы в открытые водоемы – 850 т взвешенных веществ, минеральных солей – 16 тыс. т.

Нарушение земельных угодий – 40 га.

Выдача на поверхность 8 млн м³ вскрышных и вмещающих пород.

Выброс в атмосферу 7 тыс. т твердых веществ.

Использование воды в качестве технологической и транспортирующей среды – 1,71 млн м³.

Выбросы угольной пыли – 60 тыс. т.

Выбросы метана 10÷40 тыс. т.

Суммарная коллективная доза облучения шахтеров – 7 чел·Зв (в 4 раза больше, чем ЯТЦ).

Унос пыли при транспортировке составляет 12–24 тыс. т. Около 40 % всех перевозок железнодорожного транспорта приходится на перевозки угля.

Требуется более 144 тыс. вагонов (60 т) в год.

Выход отходов обогащения от 0,15–0,35 т на 1 т обогащенного.

Общий ущерб на этих трех этапах:

Преждевременная смерть – 12.

Потеря трудоспособности – 200 чел·лет.

Сокращение продолжительности жизни – 180 чел·лет.

Производство энергии

Требуется более 4 млн т угля в год. 300 и более вагонов в сутки. Потребляется кислорода – $5,5 \cdot 10^9$ м³/год.

Выбросы в атмосферу, т/год:

CO₂ – 10 000 000;

SO_x – 124 400;

NO_x – 34 000;

Зола – 7 300.

Твердые отходы – 830 000 т/год.

Себестоимость электроэнергии 2,5÷4 цент/кВт·ч.

Эффективная коллективная доза облучения для населения 4 чел·Зв/год, что существенно превышает дозу за счет выбросов АЭС аналогичной мощности.

Число случаев преждевременной смерти за счет облучения населения (выбросы ТЭС) – 0,055 и за счет заболевания нерадиационной этиологии – 360.

Сокращение продолжительности жизни 2,2 и 10^4 чел·лет соответственно.

Потеря трудоспособности 1,4 и 7200 чел·лет.

Мощность тепловых сбросов через трубу в атмосферу составляет 15 % от тепловой мощности и сбросов в конденсатор – 52 %.

Стоимость сооружения – 0,7 млрд долл.

Затраты на топливообеспечение – 0,3 млрд долл.

Итоговые удельные затраты – 1 млрд долл.

Отвалы

Золошлаковые отвалы, образующиеся в результате работы ТЭС мощностью 1000 МВт за год, занимают площадь 120–160 га и содержат более 830 тыс. т твердых отходов (зола – 650 тыс. т, шлак – 180 тыс. т).

Степень загрязнения окружающей среды золоотвалами зависит от состава золы, способа ее консервации, физико-географических и климатических условий места расположения.

Отвал содержит токсические элементы (мышьяк – 90 т, барий – 300 т, ртуть – 20 т, ванадий – 70 т), а также естественные радионуклиды (калий-40 до 650 кг, уран-238 до 10000 кг, радий-226 до $4 \cdot 10^{-2}$ г, свинец-210 до 0,2 г).

Содержание естественных радиоактивных нуклидов в золе от 500–9000 Бк/кг.

Если удельная активность золы более 7000 Бк/кг, то она считается радиоактивными отходами.

Следует отметить, что, как в ЯТЦ, так и УТЦ, риск, обусловленный радиоактивными факторами, на фоне спонтанной смертности от рака, составляющей в большинстве стран около 1500 случаев в год на 1 млн населения представляется крайне незначительным (0,17 случая в год).

Под внешней стоимостью топливного цикла (ВСТЦ) понимают затраты, наложенные на общество и окружающую среду, которые не учитывают производители и потребители энергии, т.е. затраты в настоящее время, не включенные в рыночную стоимость.

ВСТЦ включает ущерб (полная экономическая стоимость вреда, связанная с физическим воздействием), наносимый естественной и техногенной окружающей среде: глобальное потепление, профессиональные заболевания, аварии, влияние газоаэрозольных и радиоактивных выбросов на здоровье населения, с/х культуры, леса, радиационные и нерадиационные воздействия на здоровье персонала.

В противоположность циклам УТЦ стадия производства энергии в ЯТЦ не является доминирующим источником вредных выбросов в окружающую среду.

При определении экономической оценки воздействий использовались общие оценки стоимости среднестатистической жизни.

Анализ отечественных и зарубежных работ по экономическому анализу риска позволяет в настоящее время сделать вывод о том, что для обоснования и принятия нормативных значений параметров экономического анализа риска нет острой необходимости в дополнительных научных исследованиях. Эта задача может быть решена специалистами на основе уже имеющихся материалов.

В ряде зарубежных исследований разработаны экономические эквиваленты удельным экологическим ущербам от различных загрязнителей атмосферы. Например, стандартные экологические эквиваленты выбросам в атмосферу, разработанные в рамках программы TEMIS (Total Emission Model for Integrated System, Институт прикладной экологии, Германия, 1993), составляют: за одну тонну выбросов оксидов серы – 500 нем. марок, оксидов азота – 4000 нем. марок, углекислого газа – 100 нем. марок, частицы – 1000 нем. марок.

Европейская Комиссия (ЕК) официально опубликовала результаты крупного исследования, которые подтверждают, что внешние затраты ЯТЦ гораздо ниже аналогичных затрат в случае УТЦ.

Окончательные результаты исследования ExternE доказывают, что стоимость производства электроэнергии с использованием угля удвоилась бы при учете внешних затрат, таких как нанесение вреда окружающей среде и здоровью населения.

Средняя величина внешних затрат для УТЦ в пятнадцати рассматриваемых европейских странах составляет 4,1–7,3 цента/кВт·ч, для ЯТЦ – 0,4.

Оценка экономического ущерба с учетом парникового эффекта и без аварий (отн. ед.) для УТЦ составляет 60÷100, для ЯТЦ – 1.

В случае ЯТЦ методология, применяющаяся для расчета внешних затрат, рассматривает полный топливный цикл, включая радиоактивные эмиссии и общее загрязнение окружающей среды, радиологическое воздействие на население, а также вероятность опасности.

Некоторые факторы, которые здесь количественно не оцениваются, должны значительно увеличить эколого-экономический эффект от развития атомной энергетики: потребление ТЭЦ кислорода и природоохранные мероприятия для его восстановления, выбросы тяжелых элементов и нарастание парникового эффекта, последствия которого в настоящее время широко обсуждаются и ощущаются, временное или постоянное отчуждение земельных ресурсов.

Таблица 1

Различные виды энергии в сравнительной статистике

Показатель	Различные виды энергии в сравнительной статистике						
	Уголь	Нефть	Природный газ	Ядерная энергия	Гидро-энергия	Ветровая энергия	Солнечная энергия
Вклад различных видов энергоносителей в производство электроэнергии, %:							
Мир	40	10	14	~17	~17	~1	~1
Страны, богатые гидроресурсами, %							
Канада	15	3	5,1	12,9	61	~3	~3
Швеция	1,1	2	-	43,9	51	<1	<1
Швейцария	-	5	-	36,0	59	-	-
Страны, богатые углём, %							
США	49,6	3	13	20,4	8	~3	~3
Германия	54,5	2	7	30,5	4	<1	<1
Великобритания	52	6,6	11	24,4	2	2	2
Китай	74	6,9	-	1,1	18	-	-
Россия	16	8	43	16	17	<0,03	<0,001
Страны, бедные природными энергоресурсами, %:							
Франция	6	2	2	77,1	14	-	-
Республика Корея	18	28,7	10	39,3	4	-	-
Тайвань	34	30,4	5	21,6	9	-	-
Япония	9,7	21	22	34,3	9	~2	~2
Западно-Сибирский регион	46	5	48	-	-	-	-
Общие подсчитанные резервы + потенциальные ресурсы, $\text{Э}_{\text{Дж}}(1 \text{ Э}_{\text{Дж}} = 10^{18} \text{ Дж})$	18000 (11000)	3500 (1400)	2300 (11000)		126 в год	84 в год	75 в год
При открытом ядерном топливном цикле (ОЯТЦ)				2000 (8000)			
При замкнутом ЯТЦ (ЗЯТЦ)				300000 (600000)			
Продолжительность надёжного энергоснабжения, лет	250	45	60	55 (ОЯТЦ) 3300 (ЗЯТЦ)	-	-	-
Занимаемая площадь, необходимая для производства энергии. Отчуждение земли, м2/МВт	2400	870	1500	630	265000	170000	100000

Продолжение таб.1

Показатель	Уголь	Нефть	Природный газ	Ядерная энергия	Гидро энергия	Энергия ветра	Солнечная энергия
Выделение CO2 (парниковый эффект), г/кВт·ч	251/10	192/6	180/33	0/7	0/6	0/20	0/52
Выделение SOx, мг/(кВт·ч)	288/38	26/3,5	0/7	0/32	-	0/15	0/104
Выбросы NOx, мг/(кВт·ч)	516/44	242/21	208/69	0/70	-	0/19	0/99
Удельные капитальные вложения, долл./кВт	1200-1400	1000-1300	1200-1500	1300-2000	2000	1800	2500
Себестоимость электроэнергии, цент/(кВт·ч)	2,5-4,0	~2,6-3,0	~2,6-3,0	~2,2-3,0	1,2	4,8-7,0	12,0
Средняя величина внешних затрат, цент/кВт·ч	4,7-7,3	4,4-7,0	1,3-2,3	0,4	0,4-0,5	0,1-0,2	0,6
Трудоёмкость энергопроизводства, чел./(ТВт·ч)	116	~120	~130	100	-	542	248
Общее сокращение средней вероятностной продолжительности жизни лет/ТВт·ч	141	359	46	2-10			
Показатели ущерба от тяжелых аварий на ГВт/год*				ВВЭР/РБМК			
Число непосредственных летальных исходов	0,13	0,39	0,066	0,0/0,16			
Денежный ущерб (млн дол США, 1996)	0,035	0,94	0,11	1,3/1760			
Энерговложения в электростанции и сроки возврата ими электроэнергии (затраченной на строительство и топливообеспечение) при нормативном сроке службы 30 лет.							
Электровложения :							
В электростанцию, %	1,5	-	-	2	8	10	-
В топливообеспечение, %	5	-	-	5	-	-	-
Доля от энерговыработки, %	6,5	-	-	7	30	40	-
Срок возврата энерговложений, лет	~2	-	-	~2	~9	~12	-

* Сравнение аварийных рисков от разных энергоисточников были предприняты институтом Пауля Шерра (ИПШ) в Швейцарии. Эти исследования продолжались свыше 5 лет. Риск для общества считается приемлемым, если частота аварий влекущих 10, 100 и 1000 летальных исходов, не превышает 10^{-5} , 10^{-7} , 10^{-9} в год соответственно.

Данные по ядерным энергетическим системам в европейских странах 1009-1996 гг от ИПШ. Данные по ядерной энергии 1960-1998гг от МАГАТЭ.

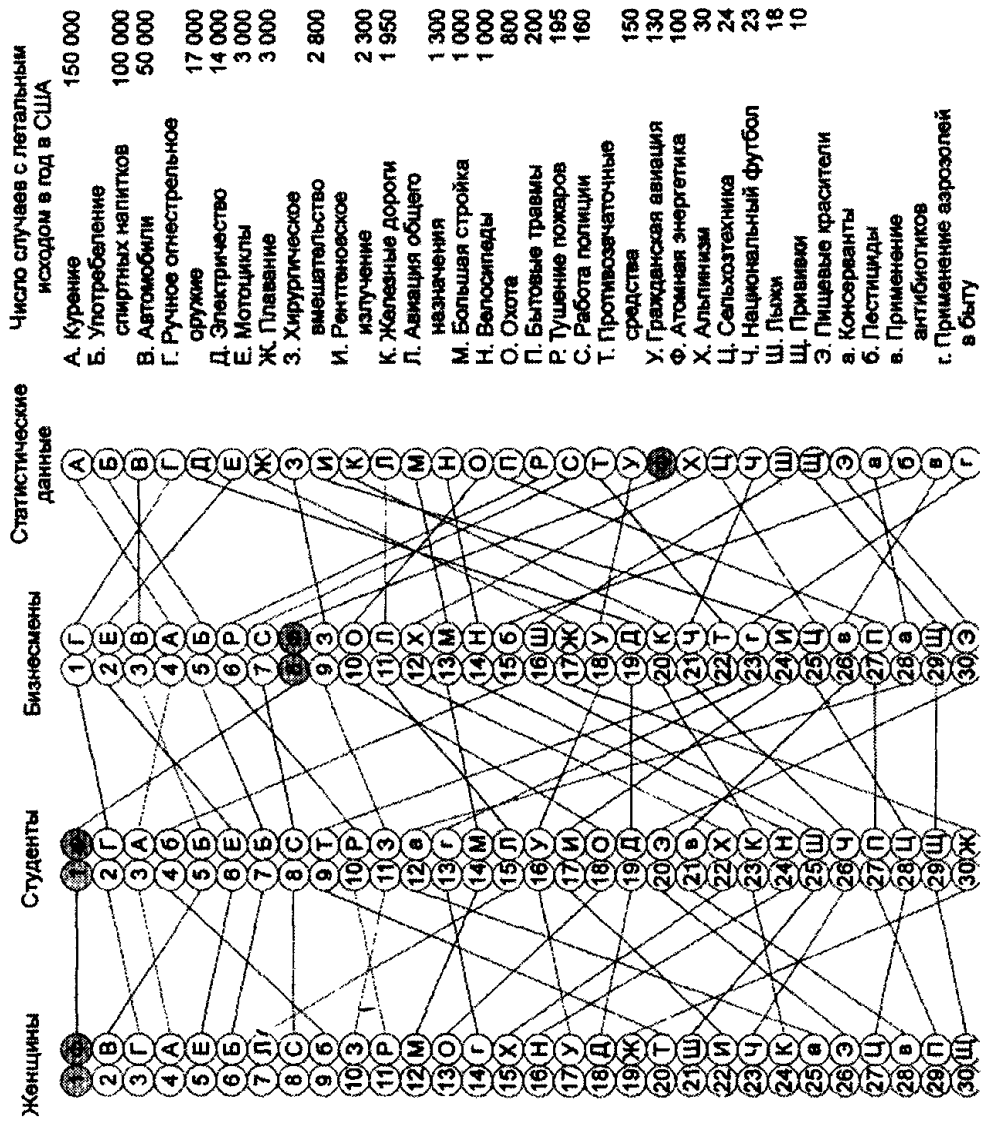
Таблица 2

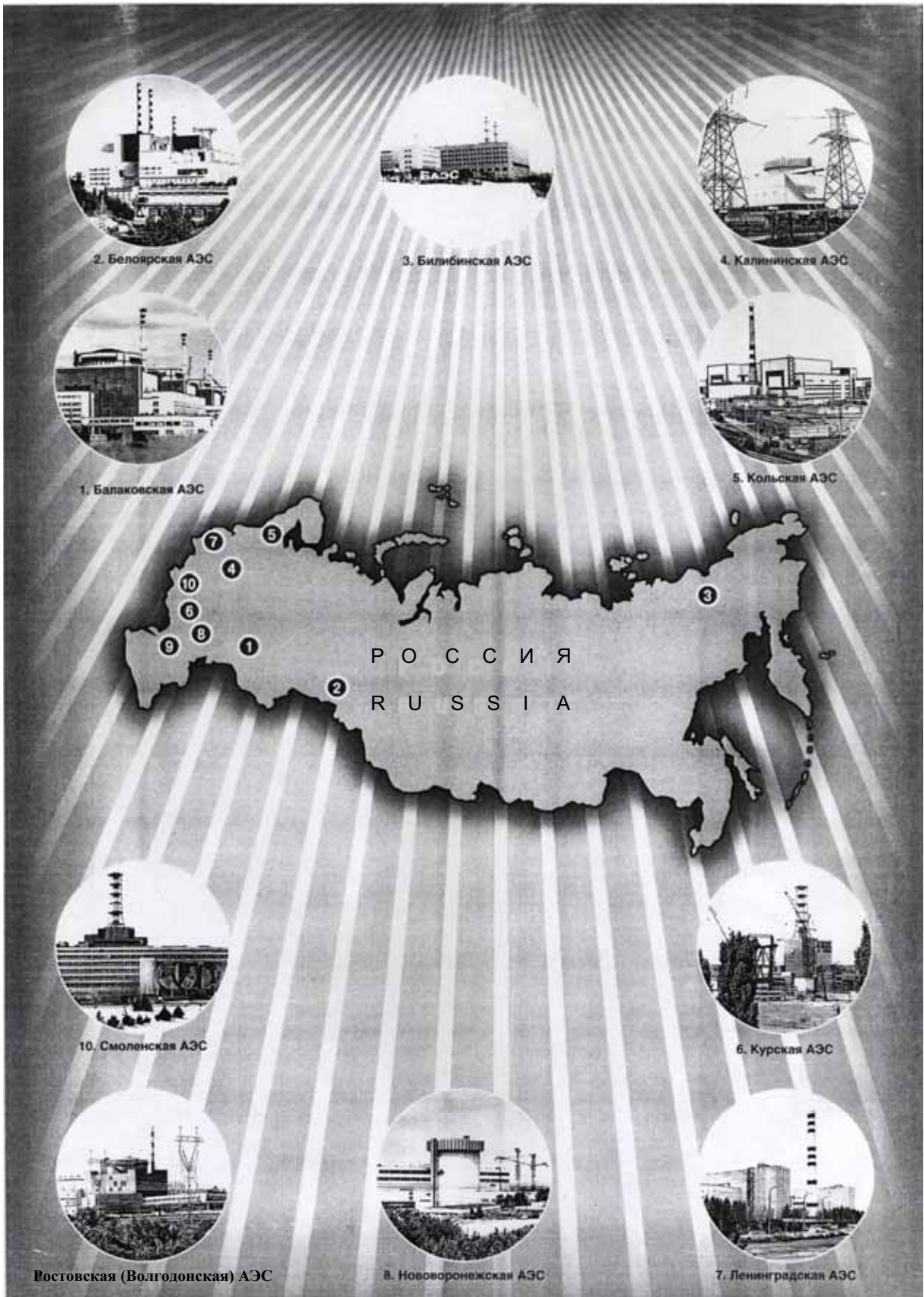
Некоторые показатели в странах, развивающих ядерную энергетику

Показатель	Франция	Швеция	Япония	Германия	Великобритания	США	Россия
Доля ядерной энергетики в производстве электроэнергии, %	77,1	43,9	34,3	30,5	24,4	24,4	16
Электрическая мощность АЭС, МВт,	59033	10062	38029	22637	11909	98784	23200
Продолжительность жизни муж/жен	73/81	75/80	76/82	72/79	72/78	72/79	59/71
Детская смертность на 1000 родившихся	7,2	3,8	4,5	7,1	7,4	8,9	18,0
Естественный прирост населения на 1000 чел.	4,1	3,3	3,2	-1,0	2,5	7,7	-1,5
Производство электроэнергии на душу населения, кВт·ч	8062	17009	7167	6630	5560	12800	7268
Мощность, кВт на 1 км ²	107,1	22,2	100,7	63,5	48,8	10,5	1,2
Человек/1 км ²	100	19	327	224	224	27	9

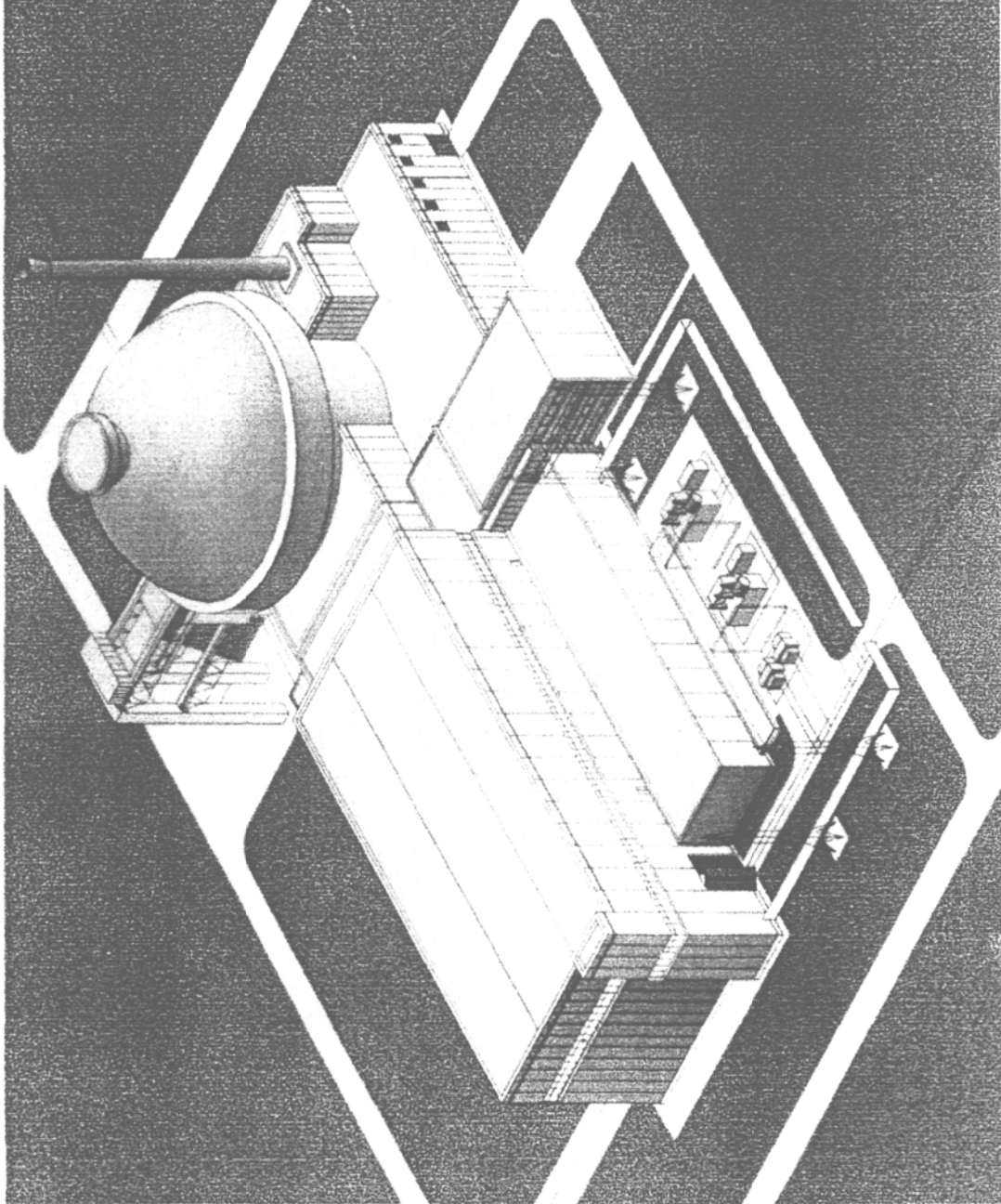
Таблица 3

Опасность предполагаемая и реальная





ВВЭР-1000 (главный корпус)

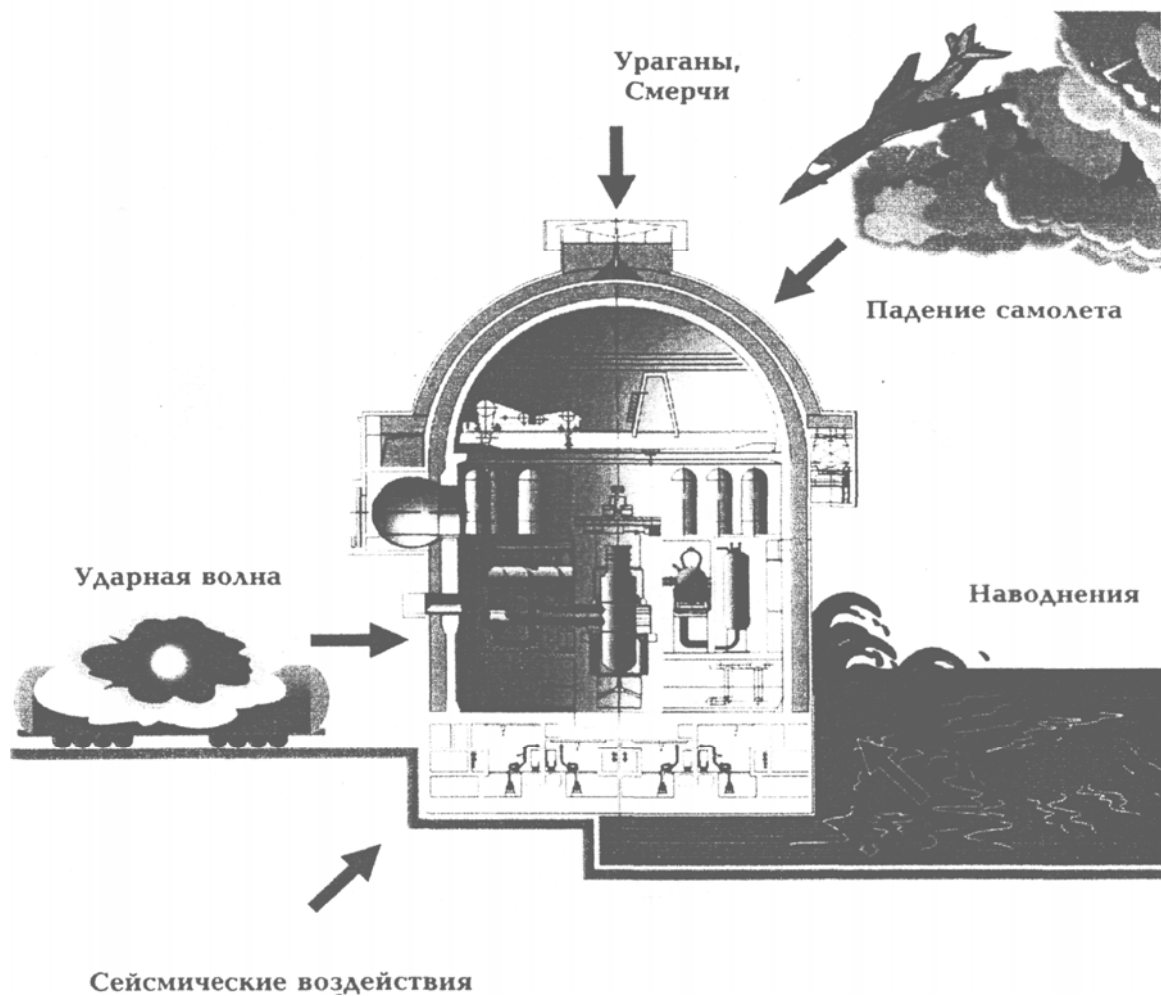


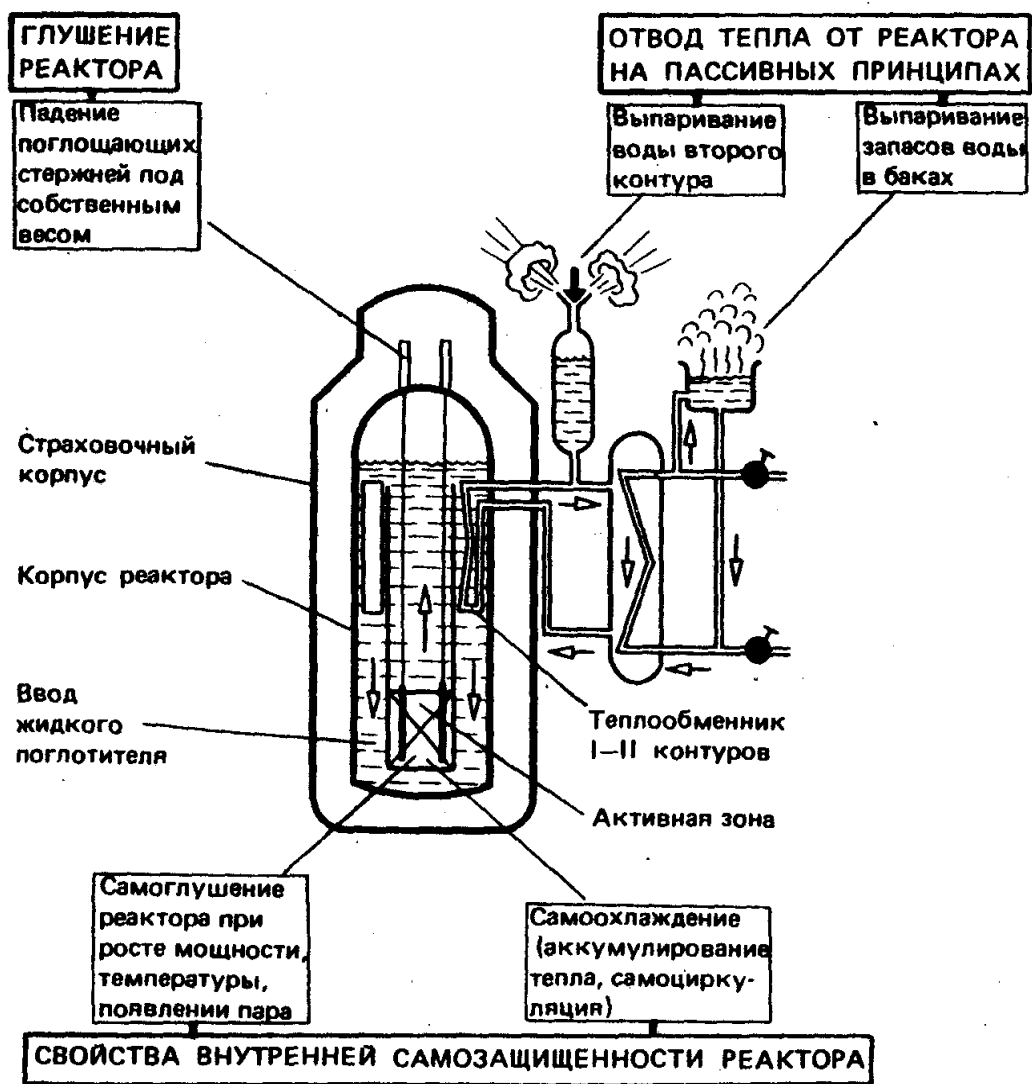


ВВЭР-1000

Внешняя защитная оболочка - средство защиты от внешних и техногенных воздействий

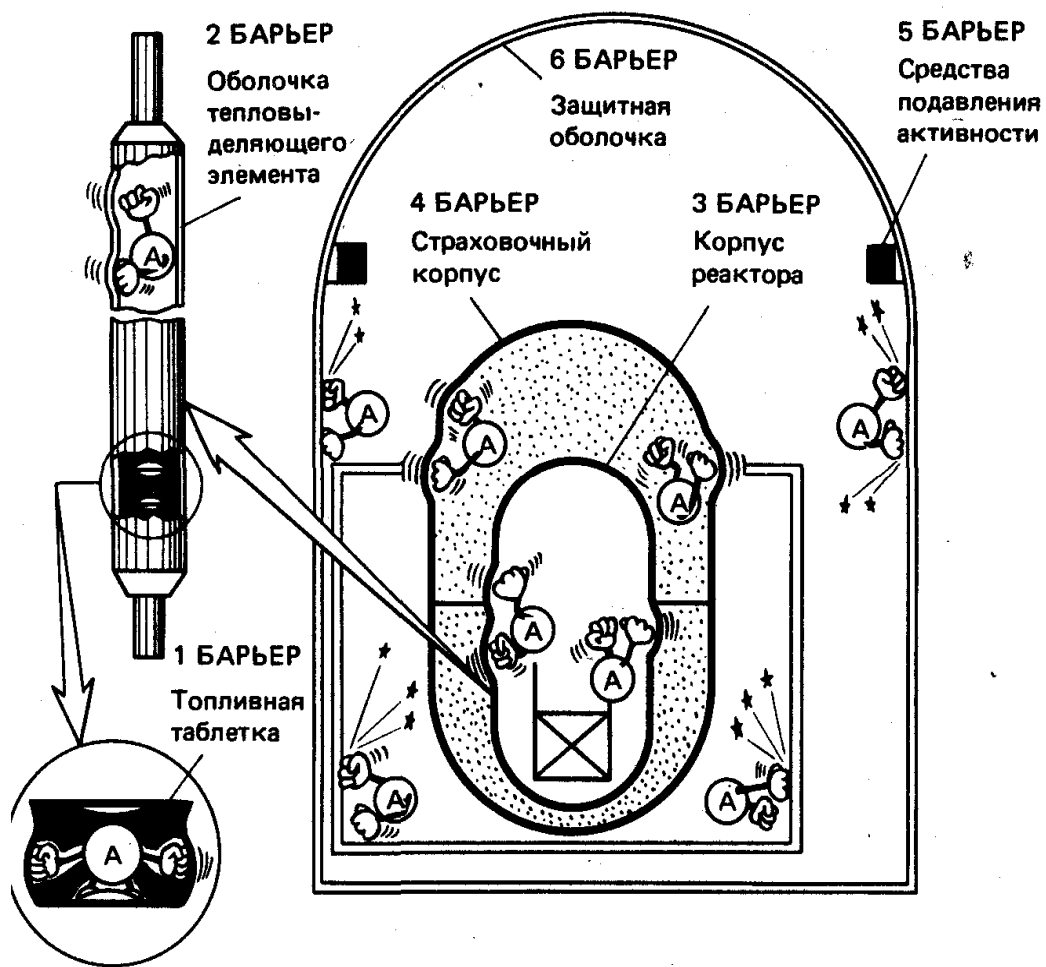
Защитная оболочка реактора





Защитные системы безопасности и свойства внутренней самозащитенности реактора ВВЭР-1000

- Разнообразия, независимость, резервирование, физическое разделение – принципы эшелонированных защитных систем безопасности
- Внутренняя самозащитенность, многократность, пассивность систем глушения и охлаждения, естественные принципы их работы – обеспечивают неуязвимость реактора к ошибкам персонала, отказа и дефектам оборудования
- Прочный корпус реактора, прочный страховочный корпус, герметичный второй контур исключают потерю воды из реактора. Активная зона под уровнем воды – **РАСПЛАВЛЕНИЕ ТОПЛИВА ИСКЛЮЧЕНО**
- Свойства самоглушения исключают разгон реактора – **ВЗРЫВ НЕВОЗМОЖЕН**



Защитные барьеры на ВВЭР-1000

- Выход радиоактивности предотвращается рядом последовательных барьеров
- Степень ослабления активности защитной оболочки станции – 35 раз.

ЭТАПЫ БОЛЬШОГО ПУТИ РАЗВИТИЯ СИБИРСКОГО ХИМИЧЕСКОГО КОМБИНАТА

26 марта 1949 года	Совет Министров СССР принял постановление №1252/443 о строительстве СХК (комбината № 816)
6 апреля 1949 года	В г. Томске создано управление строительства № 601 (п/я №5 “Химстрой”) МВД
1950 год	Организация и комплектование Управления комбината
7 февраля 1951 года	Образована партийная организация на комбинате
1951 год	Начато строительство заводов: № 1 (ЗРИ – завод разделения изотопов); № 10 (СЗ – сублиматный завод); № 20 (ЗГЭС – завод “Гидроэнергоснаб”)
Июнь 1952 года	По решению ЦК ВКП(б) на комбинате создан политотдел
Июль 1952 года	Утверждена организационная структура разделительного завода в составе технологических цехов 41 и 42, цеха ревизии, станции жидкого азота, станции сжатого воздуха, отделов управления
Сентябрь 1952 года	Первая партийная конференция комбината
26 июля 1953 года	Ввод в эксплуатацию первой очереди корпуса № 1 завода № 1 (цех 41, ЗРИ)
26 июля 1953 года	Ввод в эксплуатацию завода № 20 (ЗГЭС)
7 августа 1953 года	Получена первая партия обогащенного урана промежуточной концентрации
10 сентября 1953 года	Образование административного Совета жилпоселка
17 ноября 1953 года	Ввод в эксплуатацию ТЭЦ
17 марта 1954 года	Указом Президиума Верховного Совета РСФСР образован город Северск
26 апреля 1954 года	Ввод в эксплуатацию цеха безводного фтористого водорода завода № 10 (СЗ)
21 мая 1954 года	Ввод в эксплуатацию цеха по производству технического фтора и гексафторида урана
13 июня 1954 года	Первые выборы в городской Совет народных депутатов

28 июня 1955 года	Выпуск первой партии урана оружейной кондиции на объект № 1 (завод разделения изотопов)
Октябрь 1955 года	Создание цеха по ремонту КИПиА – цех № 20 (ПП – приборное производство)
20 ноября 1955 года	Ввод в эксплуатацию завода № 5 (РЗ-5 – опытно-физическое производство), реактор И-1
1 мая 1956 года	Первая демонстрация трудящихся
1956 год	Ввод в эксплуатацию АТС-1
1956 год	Образование горкомов КПСС и ВЛКСМ
1956 год	Принято решение о строительстве первой промышленной атомной электростанции АЭС-1
5 декабря 1956 года	Открытие Дома культуры им. Н. Островского
18 июня 1957 года	Образование парткома комбината
8 февраля 1958 года	Введен в эксплуатацию второй атомный реактор ЭИ-2
6 августа 1958 года	Введена в эксплуатацию первая очередь 8-го корпуса завода № 1 (ЗРИ)
Сентябрь 1958 года	Введена в эксплуатацию первая в СССР промышленная атомная электростанция мощностью 100 МВт
19 сентябрь 1958 года	Переведен в энергетический режим реактор ЭИ-2
1958 год	Начало строительства завода № 25 (ХМЗ – химико-металлургический завод)
1959 год	Начало строительства завода № 4 (РЗ – реакторный завод)
Июнь 1959 года	Открыт филиал Томского политехнического института и политехникума
3 июня 1960 года	Сдан в эксплуатацию корпус № 9 завода № 1 (ЗРИ)
22 июня 1961 года	Завершено строительство завода разделения изотопов (объекта № 1) в проектом объеме
14 июля 1961 года	Введен в эксплуатацию реактор АДЭ-3 на заводе № 5 (РЗ-5)
17 июля 1961 года	Введена в эксплуатацию первая очередь химико-металлургического завода (объекта № 25)
Август 1961 года	Выдан первый комплект специзделий на заводе № 25 (ХМЗ)
19 августа 1961 года	Введена в эксплуатацию первая очередь радиохимического завода (объекта № 15)

Март 1962 года	Указом Президиума Верховного Совета СССР комбинат награжден орденом Ленина
1962 год	Введена в эксплуатацию вторая очередь заводов № 15 и № 25 (РХЗ и ХМЗ)
Май 1963 года	Введена в эксплуатацию первая очередь первого в СССР полигона глубинного захоронения радиоактивных технологических отходов
26 февраля 1964 года	Введен в эксплуатацию первый атомный реактор завода № 45 (РЗ) – АДЭ-4
10 марта 1964 года	В энергокомплексе АЭС-1 введен реактор АДЭ-3, в результате чего его тепловая и электрическая мощность увеличена в два раза
25 июня 1965 года	Введен в эксплуатацию в энергетическом режиме атомный реактор АДЭ-5 на заводе № 45 (РЗ). Начал работу АЭС-2
1965 год	Организован ремонтно-механический завод (РМЗ)
1967 год	Введен в эксплуатацию полигон глубинного захоронения нетехнологических сбросов (площадка № 18) завода № 15 (РХЗ)
1967 год	Комбинат награжден памятным знаком ЦК КПСС, Президиума ВС СССР, Совета Министров СССР, ВЦСПС
20 декабря 1968 года	В энергетический режим переведен реактор АДЭ-4
Февраль 1970 года	Образована лаборатория АСУП – в дальнейшем преобразована в ИВЦ
Январь 1971 года	Указом Президиума ВС СССР комбинат награжден орденом Октябрьской Революции
1971 год	Ввод в эксплуатацию зд.50А на заводе № 10 (СЗ) – переход цеха № 51 на новую технологическую схему
Декабрь 1973 года	Ввод в эксплуатацию первой очереди зд.1005 на заводе №1 (ЗРИ) – внедрение центрифужной технологии разделения изотопов урана на ультраскоростных центрифугах
Декабрь 1973 года	Начало эксплуатации комплекса горячего водоснабжения г. Томска и теплоснабжения теплиц овощесовхоза «Кузольский» от «сбро-ского атомного тепла»

1974 год	На Сибирской АЭС выработано 160 тыс. Гкал тепловой энергии
1975 год	Ввод в эксплуатацию зд.257 на заводе №15 (РХЗ), начало подачи растворов на захоронение по постоянной схеме, минуя бассейны Б-1 и Б-2
1977 год	Организовано ремонтно-строительное подразделение в составе РМЗ
1978 год	Ввод в эксплуатацию нового производства (зд. 935) на заводе № 25 (ХМЗ)
1983 год	Осуществлен перевод радиохимического завода на экстракционную технологию
1984 год	Начат выпуск товаров народного потребления на РМЗ
1985 год	Выработка тепла на АЭС достигла 3 млн 100 тыс. Гкал в год
1988 год	Освоено строительство жилых домов силами РМЗ
1990 год	Выведены из эксплуатации реакторы И-1 и ЭИ-2 на РЗ-5
1991 год	Начало выпуска магнитных сплавов, магнитов и ультрадисперсных порошков на ХМЗ
1991 год	Начало ликвидации открытых хранилищ радиоактивных отходов
1992 год	Начало выпуска ультрадисперсных оксидных порошков на РХЗ. Начало сотрудничества с инофирмами по переработке и обогащению регенерированного урана на ЗРИ, СЗ, РХЗ и ХМЗ
Август 1992 года	Остановлен реактор АДЭ-3 на РЗ-5
1993–1994 годы	Начало переработки высокообогащенного российского оружейного урана в низкообогащенный энергетический в соответствии с российско-американским соглашением о ядерном разоружении
Январь 1994 года	Правительством РФ принято решение о прекращении выработки оружейного плутония и о замещении мощностей остановленных и останавливаемых реакторов для теплоснабжения г. Томска

1994 год	Открыт участок керамического производства на РМЗ
1995 год	Начало проработки и изучения вариантов перевода двух действующих реакторов АДЭ-4 и АДЭ-5 в одноцелевой энергетический режим
Апрель 1995 года	Реакторный завод СХК подключен к системе теплоснабжения г. Северска
21 ноября 1995 года	Во исполнение решения Коллегии Министерства по атомной энергии РФ от 21.11.95 начата разработка проектно-сметной документации о строительстве АСТ (атомной станции теплоснабжения) в г. Северске
1996–1997 годы	Введены первая и вторая очереди установки ВОУ-НОУ на сублиматном заводе
1997 год	Открыт кузнечно-прессовый цех для производства нержавеющей посуды на РМЗ
1998 год	Разработана новая кадровая политика, направленная на снижение возраста персонала СХК
1999 год	Введен в эксплуатацию новый производственный участок на РМЗ
1999 год	Открыта учебная лаборатория на реакторном заводе № 5 для прохождения практики студентов ТПУ
2000 год	Начат выпуск транспортных емкостей на РМЗ
2000 год	Организована промышленная переработка рудного сырья с ПП ГХО на СЗ и РХЗ
Январь 2001 года	СХК удостоен премии Правительства РФ в области качества
2001–2003 года	В соответствии с постановлением Правительства РФ о замещении мощностей останавливаемых реакторов продолжаются работы по конструкции ТЭЦ

В настоящее время основными товарными видами продукции и услугами СХК являются:

Уран, обогащенный по U-235 до 5 % в форме гексафторида урана, гексафторид урана, имеющий обогащение по U-235 менее 1 %, услуги по конверсии оксидов урана и тетрафторида урана в гексафторид урана.	Для инофирм Cogema и Eurodif (Франция), USEC, Palmco и RWE Nukem (США), Urenco и BNFL (Великобритания), Synatom (Бельгия), Fortum (Финляндия), KKL (Швейцария), Siemens и Internexco GmbH (Германия), а также для российских АЭС
Уран, обогащенный по U-235 до 20 % в форме металлического урана	Предназначен для исследовательских реакторов (контракты с фирмами General Electric, Nukem, СКА Андерсон, Конкорд Нью Экско и др.)
Услуги по обогащению регенерированного урана	Получаемый низкообогащенный уран отправляется на заводы по изготовлению ТВЭЛов в России и за рубежом (контракт с французской фирмой Кожема)
Стабильные изотопы олова, серы, вольфрама, хрома, теллура, свинца, германия, криптона, ксенона и др.	Используются в качестве меченых атомов в различных областях науки и техники (химии, биологии, исследовании космоса, атомной техники, геологии, геофизике, дефектоскопии, медицины). СХК изготавливает их для фирм Isoflex (США), Chemgas (Франция), Chemotrade (Германия), Radiosotope Centre POLATOM (Польша), Campro Scientific DV (Нидерланды), iThemba LABS (ЮАР), Trace Sciences (Канада), а также для российских предприятий ГНЦ РФ ФЭИ (Обнинск) и Экология-ИЗО (Москва)
Плавииковая кислота	Используется в стекольной промышленности для художественной обработки стекла, а также как компонент глинокислоты, применяемой для повышения отдачи нефтяных скважин
Натрия фторид таблетированный	Применяется как сорбент для очистки газов

Трифторид азота	Применяется в производстве микропроцессоров, сверхбольших интегральных схем и плазменных панелей
Тепловая и электрическая энергия	Для обеспечения потребностей комбината, ЗАТО Северска и г.Томска
Безводный фтористый водород	Предназначен для получения технического фтора, фторосодержащих реактивов и особо чистых веществ, некоторых фторорганических продуктов, хладонов
Гексафторид лития	Предназначен для производства электролита для литий-ионных источников тока (аккумуляторов для ноутбуков, сотовых телефонов, фото- и видеокамер, плееров и других мобильных электронных устройств)
Гексафторид вольфрама	Применяется при производстве вольфрамовых нагревателей, высокотемпературных нагревательных установок, жаропрочных тиглей для изделий медицинской техники

Дальнейшее развитие комбината будет идти по нескольким направлениям:

1. Реконструкция ТЭЦ.
2. Нарращивание мощностей завода разделения изотопов.
3. Переориентирование радиохимического завода после остановки реакторов на очистку регенерированного топлива.
4. Увеличение производства фтора и объема услуг по фторированию закиси-окиси различных сортов урана на сублиматном заводе.
5. Создание новых производств, в частности завода по производству трифторида азота и завода по производству МОКС-топлива.
6. Прорабатывается вопрос о строительстве в перспективе новой атомной электростанции с двумя энергоблоками ВВЭР-1000.

После начала экспортной деятельности СХК получил широкое международное признание. В 1995 году комбинат удостоен приза «Золотой Меркурий» за наилучшие показатели по объемам реализованной продукции. В 1996 году СХК завоевал приз «Золотой орел» Академии бизнеса США за активную экспортную деятельность и экологическую безопасность.

Глава 3. ЯДЕРНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ТРАНСПОРТНЫЕ УСТАНОВКИ

3.1. Атомные суда в мирных целях

В настоящее время российский атомный ледокольный флот насчитывает 7 действующих ледоколов, 1 атомный лихтеровоз (баржевоз), 1 выведенный из состава флота, но сохраняемый первый атомный ледокол “Ленин”. Кроме того, на Балтийском заводе строится новый ледокол “50 лет Победы”. Это самый большой в мире гражданский атомный флот.

Атомные ледоколы были построены с целью обеспечения проводки судов вдоль Арктического побережья. Ледоколы используются при перевозке различных грузов, в основном железной руды из Норильска на Кольский полуостров, где руда переправляется на обогатительные предприятия Мурманской области. Протяженность этого маршрута составляет около 3000 км.

Название	Год	Класс постройки
“Ленин”	1959	Выведен из эксплуатации в 1989 г.
“Арктика”	1975	“Арктика”
“Сибирь”	1977	“Арктика”
“Россия”	1985	“Арктика”
“Севморпуть”	1988	“Лихтеровоз”
“Таймыр”	1989	“Таймыр”
“Советский Союз”	1990	“Арктика”
“Вайгач”	1990	“Таймыр”
“Ямал”	1993	“Арктика”

Первым в мире гражданским судном с ядерной энергетической установкой был спущенный на воду в 1957 году ледокол “Ленин”. “Ленин” находился в эксплуатации 30 лет – с 1959 по 1989 гг.

Водоизмещение “Ленина” 16 тыс. тонн, длина 134 м, осадка 9.2 м.

Основываясь на опыте создания и эксплуатации первого атомохода, в 1975 году введен в строй еще более мощный корабль – “Арктика”. Этот ледокол первым из надводных судов 17 мая 1977 года достиг в свободном плавании Северного полюса. “Арктика” – 3-вальный турбоэлектророход с 4 палубами, баком и 5-ярусной средней надстройкой, корпус разделен на 8 водонепроницаемых отсеков. Атомная водо-

водяная паропроизводящая установка состоит из 2-х блоков по 1 реактору и четырех парогенераторов в каждом.



Рис. 1. Атомный ледокол "Ленин"

Гребная электрическая установка переменного-постоянного тока выполнена по схеме "генератор переменного тока – кремниевый выпрямитель – электродвигатель постоянного тока", 3 гребных электродвигателя мощностью по 17.6 МВт. Водоизмещение – 23 460 т, длина 148 м, ширина 30 м, осадка 11 м, высота борта 17 м, мощность атомной паропроизводящей установки – 55.1 МВт.

Всего построено 5 ледоколов типа "Арктика".

АРКТИКА



СИБИРЬ



РОССИЯ



СОВЕТСКИЙ СОЮЗ



ЯМАЛ



Рис. 2. Атомные ледоколы типа "Арктика"

Кроме того, в конце восьмидесятых годов в Финляндии были построены 2 ледокола: “Таймыр” и “Вайгач”, оснащенных одним реактором и способных заходить в устья крупных рек. Их длина – 151 м, ширина – 29 м, мощность реактора 35 МВт.

ТАЙМЫР



ВАЙГАЧ



Рис. 3. Атомные ледоколы типа “Таймыр”

Лихтеровоз “Севморпуть” построен на Керченском судостроительном заводе «Залив» им. Б.Е. Бутомы в период с 01.06.82 – 31.12.88. гг. Судно предназначено для перевозки лихтеров типа ЛЭШ (до 450 т) в

трюмах, в специально оборудованных ячейках и на верхней палубе с погрузкой и выгрузкой их судовым лихтерным краном; контейнеров международного стандарта ИСО (до 30 т) в трюмах и на верхней палубе без специального переоборудования судна, погрузка-выгрузка контейнеров должна осуществляться береговыми средствами. Ограниченные партии могут быть погружены и выгружены контейнерными приставками лихтерного крана.

Длина судна – 260 м, ширина – 32 м, мощность энергетической установки – 32.5 МВт. Всего судно может взять на борт 74 лихтера грузоподъемностью по 300 т или 1328 двадцатифутовых контейнеров. Корабль способен самостоятельно идти в ледовом поле толщиной до 1 м.



Рис. 4

Ядерная энергетическая установка

Атомные ледоколы “Таймыр”, “Вайгач”, лихтеровоз “Севморпуть” оборудованы атомной энергоустановкой типа КЛТ-40 с одним реактором, ледоколы типа “Арктика” – ОК-900 с двумя водо-водяными реакторами. Активная зона реакторов этого типа имеет около 1,5 м в высоту и около 1 м в диаметре и включает 241–247 тепловыделяющих сборок. Обогащение топлива не превышает 30–40 % по урану-235. При нормальной эксплуатации перезарядка топлива производится каждые три (четыре) года. Эта операция проводится на РТП “Атомфлот”.

Суда технологического обслуживания

В Мурманском морском пароходстве обслуживание ледоколов осуществляют пять судов, применяемых для перезарядки активных зон атомоходов, хранения твердых и жидких радиоактивных отходов, отработанного ядерного топлива. Все суда базируются на РТП “Атомфлот”.

Плавтехбаза “Имандра”, введенная в эксплуатацию в 1981 году, используется для проведения операций по перезарядке атомных ледоколов. “Имандра” оборудована шестью баками для промежуточного хранения отработанного ядерного топлива, емкости хранилища позволяют принять шесть активных зон (1530 тепловыделяющих сборок). На “Имандре” также производится хранение свежего ядерного топлива. Для хранения ЖРО на “Имандре” имеются 12 цистерн с общей емкостью 545 куб. м.

После выдержки на “Имандре” отработанное топливо поступает в хранилище плавтехбазы “Лота”. Это судно было построено в 1961 году и переоборудовано в 1984 году. На борту “Лоты” имеется 12 баков для хранения отработанного ядерного топлива. Общая емкость хранилища – 12 активных зон (4080 тепловыделяющих сборок). В 1993 году “Лота” была переоборудована и сегодня способна принимать транспортные контейнеры для отработанного топлива типа ТК-18. “Лота” – единственное судно в регионе, способное работать с контейнерами этого типа. Сегодня оно используется при операциях по вывозу топлива на х/к “Маяк” для переработки как для нужд ММП, так и Северного флота.

Танкер “Серебрянка” поступил в распоряжение ММП в 1975 году. Оборудован 8 баками для жидких радиоактивных отходов (ЖРО) общей емкостью – 851 куб. м. Установка по переработке ЖРО на Серебрянке не функционирует.

Пароход “Володарский”, 1929 года постройки, поступил в распоряжение ММП в 1969 году. Судно используется для хранения твердых радиоактивных отходов (ТРО) средней и низкой активности. На сегодня в хранилищах судна находится около 15 тонн ТРО.

Плавтехбаза “Лепсе” построена в 1936 г., в распоряжение ММП поступила в 1962 году. До 1980 года выполняла функции “Имандры”. Сегодня в хранилищах судна находится 624 тепловыделяющих сборки, большинство из которых повреждены. Для извлечения этого топлива требуются специальные технологии. Суммарная активность топлива составляет около 750 тыс. кюри. Помимо этого, на “Лепсе” производится хранение твердых и жидких РАО средней и низкой активности.

Береговой комплекс для обращения с РАО

РТП “Атомфлот” располагает береговой установкой для переработки ЖРО. Сегодня ее годовой объем составляет около 1200 куб. м. После завершения трехстороннего проекта между Россией, США и Норвегией емкость установки увеличится до 5000 куб. м в год.

РТП “Атомфлот” имеет в своем распоряжении береговое хранилище для ЖРО. Емкость хранилища составляет 200 куб. м.

На территории РТП “Атомфлот” расположено пять береговых хранилищ для средне- и низко-активных ТРО. Общая емкость хранилищ равна 464 куб. м. “Атомфлот” имеет установку для сжигания ТРО, в результате чего объем ТРО сокращается в 80 раз. ТРО не подлежащие сжиганию, хранятся в береговых хранилищах или на борту описанных выше плавтехбаз.

Торговое судно “Саванна” США прошло 90 000 миль и израсходовало только 15 кг уранового горючего. Судну с обычной энергетической установкой на такой путь потребовалось бы 1700 т дизельного топлива.

Наши атомные ледоколы могут совершать кругосветные маршруты 7–10 раз без перезагрузки топлива.

3.2. Атомные подводные лодки и надводные корабли

С 1955 по 1996 гг. в бывшем СССР построено около 250 атомных подводных лодок и 5 надводных кораблей. Помимо этого был сконструирован ядерный реактор (класса “Нюрка”), который предполагалось устанавливать на дизельные подводные лодки. К Северному флоту приписано 2/3 всех атомных подводных лодок России, 1/3 приходится на Тихоокеанский флот. На Черноморском и Балтийском флотах атомные подводные лодки не базируются. К концу 80-х годов по общему количеству атомных и дизельных подводных лодок СССР превзошел подводные флоты всех государств, включая США. Согласно условиям договоров СНВ-1 и СНВ-2 и в результате физического и морального старения, из боевого состава ВМФ России уже выведено 138 атомных подводных лодок. На сегодня в боевом составе Северного флота находятся 67 атомных подводных лодок и два атомных крейсера. В состав Тихоокеанского флота входят 42 атомные подводные лодки, один атомный крейсер и один атомный корабль связи.

Атомные подводные лодки (АПЛ) строились на четырех судостроительных заводах. Строительство первой АПЛ началось в 1955 г. на “Северном машиностроительном предприятии” в г. Северодвинске. С 1957 года к строительству АПЛ приступает Амурский завод, (г. Комсо-

мольск-на-Амуре) с достроечной базой в поселке городского типа Большой Камень. В 1960 г. атомные ПЛ начинают строить еще два завода: “Красное Сормово” (г. Нижний Новгород), и Ленинградское Адмиралтейское Объединение, (ЛАО, г. Санкт-Петербург). Атомные надводные корабли строились на Балтийском заводе в г. Санкт-Петербурге. Вплоть до 1992 года строилось и спускалось на воду от 5 до 10 АПЛ в год.

В основном АПЛ строились в г. Северодвинске. Всего здесь было спущено на воду 125 атомных подводных лодок, на Амурском заводе – 56 АПЛ, на ЛАО – 39 и на заводе “Красное Сормово” – 25. Те АПЛ, корпуса которых делали в Нижнем Новгороде, транспортировались с помощью специализированного дока по системе внутренних вод России (Волжские и Карельские каналы) в Белое море, где достраивались и проходили испытания в г. Северодвинске.

Начиная с 1992 года количество строящихся атомных подводных лодок сократилось до 1–2 в год. Сегодня строительством АПЛ занимается только “Северное машиностроительное предприятие” в г. Северодвинске.

Постановление Советского Правительства о строительстве первой атомной подводной лодки было принято 21 декабря 1952 г. К этому времени уже велись исследования в области создания атомной энергетической установки. Было завершено строительство первого водородного реактора в г. Обнинске (Московская область), немного позже создан реактор на жидко-металлическом теплоносителе. Оба реактора использовались для проведения исследований в области ядерной энергетики, а также служили тренажерами для подготовки экипажей АПЛ. На этих установках проходили обучение члены экипажей первых атомных подводных лодок.

Формирование экипажа для службы на первой атомной ПЛ началось в 1954 г. В 1955 г. была пущена первая атомная энергетическая установка и началось обучение экипажей для двух первых АПЛ К-3 и К-5. Формирование и обучение экипажей для АПЛ К-8, К-14 и К-19 началось в 1956 г. В этом же году был пущен прототип реактора с жидкометаллическим теплоносителем и началось обучение экипажа для АПЛ с ЖМТ К-27.

Строительство первой советской атомной подводной лодки К-3 (“Ленинский Комсомол”) началось 24 сентября 1955 г. в г. Молотовске (сегодня г. Северодвинск). АПЛ была спущена на воду 9 августа 1957 г., первый пуск ядерной энергетической установки был дан 3–4 июля 1958 г. Так как США еще 17 января 1954 г. приняли в состав флота первую атомную подводную лодку, Постановлением Совета Министров СССР

от 22.10.55 г. было предписано начать строительство атомных ПЛ, не дожидаясь результатов испытаний головной К-3. Принятые на вооружение в США и СССР атомные подводные лодки, оснащенные атомным оружием, могли подойти к берегам противника незамеченными. Это направление развития военной техники способствовало нарастанию гонки вооружения.

АПЛ первого поколения были стратегическими АПЛ, которые имели на борту от 3 до 8 баллистических ракет с ядерными боеголовками. В 1992 г. выведена из эксплуатации последняя лодка этой серии.

С 1971 по 1992 гг. было построено 43 АПЛ второго поколения. Каждая АПЛ этой серии могла нести от 12 до 16 баллистических ракет с дальностью стрельбы 9000 км.

Часть АПЛ имели на вооружении крылатые ракеты и предназначались для борьбы с ударными авианосными группировками, и надводными кораблями, и подводными лодками противника. На сегодняшний день АПЛ второго поколения поэтапно выводятся из эксплуатации.

Строительство первой серии АПЛ третьего поколения (класса “Тайфун”) началось в 1977 г. Первая АПЛ этого класса вошла в боевой состав в 1981 г. К 1989 г. было построено 6 АПЛ класса “Тайфун” – самых больших атомных подводных лодок в мире, способных нести 200 ракет с ядерными боеголовками. Идея создания таких мощных атомных подводных лодок заключалась в возможности получения превосходства сил на случай развертывания ядерной войны.

В отличие от лодок второго поколения, на кораблях третьего поколения используется более безопасная и совершенная атомная энергетическая установка, совершенствуются системы электроники и радиотехнического вооружения, понижается шумность подводных лодок. В 1980 г. в боевой состав Северного флота входит первая АПЛ (класса “Оскар-Г”), оснащенная крылатыми ракетами типа “Гранит” для борьбы с авианосными группировками противника. Строительство АПЛ (класса “Оскар-И”) началось несколькими годами позже. Четыре многоцелевые АПЛ (класса “Сиерра”) вошли в боевой состав флота в период между 1984г. и 1993 г. Корпус этих АПЛ был сделан из титановых сплавов. С 1982 года начинается строительство усовершенствованной версии АПЛ класса “Сиерра” – атомных подводных лодок (класса “Акула”). Эти лодки самые современные среди АПЛ российского ВМФ, имеющие повышенную скрытность за счет увеличения глубины погружения и снижения уровня шумности. Некоторые АПЛ класса “Акула”, построенные в середине 80-х гг., позднее были усовершенствованы с целью уменьшения уровня шумности. Последние АПЛ этого класса имеют уровень шумности меньший, чем те, что были введены в эксплуатацию в 1990 г.

Эти подводные лодки классифицируются как “Акула-II” и в длину превосходят АПЛ класса “Акула-I” на 4 метра. В настоящее время продолжается строительство только двух проектов АПЛ третьего поколения (классов “Оскар” и “Акула”).

За всю историю строительства АПЛ было создано 5 несерийных или экспериментальных кораблей. Это подводные лодки К-27, “Ноябрь” ЖМТ, К-222 (162), “Папа”, К-278, “Комсомолец”, класса “Юниформ” и класса “Экс-рей”.

Через год после вступления в состав ВМФ первой АПЛ (К-3) в декабре 1959 года вышло Постановление ЦК КПСС и Совета министров СССР “О создании новой скоростной подводной лодки, новых типов энергетических установок и научно-исследовательских, опытно-конструкторских и проектных работ для подводных лодок”. На этой основе была финансирована и построена единственная в мире АПЛ К-222, подводная скорость которой до сих пор является мировым достижением (44,7 узлов), а промышленность СССР создала новую отрасль с технологией использования титановых сплавов. Позднее были построены серийные АПЛ с титановыми прочными корпусами. Основные преимущества титановых АПЛ заключались в их способности погружаться на глубину, недоступную стальным атомным подводным лодкам, и развивать большую скорость. Сегодня производство титановых АПЛ прекращено.

Подводная лодка “Комсомолец”, затонувшая у побережья Норвегии в апреле 1989 г., имела возможность применять оружие (торпеды) на глубине около 1000 метров. Это была самая глубоководная АПЛ в мире, установившая рекорд погружения – 1022 м.

Познакомим читателя с интересными данными, опубликованными в АиФ № 31, 2005 г.

Подводные российские истребители вражеских субмарин, не всплывая, в том числе под многометровым слоем льда, могут совершить кругосветный боевой поход.

СЕМЬ подводных “хищников” третьего поколения: “Барс”, “Волк”, “Вепрь”, “Рысь”, “Ягуар”, “Леопард” и “Пантера” – получили кошачьи имена от своих исторических тезок – первых русских лодок императорского подводного флота, созданного по Указу Николая II в 1916 г. До 90-х годов в целях секретности почти все советские подлодки были номерными.

Самые бесшумные в мире атомные субмарины могут круглосуточно вести секретное слежение за “иностранцами”. Если потребуется – уничтожить или ставить хитроумные минные поля, а из-под воды наносить ракетные удары по корабельным группировкам и береговым объ-

ектам. До сих пор американские моряки называют эту дивизию истребителей, сформированную еще в СССР, “звериным оскалом социализма”.

За двадцать лет военной биографии “морские кошки” совершили 33 боевых похода. Провели в них около семи лет и прошли в океанских глубинах более 210 тысяч миль – почти 10 кругосветных плаваний.

Несмотря на почетный возраст (“Леопард” был заложен в 1988 г., а спущен на воду в 1992 г.), он оказался самым надежным и безопасным в грозном “зверинце” соединения. Стометровое тело субмарины диаметром 14 метров легко идет под водой со скоростью 35 узлов (более 60 км в час), в надводном положении – 20 узлов.

Краснознаменный крейсерский атомоход ныряет на глубину 500 метров и может провести не одну боевую схватку с противником. На экипаж в 70 человек (в основном офицеры, мичманы и 10 матросов срочной службы) – 8 торпедных аппаратов, комплекс малогабаритных крылатых ракет РК-55 “Гранат” (аналог американских “Томагавков”) и много другого убийственного вооружения.

Утилизация подводных лодок				
Финансирование работ по утилизации в млрд руб.				
	2002	2003	2004	2005
Иностранная помощь	0,6	0,83	2,7	3,1
Средства бюджета РФ	1,9	1,9	1,9	1,9
Количество АПЛ в шт. за период		1986–1998гг.	1999–2003гг.	Всего (на июнь 2005 г.)
Выведены из эксплуатации		177	16	195
Выгружено ОЯТ* из реакторов		53(4 в год)	72 (14 в год)	136
Утилизированы		39(3 в год)	57(11 в год)	115
*Отработанное ядерное топливо				

Источник: Федеральное агентство по атомной энергии (www.minatom.ru)

“Леопард” по конструкции гораздо сложнее космических станций. Недаром системы жизнеобеспечения первых звездных аппаратов отработывались на подводных лодках. Автономность АПЛ велика, и в Мировом океане для нас нет недосягаемых точек. Мощный атомный реактор обеспечивает всю жизнь на лодке. Вода для бани, питья, приготовления пищи добывается в океане, а затем “варится” в специаль-

ных опреснителях. Воздух тоже берется из морской воды. Продолжительность боевого похода ограничивается только запасом продуктов. Подлодка может идти на автопилоте по заданным бортовым компьютером курсу, глубине и т.д. При этом “зверьком” управляют 3 человека.

С помощью ядерного реактора на гребной вал подлодки “выбегает” сумасшедшая мощь – “табун в 43 тысячи лошадиных сил”. И это при том, что реактор работает на 40 % своих возможностей.

Атомные надводные корабли

За период с 1974 г. по настоящее время на Балтийском заводе в Санкт-Петербурге было построено 4 атомных крейсера проекта (“Адмирал Нахимов”, “Адмирал Лазарев”, “Адмирал Ушаков”, “Петр Великий”) и один атомный корабль связи проекта (“Урал”). “Адмирал Ушаков” и “Адмирал Нахимов” базируются на Северном флоте, “Адмирал Лазарев” и “Урал” - на Тихоокеанском.

В США на вооружении 10 авианосцев, оснащенных ядерно-энергетической установкой. Преимущества очевидны. Авианосец “Нимиц” несет 100 самолетов на борту и по сравнению с обычными авианосцами берет на 50 % больше запас горючего для самолетов и боеприпасов. В течение 13 лет не испытывает недостатка в топливе.

Ядерные энергетические установки

Ядерные энергетические установки АПЛ также делятся на четыре поколения. В основном на АПЛ установлены модификации атомных установок с реакторами типа ВВЭР.

Отличие ядерных установок атомных станций от ЯЭУ атомных ПЛ главным образом состоит в том, что при меньших размерах на ядерных установках АПЛ достигается относительно большая выходная мощность.

Обогащение ядерного топлива АЭС по урану-235 не превышает 4-х процентов, в то время как уровень обогащения урана-235 в топливе АПЛ может достигать 90 процентов. Такой высокий уровень обогащения топлива АПЛ позволяет производить его замену гораздо реже, чем это делается на АЭС.

Тепловая мощность реакторов российских АПЛ варьируется от 10 МВт на небольших ядерных установках, используемых на АПЛ (класса “Юниформ”) до 200 МВт в реакторах, установленных на новой

АПЛ (класса “Северодвинск”. Тепловая мощность ядерных установок атомного крейсера (класса “Киров”) составляет 300 МВт.

Соединенные Штаты

Все американские подводные лодки имеют реакторные установки, 10 из 12 авианосцев также имеют реакторные установки, а еще два атомных авианосца строятся. США отказались от ядерных реакторов для оснащения остальных кораблей. Отмечен устойчивый рост срока службы активной зоны реактора от 2 лет для первой американской подводной лодки Nautilus до 33 лет для реакторов нового поколения ударных ПЛ класса Virginia. Сегодня срок службы активной зоны реакторов, установленных на авианосце типа Nimitz, на ударных ПЛ типа Los Angeles и на ПЛ с баллистическими ракетами типа Ohio составляет около 20 лет. Продолжаются работы по увеличению срока эксплуатации реакторов для новых авианосцев (50 лет) и для подводных лодок с баллистическими ракетами следующего поколения (40 лет). В 80-е годы ВМС США заказывали от 4 до 5 тонн U-235 высокообогащенного урана в год. Однако численность американского подводного флота снизилась со 139 ПЛ в 1990 году до 73 (18 ПЛ с баллистическими ракетами и 55 ударных ПЛ) в 2000 году, а число корабельных реакторов сократилось до 97. Учитывая, что повышение качества позволит увеличить срок эксплуатации реакторов, ежегодная потребность подводных лодок США на сегодняшний день составляет приблизительно 2 тонны U-235. При номинальном сроке эксплуатации активной зоны это составляет в среднем 5 активных зон в год с 400 кг U-235 каждая.

Американская атомная подводная лодка “Огайо” имеет длину 170 м, ширину 18 м, развивает скорость 25 узлов. На борту лодки находится 24 баллистических ракеты по 14 боеголовок мощностью 150 килотонн.

Великобритания

Британские подводные лодки работают на оружейном уране. По оценкам, период между перезагрузками реакторов ПЛ типа Vanguard с баллистическими ракетами составляет 8–9 лет. Активная зона реакторов для нового поколения ударных ПЛ рассчитана на 25–30 лет.

В соответствии с планами, в 2010 году Великобритания будет иметь на вооружении меньшее число АПЛ по сравнению с сегодняшним (16 единиц). По оценкам, реакторы британских АПЛ в год потребляют по сравнению с американскими в 2 раза меньше U-235 в силу меньших размеров кораблей, более низкой мощности реакторов и

меньшего расстояния, которое они проходят. Таким образом, ежегодные потребности британского атомного флота в U-235 составят около 0,16 тонн. Великобритания заявила, что ее суммарные запасы высокообогащенного урана составляют 21,9 тонн.

Франция

Для разных поколений французских подводных лодок используется топливо с разным уровнем обогащения. В первых трех подводных лодках с БРПЛ класса Redoutable (70-е годы) использовался низкообогащенный уран. Однако подводные лодки этого класса третьего и четвертого поколений перешли на высокообогащенный уран. Ударные ПЛ первого поколения Франции класса Rubis и ПЛ с БРПЛ класса Triomphant вернулись к низкообогащенному топливу. Наряду с решением о прекращении производства высокообогащенного урана, Франция намерена использовать низкообогащенный уран с содержанием U-235 менее 10 %.

Если судить по имеющимся на сегодня планам, к 2015 году Франция намерена сохранить то же количество атомных кораблей, которое было на январь 2001 года: 4 ПЛ с баллистическими ракетами, 6 ударных АПЛ и один авианосец.

Китай

По имеющейся информации, реакторы китайских атомных судов работают на низкообогащенном топливе с уровнем обогащения в 5 %. Предполагают, что в 2010 году Китай поставит на вооружение 1- или 2- атомных подводных лодки с баллистическими ракетами и 5–6 ударных АПЛ.

Подводные транспортные суда

Идея создания подводных транспортных судов, способных перевозить различные, в том числе жидкие, грузы подо льдами Северного Ледовитого океана независимо от погодных условий, давно обсуждается учеными и инженерами. В последние годы было предложено много проектов и программ, в том числе проект подводного супертанкера для транспортировки из Арктики сжиженного газа американской фирмы General Dynamics, пятилетняя программа канадского правительства по созданию подводно-надводных судов для перевозки нефти, газа и других полезных ископаемых. Существует несколько патентов СПМБМ

“Малахит” на подводные танкеры и сухогрузы. Однако ни одному из этих проектов и программ не суждено было осуществиться. Видимо, это объясняется тем, что все они требуют значительных капиталовложений на проектирование и строительство специфических подводных транспортных средств, а также создания для них особой инфраструктуры портов и мест базирования.

ЦКБ МТ “Рубин” предложило свою концепцию решения этих вопросов. В начале 90-х годов в бюро начались поисковые исследования в направлении наиболее экономичного пути создания транспортных подводных лодок, при этом основное внимание было уделено вопросу использования выведенных из состава ВМФ атомных подводных ракетно-носцев – тяжелого наследства времен холодной войны. Это наиболее приемлемый в настоящее время путь решения проблемы, так как замена ракетного оружия полезным грузом позволяет эффективно использовать технические возможности устаревших в военном отношении кораблей.

Поэтому не случайно РАО “Норильский никель” обратилось в ЦКБ МТ “Рубин” с предложением создать альтернативную транспортную систему для перевозки продукции комбината “Норильский никель” с использованием выводимых из состава ВМФ атомных подводных лодок в качестве транспортных судов. Существующая долгие годы транспортная система, включающая в себя суда типа “Дмитрий Донской”, “Норильск” и атомные ледоколы типа “Арктика” и “Таймыр”, постепенно исчерпывает свой ресурс и, с учетом необходимых для восстановления инвестиций, становится экономически невыгодной. По оценкам специалистов, имеющиеся ледоколы при условии своевременного и полного финансирования их нужд смогут обеспечить программу северного завоза лишь на 60–70 %. Строительство и ввод в эксплуатацию новых ледоколов – дело будущего, а обслуживать транспортные коммуникации арктических районов необходимо сегодня. Сейчас продукция Норильской горной компании перевозится из Дудинки в Мурманск на сухогрузах в сопровождении атомных ледоколов. Стоимость этих услуг определяется ежегодно специальным соглашением между Мурманским морским пароходством и “Норильским никелем” и сейчас РАО платит свыше 11 долларов за тонну груза. Вполне естественно стремление максимально сократить расходы на транспортировку.

ЦКБ МТ “Рубин” по техническому заданию РАО “Норильский никель” разработало технические предложения по созданию альтернативной морской транспортной системы для круглогодичной доставки продукции без ледокольной проводки на одном транспортном средстве – АПЛ, переоборудованной для перевозки грузов. В этом варианте значительный экономический эффект может быть достигнут за счет переобо-

рудования тяжелого атомного подводного крейсера, выведенного из состава ВМФ по международному договору о сокращении вооружений. Для соответствия АПЛ новому назначению требуется реализовать следующие три качества (не соединимые вместе ни на одном из существующих транспортных средств):

- способность перевозить значительное количество груза (в регламентированной упаковке) – до 10 тыс. т и более – в подводном положении;
- способность преодолевать в надводном положении ледяные поля сплоченностью 8–10 баллов и толщиной до 1,5–2 м;
- наличие осадки с грузом не более 9,5 м для преодоления перекатов на реке Енисей и способность принятия груза у причала порта Дудинка.

Создание единого транспортного средства, объединяющего эти три качества – новая, сложная задача для бюро. Обычные подводные лодки преодолевают ледовые препятствия в подводном положении, плавая на безопасной глубине, превышающей максимальную для данного района осадку ледяных образований (торосов, айсбергов), что требует достаточной глубины моря (обычно не менее 70–100 м), а для захода в порты с замерзающей акваторией и мелководными, в том числе речными, путями подхода (Дудинка) в надводном положении необходима ледокольная поддержка. Таким образом, необходимо обеспечить достаточную ледопробиваемость подводного судна в надводном положении. Существующие мелкосидящие ледоколы (“Таймыр”, “Вайгач”, “Капитан Сорокин”) способны преодолевать лед толщиной до 1,6–2 м при глубинах 7–9 м и на фарватерах рек, но они недостаточно мореходны. Морские, в том числе атомные, ледоколы типа “Арктика”, имеющие высокую ледопробиваемость, а также большую осадку, не приспособлены для захода в порты с мелководными подходами. Суда типа атомного лихтеровоза “Севморпуть”, обладающие большой грузоподъемностью, имеют осадку более 10 м и недостаточную ледопробиваемость, не обеспечивающую круглогодичную эксплуатацию.

Почти очевидным оказался выбор для переоборудования АПЛ типа “Тайфун”, имеющей наибольший запас плавучести и минимальную базовую осадку. При этом требуемая грузоподъемность судна с обеспечением подводного плавания, а также минимальной осадки в надводном положении реализуется за счет демонтажа ракетного комплекса и увеличения ширины носовой части, а также подкрепления ряда балластных цистерн. Предложен наиболее экономичный путь переоборудования боевой АПЛ в транспортную с минимальным объемом работ по комплектованию оборудованию и корпусу в условиях ПО “Севмашпред-

приятие”. Кормовая часть корпуса, включающая атомную энергетическую установку, не изменяется (с учетом необходимости развития полной мощности для обеспечения ледопроеходимости). Также сохраняется модуль обеспечения кораблевождения, управления, навигации, связи и средств освещения ледовой обстановки. Добавляются ледовые подкрепления, включая усиления надстройки и придание легкому корпусу (преимущественно в носовой части) ледокольной формы, оптимизированной по ледопроеходимости, с шириной не более 27 м. Предусматривается размещение прочных трюмов достаточных размеров с грузовыми люками. Для сокращения времени стоянки в порту предложен горизонтальный способ грузообработки штатными портовыми погрузочными средствами через специальные погрузочные люки диаметром 4,5 м.

При определении направления и объема переоборудования принята концепция подводно-надводного судна (ПНС) для преодоления ледяных полей как основного препятствия при перевозках. ПНС способно перевозить в трюмах от 10 до 15 тыс. т груза по маршруту Дудинка – Мурманск (Архангельск, Кандалакша) круглый год в подводном и надводном положении с учетом того, что глубина Енисея на Турушинском и Безымянном перекатах составляет от 12 до 9,7 м в зависимости от сезона и величины паводка. При достаточной глубине моря судно преодолевает ледяные поля в подводном положении. На мелководье (глубины 17–70 м) судно всплывает в позиционное положение и, имея сравнительно большую осадку, взламывает лед снизу. Для преодоления ледовых участков на предельном мелководье с глубинами 8–10 м, а также для увеличения ледопроеходимости судна при встрече с торосистыми участками и возможности работы набегам судно всплывает в надводное крейсерское положение и взламывает лед сверху, как обычный мелкосидящий ледокол.

Таким образом, ПНС преодолевает ледяные поля, изменяя свою осадку в зависимости от глубины моря и состояния льда, а специальная форма его носовой оконечности позволяет разрушать лед как снизу, так и сверху.

Следует отметить ряд преимуществ использования ПНС по сравнению с традиционным плаванием транспортных судов при ледокольной поддержке в восточной части Карского моря:

- нет необходимости постоянного присутствия морских ледоколов в восточной части Карского моря и речных ледоколов в Енисейском заливе и реке;
- отсутствует опасность ледового плена судов при тяжелой ледовой обстановке у мыса Желания;

- появляется возможность транспортировки груза в любой пункт арктического побережья (переход подо льдами Центральной Арктики), включая побережье Канады и Аляски.

Способы движения ПНС позволяют сократить продолжительность перехода в зимнее время по сравнению с ледокольным транспортом в 2–3 раза. Переход подо льдами к побережью Западной Арктики может быть выполнен за неделю, при этом переход ПНС в ледовых условиях по мелководью морей Бофорта, Чукотского и Берингова может осуществляться в надводном положении с применением описанных выше трех способов форсирования ледяных преград. Плавание в подводном положении на глубине до 100 м имеет по крайней мере три преимущества:

- независимость от погодных условий на поверхности моря (ветер, волнение);
- возможность развить большую скорость хода по сравнению с надводным положением, где возможна кавитация гребных винтов, особенно в штормовых условиях;
- возможность форсирования ледяных полей при наличии достаточной глубины моря (60 м и более) без необходимости разрушения льда.

Проработаны варианты движительного комплекса, обеспечивающего экономичный подводный ход ПНС со скоростью 16–18 узлов и со скоростью 2–3 узлов в надводном положении при форсировании сплошного ледового покрова толщиной до 2,6 м. Управляемость ПНС практически такая же, как базовой АПЛ. Наличие двух подруливающих устройств существенно повышает поворотливость ПНС, особенно на малых ходах. Поворотливость в ледовых условиях в позиционном положении может быть существенно улучшена за счет маневра дифферентом: притопления кормы, подвода ее под край ледяного канала и подлома льда отводом дифферента.

При подводном плавании ПНС на безопасной глубине в ледовых условиях северо-западной части Карского моря с осадкой килей торосов до 20 м, глубина моря должна быть не менее 60–70 м. В районах моря с меньшей глубиной ПНС должно всплывать для преодоления ледяных полей. Ледовая обстановка на трассе Дудинка – Диксон – мыс Желания – Мурманск описана статистически, и вся трасса может быть разделена на три участка по условиям преодоления ледяных полей. Различаются три типа таких условий: легкие, средние и тяжелые. При средних и легких условиях Баренцево море и северо-западная часть Карского моря весь год не требуют ледокольного плавания: толщина льдов у мыса Желания не более 0,7 м. При тяжелых условиях в феврале–мае могут

встречаться льды толщиной до 1,2 – 1,8 м, которые можно преодолевать в подводном положении. Продолжительность периода ледокольного плавания, таким образом, определена ледовыми условиями Карского моря в районе Диксона.

В итоге – оптимизированы маршруты между Мурманском и Диксоном в целях сокращения продолжительности перехода для летнего и зимнего периодов, разработан оптимальный вариант модели использования транспортного ПНС. Предложен оптимальный вариант транспортных грузопотоков с использованием трех переоборудованных АПЛ и предложен вариант организационной структуры транспортной кампании.

На данный момент на базе петербургского НИИ Арктики и Антарктики были проведены и успешно завершены макетные испытания специализированной атомной подводной лодки, предназначенной для перевозки руды и металлов РАО “Норильский никель” по Северному морскому пути.

Опыты показали, что модифицированная лодка способна колоть лед толщиной до 2 метров 15 сантиметров в морской воде и до полутора метров – в пресноводном устье Енисея. Грузоподъемность – до 12 тысяч тонн. Цена переоборудования лодки – около 80 миллионов долларов. Поэтому, принимая во внимание успех макетных испытаний, во главу угла будет все же поставлена экономическая эффективность проекта.

3.3. Ядерные установки в космосе

Когда человечество только делало свои первые шаги по просторам Вселенной, ни у кого не было сомнений, что пройдет совсем немного времени (лет 10–15, не более) и люди полетят к другим планетам. И понесут их в глубины космоса корабли, всю энергетику которых будут обеспечивать бортовые ядерные энергетические установки (ЯЭУ). Другой альтернативы в те годы просто не представляли.

Однако все сложилось иначе, и об использовании ядерной энергии в космосе чаще приходится писать историкам, а не космонавтам, которые могли бы эти самые ЯЭУ использовать уже вчера, сегодня и, тем более, завтра.

Вопрос об оснащении космических аппаратов (КА) надежными системами энергообеспечения встал перед конструкторами почти сразу после запусков первых искусственных спутников Земли (ИСЗ). Химические аккумуляторные батареи, применявшиеся в те годы, не могли удовлетворить стремительно растущие потребности, и волей-неволей пришлось заняться поиском альтернативных решений.

Проведенные специалистами исследования показали, что возможны два варианта решения возникшей проблемы.

Один из них предполагал применение для питания бортовой аппаратуры и служебных систем КА солнечных батарей (СБ). Этот вариант было достаточно просто реализовать в техническом плане, он был относительно дешев и весьма надежен при эксплуатации. Да и времени на то, чтобы воплотить задуманное в жизнь требовалось совсем немного. В этом направлении конструкторы и сосредоточили свои основные усилия, и, если перенестись в день сегодняшней, можно увидеть, что именно СБ остаются главным, а часто и единственным средством обеспечения энергией оборудования ИСЗ и космических кораблей (КК).

Другой вариант, который изучался специалистами, предусматривал использование ядерных источников энергии. В том, что такие идеи появились, нет ничего удивительного.

Во-первых, это действительно разумное решение, позволяющее в течение длительного времени обеспечивать работу аппаратуры КА. Правда, выгода эксплуатационная влекла за собой немало проблем технических. Но конструкторы посчитали, что их удастся достаточно быстро решить.

Во-вторых, надо вспомнить тот энтузиазм, часто переходивший в эйфорию, который царил в обществе тех лет. Тогда мы еще не знали, сколь опасным может быть “мирный атом”, и свято верили, что “совсем недалеко то время, когда он придет в каждый дом”.

Да, мы были довольно наивными в те годы. Но сколько интересных проектов благодаря этому родилось в те далекие уже годы: атомные самолеты, ракеты с атомными двигателями и т.д. и т.п. К сожалению, все они так и остаются нашим будущим.

Итак, создание ЯЭУ для ИСЗ и КК началось в нашей стране на рубеже 1950–1960-х годов. Приблизительно в то же время аналогичные работы были развернуты и в США, нашем основном конкуренте в развернувшейся космической гонке.

Первые устройства, созданные для нужд космической техники, использовали непосредственное преобразование тепловой энергии в электрическую на основе термоэлектрических и термоэмиссионных преобразователей. Подобные методы принципиально упрощали схему установок, исключали промежуточные этапы превращения энергии и позволяли создать компактные и легкие энергетические установки, что было важным в условиях жестких габаритно-весовых требований, предъявляемых к КА.

Первый опыт их применения в космосе датируется второй половиной 1965 г., когда были запущены два экспериментальных спутника

связи типа “Стрела-1”. Один из них, получивший официальное наименование “Космос-84”, стартовал с космодрома Байконур 3 сентября, а другой, названный “Космосом-90”, опять же с Байконура 18 сентября. На борту обоих КА были размещены радиоизотопные термоэлектрические генераторы (РИТЭГ) “Орион-1”, содержащие полоний-210. Вес генераторов составлял 14,8 кг, электрическая мощность 20 Вт, срок работы – 4 месяца.

Это был эксперимент, который прошел довольно успешно. Вместе с тем, несмотря на небольшие размеры, простоту и относительную безопасность в эксплуатации, широкого распространения РИТЭГ в космосе не получили. В первую очередь это было обусловлено тем, что для различных КА разрабатывались устройства, конструктивно отличавшиеся друг от друга применявшимися изотопами, термоэлектрическими материалами и рядом других параметров. Это существенно усложняло и удорожало процесс создания подобных установок. Если добавить, что они обладали низкой энергоемкостью, то станет понятным, почему их применение было ограничено.

В последующие годы велось создание РИТЭГ повышенной мощности и увеличенного ресурса, которые можно было бы использовать на луноходах и автоматических межпланетных станциях (АМС). К сожалению, нет достоверной информации обо всех отечественных КА, на борту которых находились РИТЭГ различных модификаций. Кроме уже упомянутых, “Космоса-84” и “Космоса-90”, радиоизотопные термоэлектрические генераторы были установлены на “Луноходе-1” и “Луноходе-2”, доставленных на поверхность нашего естественного спутника АМС “Луна-17” и АМС “Луна-21”, соответственно, еще одном “Луноходе”, разбившемся при аварийном старте 19 февраля 1969 г., на АМС типов “Венера”, “Марс”, “Вега”, “Фобос”, запущенных в период 1969–1996 гг.

Последние РИТЭГ (2 штуки, модель РИТЭГ “Ангел”) были установлены на борту АМС “Марс-8”, запущенной 16 ноября 1996 г. Ракетополет “Протон-К” успешно вывела аппарат на околоземную орбиту, но большего сделать не смогла – сутки АМС кружила вокруг Земли, а затем возвратилась на родную планету. Красная планета, являвшаяся целью миссии, так и не была покорена. Запуском “Марса-8” пока заканчивается история использования РИТЭГ в космосе. Не исключено, что через несколько лет о них вспомнят. Но произойдет это лишь в том случае, если удастся реализовать программу “Фобос-Грунт”, предусматривающую доставку на Землю образцов породы с поверхности спутника Марса – Фобоса.

В американской программе исследования Луны использовался комплекс научной аппаратуры для измерения магнитных полей, пыли,

солнечного ветра, ионных потоков и сейсмической активности. Комплекс питался электроэнергией от источника мощностью 74 Вт при напряжении 16 В, работавшего на изотопе плутоний-238. Срок службы – около двух лет. Для источника требовалось около 2,6 кг изотопа. Полная масса генератора составила 20,2 кг, в то же время масса генератора тех же параметров, работающего от традиционных аккумуляторных батарей, составляла бы примерно 1,5 тонны. Источник обеспечивал выработку электроэнергии при колебаниях температур на Луне от – 138 до +121 °С.

Кроме плутония-238, при работе ядерного реактора образуется ряд изотопов, пригодных для использования в качестве источников энергии в радиоизотопных генераторах. Эти изотопы производятся в ядерных реакторах в процессе поглощения нейтронов различными химическими элементами. Вот некоторые из них: кобальт-60 ; стронций-90 (период полураспада 28 лет); цезий-137 (период полураспада 30 лет); церий-144 (период полураспада 285 дней); полоний-210 (период полураспада 138 дней); кюрий-242 (период полураспада 162 дня); кюрий-244 (период полураспада 18 лет).

Как было сказано выше, применение РИТЭГ на КА было весьма ограничено. Более перспективным направлением стала разработка ЯЭУ с гомогенным реактором на быстрых нейтронах и термоэлектрическим генератором. Эти установки в современной литературе чаще всего именуется “Бук” или БЭС-5. Проведение работ по созданию БЭС-5 было определено постановлениями ЦК КПСС и Совета Министров СССР. Над ними трудилась большая кооперация разработчиков, которая включала в себя объединение “Красная Звезда”, Государственный научный центр “ФЭИ”, Научно-технический центр “Исток”, Российский научный центр “Курчатовский институт” и многие другие предприятия.

Первая эксплуатационная ЯЭУ БЭС-5 была установлена на ИСЗ “Космос-367”, запущенном 3 октября 1970 г. Она проработала всего 110 минут.

На спутнике “Космос-1932” была установлена доработанная установка с 6-месячным сроком функционирования и электрической мощностью в конце ресурса 2400 Вт. И хотя полет прошел нормально, от эксплуатации аппаратов с ЯЭУ было решено отказаться.

Основной причиной этого стало давление со стороны США и международных организаций, требовавших от Советского Союза “прекратить загрязнение космоса”. Но немаловажным фактором стали и сравнительно низкие технические характеристики ЯЭУ.

За все годы запусков в нашей стране КА с ЯЭУ БЭС-5 на орбиту было отправлено 32 установки. Одна из них не долетела до космоса, две

возвратились назад, а остальные до сего дня продолжают пребывать на высоте 700–800 км от Земли.

Параллельно с работами по созданию и доработке ЯЭУ БЭС-5 велась разработка целого спектра установок с мощностью от 10 до 500 и более кВт для выполнения широкого круга задач, среди которых были станция на Луне, экспедиция к Марсу, посещаемая космическая станция. К сожалению, они так и не вышли из области фантастики. В “железо” удалось воплотить только ЯЭУ “Топаз-1” (другое наименование “Тополь”) и “Топаз-2” (другое наименование “Енисей”), но лишь первый побывал в космосе.

Первая установка была запущена в космос 1 февраля 1987 г. и проработала в составе КА “Космос-1818” в течение 142 суток. При этом удалось убедиться в соответствии характеристик ЯЭУ в течение заданного техническими условиями срока эксплуатации. Следующая установка, установленная на борту КА “Космос-1867”, была выведена в космос 10 июля 1987 г. и проработала в течении 343 суток.

Прекращение работы ЯЭУ в обоих случаях было вызвано, в основном, окончанием запасов рабочего тела (цезия).

Схема работы термоэмиссионного преобразователя в принципиальном плане чрезвычайно проста. Он является в определенном смысле аналогом радиолампы (вакуумного диода), работающей в режиме генерации, а не усиления электрической мощности при подводе тепла. Применительно к термоэмиссионному реактору энергия преобразуется в электрогенерирующем элементе, в котором ядерное топливо (диоксид урана, обогащенный ^{235}U) размещено в сердечнике с оболочкой из тугоплавкого металла (молибдена, вольфрама), служащей катодом или эмиттером для электронов. Тепло, выделяющееся в реакции деления урана в реакторе, разогревает эмиттер до 1770–2070 К, в результате чего происходит эмиссия электронов. Попадая на анод (коллектор), электроны обладают достаточной энергией, чтобы во внешней замкнутой цепи между электродами (эмиттером и коллектором) произвести полезную работу во внешней нагрузке. Пары цезия, вводимые в межэлектродное пространство термоэмиссионного преобразователя, ионизируются. Образовавшиеся положительные ионы цезия компенсируют объемный отрицательный заряд эмиттированных электронов и тем самым обеспечивают перенос электрического тока и получение электроэнергии в реакторе-преобразователе.

Успехи России, достигнутые в создании космических ЯЭУ, до настоящего времени не превзойдены специалистами других стран. По оценкам иностранных специалистов, опережение Россией других стран,

работающих в этой области, составляет около 10–15 лет. Свидетельством мирового признания является получение Г.М. Грязновым и В.Я. Пупко в 1994 г. памятного знака к премии Шрайбера-Спенса “За выдающиеся достижения в области космической ядерной энергетики” на ежегодной конференции в Альбукерке (США). В последние годы усилия российских разработчиков были ориентированы главным образом на разработку проектов термоэмиссионных ЯЭУ “Топаз” второго поколения для перспективных энергетических потребностей космической техники с электрической мощностью от нескольких десятков до сотен киловатт и ресурсом до 7–10 лет, а также анализ возможностей схем космических ЯЭУ с вынесенными из активной зоны реактора термоэмиссионными преобразователями.

Первая и единственная американская ЯЭУ SNAP-10А с термоэлектрическим преобразованием электрической мощностью 0,5 кВт была выведена в космос в 1965 г.

В настоящее время Россия является единственной страной, имеющей утвержденную на правительственном уровне концепцию развития космической ядерной энергетики и программу работ по ее реализации. Принятая правительством Российской Федерации в феврале 1998 г. «Концепция развития ядерной энергетики» предусматривает создание научно-технического задела, обеспечивающего к 2010 году возможность разработки ядерных установок мощностью до 100 кВт, имеющих ресурс не менее 5–7 лет, и решения с их использованием широкого круга перспективных задач как в околоземном космосе, так и в межпланетном пространстве. В дальнейшем должны быть созданы ядерные энергетические установки для решения задач, требующих энергопотребления 500 кВт и более. Концепция предусматривает широкое сотрудничество Российской Федерации с зарубежными странами в области космической ядерной энергетики.

Предпосылками для нового этапа внедрения ядерной энергетики в космосе являются:

- рост электропотребления космических аппаратов (до десятков и сотен киловатт);
- рост массы космических аппаратов до уровня, в несколько раз превышающего грузоподъемность самых тяжелых носителей [до 10 и более тонн на геостационарной орбите (ГСО)];
- внедрение ТЭМ, обеспечивающих за счет одного источника энергии как доставку космического аппарата на рабочую орбиту, так и его последующее электроснабжение в течение всего срока активного существования;
- увеличение объема исследований в дальнем космосе;

- разработка двухрежимных ЯЭУ и бимодальных ЯДЭУ для работы в составе ТЭМ.

При использовании в составе ТЭМ в наибольшей степени проявляются такие достоинства ядерных установок, как:

- снижение удельной массы с ростом мощности;
- возможность форсирования мощности реактора;
- возможность обеспечения непрерывной работы двигательной установки космического аппарата на теневых участках без накопителей энергии;
- отсутствие необходимости в автономной системе ориентации энергоустановки космического аппарата;
- отсутствие деградации характеристик ядерного источника энергии в радиационных поясах Земли.

Транспортно-энергетические модули по сравнению с традиционными средствами межорбитальной транспортировки и электроснабжения космических аппаратов позволяет увеличить в 2–3 раза массу целевой аппаратуры космического аппарата и уровень ее энергообеспечения.

Возможны следующие два типа ядерных транспортно-энергетических модулей:

- на основе ЯЭУ и маршевой электроракетной двигательной установки (ЭРДУ);
- на основе бимодальных ЯЭДУ, в которых в одном реакторном блоке обеспечивается режим работы теплового ракетного двигателя с водородом в качестве рабочего тела и режим работы энергоустановки для питания целевой и служебной аппаратуры космического аппарата.

Перспективные космические задачи на ближайшие десятилетия следующие:

- | | |
|---------------------|--|
| Связь и телевидение | <ul style="list-style-type: none">• Спутниковые системы связи с высокой пропускной способностью• Глобальные системы связи с подвижными объектами• Высокопроизводительные глобальные информационные системы• Непосредственное телевидение, многоканальное телевидение высокой четкости |
| Задачи экологии | <ul style="list-style-type: none">• Захоронение радиоактивных отходов• Глобальный экологический мониторинг• Очистка околоземного пространства от антропогенного космического мусора |

Энергетика и производство в космосе	<ul style="list-style-type: none"> • Космическое производство • Дистанционное энергоснабжение космических аппаратов и производственных комплексов • Фундаментальные исследования, в т.ч. с помощью космического радиотелескопа • Исследование Земли из космоса
Научные задачи	<ul style="list-style-type: none"> • Исследование астероидов, комет и планет Солнечной системы • Транспортно-техническое обслуживание Лунной базы • Энергоснабжение Земли из космоса • Освещение локальных участков Земли • Добыча сырья из астероидов
Глобальные космические задачи	<ul style="list-style-type: none"> • Разрушение ядер зарождающихся тайфунов • Защита от астероидов и комет • Восстановление озонового слоя Земли • Вывод в космос опасных производств • Борьба с парниковым эффектом

Рассматривается проект реактора для фотонного двигателя, тепловая мощность 300 МВт, ресурс 50 лет, топливо – расплавленный плутоний.

Оксидное, карбидное и нитридное урановое топливо, используемое в космических энергетических реакторах и двигателях, разрабатывалось и испытывалось в течение последних 30 лет. Для космических ядерных ракет следующего поколения были предложены 4 вида топлива: диспергированное/композитное, керметное, с шаровой засыпкой, со структурой твердого раствора. Каждый из четырех видов топлива имеет свои преимущества и недостатки.

Диспергированное/композитное топливо представляет собой карбид урана, диспергированный в графитовых твэлах, через каналы которых проходит теплоноситель H_2 . Топливо выдержало испытания при температурах до 2550 К.

Керметное топливо состоит из UO_2 или UN , диспергированных в вольфраме. Керметы совместимы с H_2 , устойчивы к термическому удару, удерживают газообразные продукты деления. Вместе с тем реакторы с керметным топливом имеют низкую силу тяги (массу), температуру и удельный импульс.

В реакторах с шаровой засыпкой используют слой из сферических твэлов $(U, Zr)C$, находящихся внутри концентрических пористых спе-

ченных труб; через слой шаровых твэлов проходит H_2 . Потенциально реакторы с шаровой засыпкой обеспечивают высокую силу тяги (массу), удельную энергию и удельный импульс. Однако эти реакторы подвержены значительной потере топлива, большому выходу газообразных продуктов деления и чувствительны к блокированию потока теплоносителя.

Топливо со структурой твердого раствора представляет собой трубы и стержневые твэлы, изготовленные из твердого раствора $(U, Zr/Nb)C$. Имея длительный срок службы и высокую температуру, данный вид топлива труден в изготовлении, подвержен растрескиванию и выходу продуктов деления.

Спутник с ЯЭУ для осуществления глобальной связи должен был обеспечивать: связь всех видов Вооруженных Сил СССР с удаленными театрами военных действий, районами дислокации войск, командованием стран социалистического лагеря, с отдельными, в том числе подвижными, объектами вооруженных сил стратегического назначения (самолеты, корабли, подводные лодки, спутники специального назначения); связь центра с отдаленными районами страны и другими континентами; передачу и обмен программами телевидения и радиовещания внутри СССР и с зарубежными странами, а также использоваться для других нужд народного хозяйства.

Вес спутника на орбите 16 т. Длина – 20 м, диаметр 4 – 5 м. Время работы – 3 года. Электрическая мощность ЯЭУ – 600 кВт. Изучались три варианта космического комплекса с применением ЯРД:

- 1) трехступенчатый носитель на базе блоков А и Б основного варианта с III ступенью, имеющей ядерную двигательную установку;
- 2) трехступенчатый носитель с ЯРД на II и III ступенях и блоком А исходного варианта в качестве I ступени;
- 3) двухступенчатый носитель на базе блока А основного варианта со II ступенью, имеющей ядерную двигательную установку.

Проведенные исследования показали:

наиболее перспективным направлением повышения эффективности носителя Н-1 является создание на его базе двухступенчатых носителей с ядерными двигателями на II ступени, обеспечивающими резкое увеличение весов полезного груза, выводимого на орбиту ИСЗ (в 2–2,5 раза для ЯРД типа А и до 6–10 раз для ЯРД типа В);

при доставке груза на Луну применение ЯРД типа А могло обеспечить увеличение веса полезного груза на 75–90 % по сравнению с использованием ЖРД на O_2+H_2 , а применение ЯРД типа В – на 135–175 %.

Применение ЯРД позволяло организовать двухстороннюю транспортную связь с Луной, обеспечивая при одном пуске носителя с кисло-

родно-водородной III ступенью доставку на Луну полезных грузов, достигающих большого веса (до 10–12,5 т с использованием ЯРД типа А и до 18–24 т с использованием ЯРД типа В), с последующим возвращением значительных космических объектов (5 т) к Земле.

При осуществлении экспедиции на Марс использование в составе ракетных космических комплексов форсированных ЯРД типа А могло снизить суммарный вес, выводимый на орбиту ИСЗ, на 40–45 % по сравнению с применением кислородно-водородных ЖРД. Применение ЯРД типа В могло довести выигрыш в суммарном весе на орбите ИСЗ до 50–60 %.

Высокая удельная тяга ЯРД типа В позволяла обеспечить расширение допустимого диапазона дать старт к Марсу либо существенно сократить суммарное время проведения экспедиции при сравнительно небольших резервах стартового веса.

14 января 2004 г. президент США Д. Буш выступил с посланием Конгрессу: “Мы должны предпринять длительные экспедиции на Луну уже к 2015 г. для расширения сферы обитания и проведения там соответствующих работ в будущем”.

Разработана ядерно-энергетическая установка мощностью 200 кВт на основе реактора на быстрых нейтронах (RAPID-L), которая была ориентирована на эксплуатацию в условиях лунной базы. При этом любые неполадки в системе управления, ошибки оператора и вмешательство террористов в работу реактора приводят либо к стабилизации режима работы установки, либо к автоматическому останова реактора.

Применение ядерного ракетного двигателя принципиально нового типа позволит сократить время полета к Марсу до двух недель

Так считает израильский исследователь Югал Ронен (Yigal Ronen), физик-ядерщик из Университета имени Бен-Гурион, предлагающий использовать в качестве атомного топлива изотоп америций-242 (Am-242). Этот изотоп не очень широко распространен в природе, но способен дать необходимый эффект по сравнению с традиционными химическими и уже разработанными ядерными двигателями на другом ядерном топливе. Проводя эксперименты, Ронен выяснил, что деление ядерного ядра у Am-242 происходит даже тогда, когда он сформирован в тонкие пленки до 1 мм толщиной. Выделившаяся при делении атомных ядер энергия способна нагреть газ, например водород, который будет помещен между пластинами и будет являться ракетным топливом, до 250

тысяч градусов и позволит космическому аппарату развивать скорость до 80 км/с. По расчету Ронена такой двигатель будет потреблять около 375 грамм Am-242 в сутки и для полета на Марс будет достаточно нескольких килограммов ядерного топлива. Am-242 в земных условиях получается путем бомбардировки нейтронами другого изотопа Am-241 и пока еще довольно дорог в производстве, но производство достаточного его количества вполне достижимо. Ронен считает америций топливом будущего. Разрабатывая двигатель, Ронен не учитывал многие аспекты как технического, так и экологического характера. Например, можно ожидать сильного противодействия антиядерных активистов, категорически возражающих против любого использования двигателей на ядерном топливе для космических исследований. Но проект довольно интересен и хотелось бы, чтобы он был хотя бы опробован в обозримом будущем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов И.Л., Карлинский С.П. “Тайфун” меняет профессию// Судостроение. – 2001. № 2.
2. Военные корабли СССР и России 1945-1995 гг. – Якутск, 1994.
3. Доклад Белунны. 1994. – № 1.
4. Атомная подводная эпопея. – М., 1994.
5. Морской сборник 1995. № 1; 1994. № 4.
6. Атомная энергия. – М. 1994. Т. 76. Вып.1; 1993. Т. 74. Вып. 4; 1992. Т. 73. Вып. 1.
7. Отечественное военное кораблестроение в третьем столетии своей истории. – СПб., 1995.
8. Судостроение. 1990. № 9; 1991. № 1.
9. Copyright Bellona. Обновленная СД-версия 1997–09–28.
10. Судостроение. 1992. № 11–12.
11. Сообщение ТАСС // Газета «Правда». 26 марта 1971 г.
12. Грязнов Г.М., Пупко В.Я. «Топаз-1». Советская космическая ядерно-энергетическая установка // Природа. 1991. № 10. С. 29–36.
13. Грязнов Г.М., Ельцов А.И., Кузнецов В.А. и др. Создание и энергетические испытания термоэмиссионного реактора-преобразователя «Топаз» // Материалы 4 межд. конф. по мирному использованию атомной энергии. – Женева, 1971.

14. Грязнов Г.М., Жаботинский Е.Е., Никонов А.М. и др. Применение термоэмиссионных ЯЭУ реактором-преобразователем на тепловых нейтронах для межорбитальных перелетов космических аппаратов // Атомная энергия. – М., 1991. Т. 70. Вып. 4. С. 221–247.
15. Грязнов Г.М., Космические ядерно-энергетические установки. // Труды юбилейной конференции министерства Российской Федерации по атомной энергии «Ядерной технике и науки в России–50 лет». – Москва, 1996 С. 174–183.
16. Демянко Ю.Г., Конюхов Г. В., Коротеев А.С., Кузьмин Е.П., Павельев А.А . Ядерные ракетные двигатели/Под ред. академика А.С. Коротеева. – М.: 000 «Норма-Информ», 2002.
17. Демянко Ю.Г., Зайцев В.А., Лампо В.В., Терехов Е.П., Федотов Р.А. Стендовая база для натуральных испытаний ЯРД. Состояние и перспективы развития // Ракетные двигатели и энергетические установки / Серия IV/НИ-ИТП. – М., 1973.
18. Колганов В.Д., Сметанников В.П., Уласевич В.К., Дьяков Е.К. и др. Место реактора ИВГ-1 в перспективной программе создания ЯРД для марсианской экспедиции: // Доклад на третьей отраслевой конференции «Ядерная энергетика в космосе. Ядерные ракетные двигатели». – Подольск, 1993.
19. Колганов В. Д., Логачев О. Н., Сметанников В.П., Уласевич В.К. Ядерные ракетные двигатели: достижения и перспективы // Сборник докладов посвященный 50-летию НИКИЭТа. – М., 2002.
20. Коротеев А.С., Пришлецов А. Б. Космическая электроэнергетика сегодня и завтра // Авиапанорама. 2000. С. 72–73.
21. Акимов В. Н., Гафаров А.А., Коротеев А. С., Пришлецов А. Б. Ядерная энергетика в космонавтике XXI века // Полет. 2000. № 10. С. 3-11.
22. Андриюшин И.А., Чернышев А.К., Юдин Ю.А. Укрощение ядра: Страницы истории ядерного оружия и ядерной инфраструктуры СССР. – Саров, 2003.
23. Гудилин В.Е., Слабкий Л.И. Ракетно-космические системы: История. Развитие. Перспективы. – М., 1996.
24. Железняков А.Б. Взлетая, падала ракета. – СПб: «Система», 2003.
25. Кузнецов В.М. Российская атомная энергетика: Вчера, сегодня, завтра. Взгляд независимого эксперта. – М.: Изд-во «Голос-пресс», 2000.

26. Тарасенко М.В. Военные аспекты советской космонавтики. – М.: Агентство Российской печати – ТОО «Николь», 1992.
27. Богущ И.П., Грязно Г.М., Жаботинский Е.Е. и др. Космическая термоэмиссионная ЯЭУ по программе «Топаз». Принципы конструкции и режимы работы. – М.: Атомная энергия, 1991. Т. 70. Вып. 4. С. 211–214.
28. Иванов Е.А., Ионкин В.И., Раскач Ф.П. и др. Перспективы применения ядерного топлива на основе ^{233}U в КЯЭУ // Тезисы докладов Международного семинара «Космическая энергетика XXI века (Ядерный аспект)». – Обнинск-Подольск, 17–20 ноября 1998. С. 54–55.
29. Атомная энергия. – М., 2000. Т. 89. Вып. 1.
30. Р. Блесард Ядерные двигатели для самолетов и ракет. – М.: Изд-во МО, 1967.

Глава 4. ЯДЕРНЫЕ ВЗРЫВЫ В МИРНЫХ ЦЕЛЯХ

Что же такое взрыв? Впервые определение этому понятию в России дал в 1848 г. наш выдающийся ученый М. В. Ломоносов в работе «О природе и рождении селитры»: «Взрыв – это очень быстрое выделение большого количества энергии и большого объема газов». Что означает «очень быстрое» выделение энергии, тем более что «быстрота» – понятие относительное? Это значит, что выделение энергии при взрыве является более быстрым, чем другие формы выделения энергии в сходных условиях (например, при горении). Чтобы выделившаяся энергия могла осуществить механическое действие, нужно рабочее тело, то есть вещество, которое могло бы передать окружающей среде достаточно большое давление. Этим рабочим телом являются газообразные продукты взрыва, которые, будучи сильно нагретыми и сжатыми, расширяются и производят механическую работу. Скорость распространения процесса взрыва, называемого детонацией, весьма велика и достигает 9 км/с.

История применения взрыва берет свое начало в X в., когда был изготовлен черный порох (смесь мелко раздробленного угля и селитры). Если его поместить в замкнутый объем (в ствол пушки, грунт и т. п.), происходит быстрое его сгорание, напоминающее взрыв. Если же в сосуде с порохом имеется отверстие, порох горит сравнительно медленно, а образующиеся при этом газы вырываются из отверстия в виде струи, представляя собой простейший вариант реактивного двигателя.

Уже в 1552 г. при осаде Казани войсками Ивана Грозного была взорвана одна из крупнейших башен Казанского кремля. А во время царствования Петра I были созданы приборы для определения удельной энергии взрыва черного пороха. Кстати, именно Петру I принадлежит одно из первых предложений по использованию взрыва в мирных целях, а именно автоматическое тушение пожаров: внутри помещения, охраняемого от огня, устанавливали бочку с водой, внутри которой размещался заряд из пороха. В различные части помещения от заряда прокладывали огнепроводящие шнуры. При пожаре они подрывали заряд в бочке с водой, которая, выливаясь, тушила пожар.

Развитие теории взрывных явлений связано с именами таких выдающихся ученых, как Л. Эйлер, Д. Чепмен, Э. Жуге, В. Михельсон, Я. Зельдович, Ю. Харитон, М. Лаврентьев, К. Станюкович, А. Седов, Г. Петровский, Ф. Баум и др.

Во время ядерного взрыва выделяется огромная энергия, поэтому с самого начала работ над атомной бомбой ученые-атомщики стали думать об ее использовании в мирных целях. Так, каждый килограмм термоядерного топлива способен в составе термоядерного устройства вы-

делить энергию, эквивалентную взрыву 30 тыс. т взрывчатого вещества. Заряд такой мощности стоит около миллиона долларов. При дальнейшем увеличении мощности ядерного устройства его стоимость растет незначительно. Термоядерный взрыв сегодня – это самый дорогой и в то же время самый дешевый источник энергии на Земле.

Конечно, существуют возражения против технического применения ядерных взрывов. Они достаточно серьезны и научно обоснованы. И связаны с опасностью радиоактивного заражения окружающей среды и большим энерговыделением при взрыве.

Требования к мирным ядерным зарядам существенно отличаются от требований к боевым зарядам. С одной стороны, эти требования мягче, так как нет жестких условий на массу ядерного заряда, форму, габариты, срок службы, а с другой – некоторые требования более высокие, например по допустимым количествам образующихся при взрыве осколков деления, остающихся несгоревшими плутонию и тритию, химическому составу конструкционных материалов и т. п. В боевых термоядерных зарядах примерно половина энергии выделяется в реакциях деления ядер урана и плутония с образованием соответствующего количества радиоактивных осколков деления, что и является главным препятствием для использования таких зарядов в промышленности. Делать ядерный заряд, при взрыве которого будут полностью отсутствовать осколки деления, пока никто не умеет. Чистыми мирными термоядерными зарядами считают заряды, в которых основная доля энергии выделяется в термоядерных реакциях (>90 %). Степенью чистоты такого заряда называют выраженное в процентах отношение энергии, полученной в реакциях синтеза, к полной энергии взрыва.

Огромная работа больших коллективов математиков, физиков, конструкторов, экспериментаторов позволила создать чистые промышленные заряды, приступить к разработке проектов по их мирному применению и осуществить некоторые эксперименты. Не менее важной проблемой для промышленного использования ядерных взрывов является исследование их воздействия на окружающую среду.

При ядерном взрыве за миллионные доли секунды выделяется огромная энергия. При подземном взрыве амплитуда ударной волны в горной породе столь велика, что даже на расстоянии нескольких сот метров от центра взрыва происходит интенсивное дробление горных пород, а при выходе ударной волны на поверхность земли откалываются плиты шириной до нескольких километров. Давление вблизи ядерного взрыва достигает давления внутри звезд.

В 1957–1958 годах в США была сформирована обширная программа использования ядерных взрывов в промышленных целях под назва-

нием «Project Plowshare» (программа «Плуг»). Планы были грандиозные:

- прокладка еще одного канала через Панамский перешеек;
- строительство огромной гавани на побережье Аляски и т. д.

США провели 20 экспериментальных подземных ядерных взрывов, в том числе 7 испытаний опытных промышленных ядерных зарядов (ОПЗ).

Хронология первых испытаний представлена в табл. 1.

Таблица 1

ПЕРВЫЕ МИРНЫЕ ЯДЕРНЫЕ ВЗРЫВЫ В США И СССР				
Страна, название эксперимента, место проведения	Дата проведения	Мощность, кт	Условия проведения	Результат
США, «Gnome», Карсбад, Нью-Мексико	10 декабря 1961 г.	3	Скважина, 360 м	Камуфлетная полость в соляном массиве, вскрыта для исследований
США, «Sedan», Невадский полигон	6 июля 1962 г.	104	Скважина, 193 м	Огромная воронка, сухая, глубина ~ 98 м
США, «Anacostia», Невадский полигон г.	27 ноября 1962 г.	~5	Скважина, 228 м	Отработка ОПЗ
США, «Kaweach», Невадский полигон	21 февраля 1963 г.	~12	Скважина, 227 м	Отработка ОПЗ
США, «Tornillo», Невадский полигон	11 октября 1963 г.	~5	Скважина, 149 м	Отработка ОПЗ
США, «KlicKita», Невадский полигон	20 февраля 1964 г.	20-200	Скважина, 492 м	Отработка ОПЗ
США, «Ace», Невадский полигон	11 июня 1964 г.	<20	Скважина, 263 м	Отработка ОПЗ
США, «Dub», Невадский полигон	30 июня 1964 г.	<20	Скважина, 258 м	Отработка ОПЗ
США, «Pug», Невадский полигон	9 октября 1964 г.	38	Скважина, 404 м	Наработка изотопов
СССР, «Б», Новоземельский полигон	25 октября 1964 г.	0,001–20	Штольня	Отработка ОПЗ
США, «Handcar», Невадский полигон	06 ноября 1964 г.	12	Скважина, 403 м	Изучение удержания продуктов взрыва
СССР, «3-5», Семипалатинский полигон	16 ноября 1964 г.	20-150	Штольня	Отработка ОПЗ
США, «Salku», Невадский полигон	18 декабря 1964 г.	0,092	Скважина, 27,5 м	Образование навала породы
СССР, «Чаган», Семипалатинский полигон	15 января 1965 г.	140	Скважина, 178 м	Огромная воронка-водоем, глубина ~100 м
СССР, «Буган-1,2», Башкирская АССР, Грачевское нефтерождение	30 марта 1965 г.	2x2,3	Скважина, 1341и 1375 м	Интенсификация добычи нефти
США, «Palanquin», Невадский полигон	14 апреля 1965 г.	4,3	Скважина, 85 м	Эксперимент на выброс

Продолжение табл. 1

Страна, название эксперимента, место проведения	Дата проведения	Мощность, кт	Условия проведения	Результат
СССР, «Буган-3», Башкирская АССР, Грачевское нефтерождение	10 июня 1965 г.	7,6	Скважина, 1350 м	Интенсификация добычи нефти

Одно из первых направлений обширной советской Программы подземных ядерных взрывов в промышленных целях было связано с решением такой важной проблемы, как обеспечение водой засушливых территорий южных регионов бывшего СССР – районов ряда областей Казахстана, реки которых отличались непостоянным стоком, что существенно затрудняло ведение сельскохозяйственного производства.

Первый опытно-промышленный эксперимент в интересах получения информации о возможности использования подземных ядерных взрывов для образования воронок-водохранилищ был проведен 15 января 1965 г. на территории Семипалатинского испытательного полигона в урочище Балапан, в месте слияния рек Чаган и Ащи-Су. Этот взрыв положил начало всей комплексной программе подземных ядерных взрывов в мирных целях, завершившейся 6 сентября 1988 г.

Как известно программа была сформирована по нескольким направлениям:

- глубинное сейсмическое зондирование земной коры для выявления геологических структур, перспективных для поиска полезных ископаемых (проведено 39 взрывов);
- создание подземных емкостей и хранилищ (42);
- интенсификация добычи нефти и газа (21);
- экскавационные эксперименты (6);
- ликвидация аварийных газовых фонтанов (5);
- образование провальных воронок (3);
- захоронение жидких токсичных отходов (2);
- дробление руды (2);
- предупреждение внезапных выбросов угольной пыли и метана (1);
- создание плотины-хвостохранилища путем рыхления породы (1).

Всего по программе мирного применения подземных ядерных взрывов на территории Советского Союза было проведено 124 эксперимента. Из них 39 – в Казахстане (причем 7 – на Семипалатинском поли-

гоне), по 2 эксперимента на Украине и в Узбекистане, 1 – в Туркмении. Остальные эксперименты (80) проводились на территории Российской Федерации.

Результаты по каждому из 124 экспериментов (8 из них являлись групповыми, когда подрывалось по 2–3 ядерных заряда) еще ждут своей публикации. Отметим, что оценка технико-экономической эффективности экспериментов была выполнена лишь для тех направлений работ с помощью подземных ядерных взрывов, которые приобрели характер промышленных технологий. Это относится к глубинному сейсмическому зондированию, созданию подземных хранилищ, ликвидации аварийных газовых фонтанов, захоронению вредных промышленных стоков в глубокие подземные горизонты, поглощающая способность которых была увеличена с помощью ядерных взрывов, и в некоторой степени – к экспериментам по интенсификации добычи нефти. Можно утверждать, что обширная программа из 124 экспериментов по применению подземных ядерных взрывов в мирных целях, которая была реализована в Советском Союзе в течение 23 лет, выявила, по крайней мере в условиях нашей страны, несколько перспективных направлений. Их высокая результативность не вызывает сомнений. К числу таких направлений в первую очередь следует отнести глубинное сейсмическое зондирование, создание подземных емкостей и хранилищ, а также экскавационные эксперименты. А теперь рассмотрим некоторые направления более подробно.

Наибольшее количество ядерных взрывов в мирных целях (39) приходится на программу **глубинного сейсмического зондирования**. В ее рамках было отработано 14 геофизических профилей (общая протяженность – 70 тыс. км), которые охватили большую площадь Сибири, Казахстана и даже часть европейской территории России. Такой размах работ объясняется тем фактом, что к началу их проведения геофизический метод глубинного сейсмического зондирования с использованием химической взрывчатки уже был отработан, широко известен и имел достаточно строгое обоснование.

Применение подземных ядерных взрывов в качестве мощных и компактных (практически точечных) источников сейсмического сигнала резко увеличивало производительность подобных работ, существенно ускоряя и удешевляя их. В самом деле, сейсмическая информация от каждого ядерного взрыва на профиле регистрировалась сейсмоприемниками, которые устанавливались на протяжении всего профиля с определенным интервалом друг от друга и дистанционно включались на момент работы. Таким образом, тысячекилометровые геофизические профили оказалось возможным отрабатывать в результате всего двух, трех

или четырех подземных ядерных взрывов. С 1971 по 1988 гг. «Комплексная программа Мингео» была выполнена (хотя и не полностью) с помощью 39 ядерных взрывов путем прохождения 14 региональных геофизических профилей общей протяженностью более 70 тыс. км. Эти профили покрыли огромные и, в основном, геологически недостаточно изученные территории СССР – Север европейской части страны, Среднюю Азию и регионы Западной и Восточной Сибири.

Результаты глубинного сейсмического зондирования подробно освещались в отчетах по каждому отработанному профилю. Они приводились в официальных докладах на правительственном уровне, а также в ходе парламентских слушаний в Госдуме Российской Федерации в 1997 г. В статье министр геологии СССР А. К. Козловский писал, что новая технология может «содействовать ускорению развития работ по геологическому изучению территории страны, увеличению разведанных запасов минерально-сырьевых ресурсов, т. к. позволяет оценить перспективы основных регионов страны на различные виды ископаемых, определить оптимальное направление поисковых и геологоразведочных работ».

На основе выполненных работ были составлены геолого-геофизические разрезы вдоль всех пройденных геотраверс и подготовлен комплект геолого-геофизических карт, характеризующих глубинное строение недр вплоть до фундамента осадочного чехла и границы Мохоровичича. Анализ полученных материалов позволил составить схему рельефа поверхности фундамента и подошвы промежуточного комплекса пород на всей исследованной территории. Было уточнено положение рифтовых структур, контролирующих перспективные области углеводородосодержания, и произведено тектоническое районирование исследованной территории. По мнению руководителей тогдашнего Министерства геологии СССР, выполненная программа исследований не имеет аналогов в мире и по своему научному и практическому значению вполне сопоставима с космической программой.

Полученный огромный объем сейсмической информации образовал своеобразный фонд для построения геологических разрезов, выявления перспективных площадей на нефть, газ и другие полезные ископаемые, стал основой для рекомендаций по целевому разведочному бурению. Эти эксперименты подтвердили, в частности, существование около 20 газовых и газоконденсатных месторождений.

Достоинством метода глубинного сейсмического зондирования с применением подземных ядерных взрывов являлось и то, что сами взрывы (их мощность составляла от 2,3 до 22 кт) выполнялись в безлюдных районах страны и на большой глубине (от 400 до 1000 м). Эф-

фективность глубинного сейсмического зондирования, по оценке геологов, составила (в ценах 1984 г.) около 180 млн руб.

Одной из самых результативных технологий по использованию подземных ядерных взрывов в мирных целях стало создание в СССР **искусственных полостей** в массивах каменной соли и **емкостей** в других породах.

Интенсивное развитие газовой нефтяной, химической и нефтеперерабатывающей промышленности потребовало расширения в стране резервуарного парка. Недостаток емкостей особенно остро сказался в 60-е годы, когда началось освоение крупных газоконденсатных месторождений. Резервуарные парки необходимо было создавать непосредственно на промыслах, вблизи газопроводов, промышленных и гражданских объектов.

Существующие традиционные способы строительства резервуаров не позволяли быстро удовлетворять растущий спрос на емкости высокого давления. Строительство наземных стальных резервуаров требовало большого количества металла при высокой стоимости строительно-монтажных работ, связанных с необходимостью отвода больших площадей для их размещения и дорогостоящими мероприятиями по обеспечению пожаро- и взрывобезопасности. Шахтный способ создания подземных емкостей требует значительных капитальных затрат и времени для их сооружения. Метод размыва камер в отложениях каменной соли имеет ограниченные возможности из-за большой продолжительности процесса сооружения и необходимости перевода больших объемов пресной воды в биологически вредные рассолы, которые подлежат захоронению.

Метод создания подземных емкостей в отложениях каменной соли с помощью подземных ядерных взрывов позволяет иметь на глубинах до 1000 м устойчивые полости объемом более 60 тыс. кубометров с меньшими затратами и в сравнительно короткие сроки с обеспечением сейсмической и экологической безопасности.

Благодаря новому методу был обеспечен своевременный пуск Астраханского газохимического комплекса за счет использования 9 резервуаров для складирования газоконденсатной смеси с целью разгрузки технологических линий для ускоренного получения серы, товарного газа и горючего.

В эксплуатацию были введены также четыре емкости на Карачаганакском газоконденсатном комплексе с использованием их в технологических целях для хранения конденсата и частичной сепарации природного газа.

Созданные в Советском Союзе в каменной соли подземные емкости вполне пригодны в качестве резервуаров для хранения нефти и газа, а также для захоронения вредных химических веществ и высокорadioактивных жидких отходов. Два резервуара, созданные под Оренбургом, эксплуатируются в течение многих лет в качестве хранилищ газоконденсата. Это позволило предотвратить безвозвратные потери свыше двух миллионов тонн этого ценного сырья.

Только на площадке «Галит» было создано 9 полостей общим объемом примерно 1200 тыс. кубометров. Пять из них были залиты водой во время проведения исследовательских работ, а четыре другие общим объемом около 600 тыс. кубометров, образованные на глубине до 1000 м, остаются сухими и устойчивыми, то есть хорошо сохраняются. Еще шесть маломощных взрывов в емкости А-II начиная с 25 апреля 1975 г. были осуществлены для отработки методики извлечения продуктов взрывов.

Еще одним направлением использования ядерных взрывных технологий являлось **подземное захоронение промышленных стоков** через укрупненные нагнетательные скважины. Прототипом данной технологии является захоронение промстоков, трудно поддающихся современным способам очистки, через обычные буровые скважины. Этот способ в последние годы достаточно широко используется в нашей стране и за рубежом. Однако он обладает существенными недостатками, которые значительно ограничивают его технологические возможности: низкая приемистость скважин, высокая чувствительность к содержанию взвешенных частиц в промстоках, невозможность захоронения промстоков, химически несовместимых с пластовыми водами, и др.

Сущность новой технологии заключается в использовании подземных ядерных взрывов для обработки пласта-коллектора и в подборе эффективного режима закачки промстоков в зону взрыва. Разработанная технология внедрена и успешно реализуется на объектах:

- «Кама-2» для захоронения промышленных стоков Стерлитамакского ОАО «Сода» (с 1976 г.);
- «Кама-1» для захоронения промышленных стоков ОАО «Салаватнефтеоргсинтез» (с 1982 г.).

Всего на объекте «Кама-2» захоронено свыше 30 млн кубометров промстоков, а на объекте «Кама-1» – около 1,5 млн кубометров, что в соответствии с типовой методикой определения эффективности осуществления природоохранных мероприятий позволило предотвратить за счет захоронения промстоков нанесение ущерба окружающей среде на объекте «Кама-2» на сумму 84 млн р. и на объекте «Кама-1» – 150 млн р.

при капитальных затратах на сооружение объектов, соответственно, 10 и 9 млн р. (в ценах 1984 г.).

Как показывает практика нефтедобычи, из хорошо проницаемых продуктивных пластов существующими традиционными способами извлекается только около 40 % содержащейся в них нефти, а из низкопроницаемых пластов – 10, максимум 15 %.

Интенсификация добычи нефти и газа. Одним из основных способов повышения коэффициента извлечения нефти, применяемых в нефтяной промышленности, является использование различных модификаций заводнения нефтенасыщенных пластов. В последнее время применяется закачка углеводородного газа под высоким давлением. Таким методом осуществляется вытеснение нефти из пласта к забоям добывающих скважин.

Используются также тепловые и физико-химические способы воздействия на залежи с тяжелой и высоковязкой нефтью. Но подобные методы успешно применяются только при разработке таких месторождений, залежи нефти в которых приурочены к коллекторам с высокими фильтрационными свойствами. Однако существует немало месторождений, где нефть сосредоточена в низкопроницаемых коллекторах или в изолированных продуктивных пластах и линзах, отделенных друг от друга непроницаемыми перегородками. Продавить нефть через них с помощью воды, пара или газа практически невозможно. Ставить же буровую на каждую линзу или изолированный пласт экономически нецелесообразно. По этой причине значительное количество нефтяных месторождений вообще не вводится в промышленную разработку.

Идея воспользоваться мощным воздействием на нефтяное месторождение путем использования подземного ядерного взрыва сразу показалась многообещающей. Естественно было ожидать, что в результате такого взрыва непроницаемые перегородки между отдельными изолированными пластами и линзами нарушатся и что в нефтеносном пласте, наряду с большой зоной раздробленной породы, возникнет еще и обширная по объему область микротрещин. Все это должно привести к улучшению фильтрационных свойств среды и одновременно к снижению вязкости нефти за счет теплового воздействия взрыва как на массив, так и на саму нефть.

Закачивая после этого в пласт воду, пар или газ с улучшившимися условиями для вытеснения нефти к забоям эксплуатационных скважин, можно было рассчитывать, что отныне станет реальностью не только эффективная добыча нефти из разведанных низкопроницаемых коллекторов, но и отбор таких тяжелых и высоковязких ее форм, которые прежде вообще не поддавались извлечению. Ожидалось также, что столь

мощное, комплексное воздействие на нефтяное месторождение с помощью подземного ядерного взрыва с последующей закачкой в пласт воды, газа или пара интенсифицирует добычу нефти и существенно увеличит коэффициент ее извлечения из продуктивного пласта. А ведь дополнительный отбор нефти из пласта новым способом на уже разрабатываемых или отработанных и обустроенных месторождениях даже на 5–10 % оказался бы в масштабах всей страны равноценным вводу в эксплуатацию новых месторождений и позволил бы значительно сократить капитальные затраты на обустройство новых месторождений в труднодоступных районах страны.

Для опробования новой идеи комплексного воздействия на нефтяные пласты были проведены подземные ядерные взрывы на четырех нефтяных месторождениях, различающихся типом и составом коллектора, выработанностью залежей и системой их разработки.

Первые три мирных подземных ядерных взрыва были проведены с этой целью в 1965 г. на Грачевском нефтяном месторождении (Башкортостан), приуроченном к рифовому массиву. Оно находилось в эксплуатации с 1958 г. без поддержания пластового давления. К тому времени из месторождения было добыто уже 2080 тыс. т нефти, то есть более половины из так называемых установленных извлекаемых запасов в 3980 тыс. т. Данная величина была утверждена для Грачевского месторождения Центральной комиссией Миннефтепрома по запасам и составляла 27,2 % от начального геологического ресурса месторождения. При этом за время эксплуатации к 1965 г. пластовое давление, как оказалось, снизилось с 14,7 до 4,4 МПа (мегапаскаль). Спустя 15 лет, в 1980 г., для подготовки этого месторождения под закачку в пласт газа высокого давления было проведено еще два подземных ядерных взрыва. К тому времени пластовое давление снизилось до 1,4 МПа, а из залежи уже было добыто 3300 тыс. т нефти, что составило около 22,5 % от начальных геологических запасов месторождения. Иначе говоря, при утвержденном коэффициенте нефтеотдачи, равном 27,2 %, оставшиеся извлекаемые запасы составляли всего 680 тыс. т.

В 1982 г. для оценки влияния ядерных взрывов на эффективность разработки Грачевского месторождения была создана специальная комиссия Миннефтепрома. В ее состав вошли ведущие специалисты нефтяной промышленности, Минсредмаша и Минвуза СССР. Согласно заключению комиссии, эксперимент, проведенный в 1965 г., показал, что:

- 1) существует принципиальная возможность и эффективность проведения ядерных взрывов на действующих промыслах;
- 2) суммарная дополнительная добыча нефти за счет использования подземных ядерных взрывов, определенная различными способами, со-

ставила 150–300 тыс. т, то есть 5–10 % от суммарной добычи нефти с начала разработки и 12–24 % – с момента проведения ядерных взрывов;

3) воздействием взрывов было охвачено 42,5 % площади месторождения, где образовалась зона улучшенной проводимости. По 15 из 40 пробуренных добывающих скважин производительность заметно увеличилась и почти в три раза замедлился темп естественного падения добычи нефти. В целом по залежам замедлился темп падения пластового давления.

Для более полного вытеснения нефти из пласта и опробования технологии комплексного воздействия на залежь в 1985 г. была начата закачка в пласт газа под высоким давлением. Перед этим, используя терминологию газовиков и нефтяников, в пласт было закачано 370 тыс. т «широкой фракции легких углеводородов». Суммарный объем закачанного в пласт газа составил 750 млн кубометров. При этом месячная добыча нефти в целом по залежи увеличилась с 0,8–1,0 тыс. до 5,2 тыс. т, а средний дебит одной скважины возрос с 0,8 т в сутки до 4,8 т. По некоторым скважинам, находящимся в зоне влияния взрывов, среднесуточный дебит нефти увеличился до 30–45 т. Одновременно среднее пластовое давление в залежи возросло с 1,4 до 4,0 МПа. В результате коэффициент извлечения нефти достиг более 40 % (вместо утвержденного 27,2 %). Разработка месторождения продолжается до сих пор.

На другом объекте, Осинском нефтяном месторождении в Пермской области, приуроченном к неоднородным карбонатным коллекторам, была опробована технология комплексного воздействия на залежь в условиях внутриконтурного заводнения. На четвертом году эксплуатации месторождения, в 1969 г., были проведены два подземных ядерных взрыва.

Эти взрывы осуществлены в водонасыщенной части разреза на несколько десятков метров ниже нефтяной залежи. По заключению комиссии Миннефтепрома, данному в 1987 г., коэффициент продуктивности по семи добывающим скважинам, расположенным на опытном участке площадью в 200 га, увеличился за счет комплексного воздействия на пласт в среднем на 50 %. Добычи нефти по этим скважинам увеличились с 32 до 48 кубометров в сутки. Дополнительная добыча нефти на опытном участке за счет комплексного воздействия оценивается в 300–500 тыс. т. На третьем, Средне-Балыкском нефтяном месторождении в Тюменской области, разработка которого осуществляется с закачкой в пласт воды, подземный ядерный взрыв был осуществлен в 1985 г.

Проведенные исследования показали, что на данном месторождении положительное воздействие ядерного взрыва распространилось и на вышезалегающий продуктивный пласт. Суммарная дополнительная до-

быча нефти за 9 месяцев из основной залежи, в которой проводился взрыв, и вышезалегающего пласта составила, по заключению специалистов Московского института нефтехимической и газовой промышленности им. И. М. Губкина, около 19 тыс. т. Дебиты нефти из скважин, расположенных на опытном участке, возросли и увеличилась нефтеотдача продуктивных песчаных пластов. По 6 скважинам коэффициент продуктивности увеличился на 12–30 %. Воздействием взрыва было охвачено около 300 га.

Однако дальнейшие опытно-промышленные работы на этом месторождении с намечавшейся новой серией подземных взрывов и с последующей закачкой воды через восстановленные скважины так и не были претворены в жизнь по ряду организационно-технических причин. Четвертое, Гежское нефтяное месторождение в Пермской области, приурочено к мощному карбонатному резервуару, для которого характерно линзовидное строение и переслаивание плотных и проницаемых пластов. Коллекторы, содержащие нефть, группируются в отдельные проницаемые зоны, неравномерно распределенные как по разрезу, так и по площади месторождения. Для того, чтобы на Гежском месторождении можно было эффективно применить такие традиционные способы, как закачка в пласт воды, пара или газа, необходимо было искусственно создать каналы, соединяющие эти зоны в единую гидродинамическую систему. Эта задача возлагалась на пять подземных ядерных взрывов одинаковой мощности (по 3,2 кт), которые параллельно с этим должны были создать широко разветвленную сеть микротрещиноватости. Взрывы были проведены в период с 1981 по 1987 гг. В проекте в качестве вытесняющего агента (после взрывов) был предложен газ высокого давления, который должен был закачиваться в сводовую часть залежи, а отбор нефти предполагалось производить из нижней части залежи. Согласно проведенным специалистами Миннефтепрома расчетам, за счет такого комплексного воздействия на залежь предполагалось добыть дополнительно более 5 млн т нефти. При этом коэффициент извлечения нефти мог возрасти с 0,062 до 0,22. Закачку газа на этом месторождении планировалось начать в 1993 г., но данная программа так и не была осуществлена. По заключению специалистов ВНИИнефть, суммарная дополнительная добыча нефти за счет проведенных подземных ядерных взрывов только по трем наиболее высокодебитным скважинам на Гежском нефтяном месторождении превышает 37 тыс. т, что составляет 16 % от общей добычи месторождения.

Анализ итогов опытно-промышленных работ, проведенных на нефтяных месторождениях, показал, что подземные ядерные взрывы действительно могут успешно применяться в комплексе с обычными метода-

ми воздействия на пласт при разработке залежей нефти, приуроченных к низкопроницаемым коллекторам, из которых обычными методами нефть не извлекается. Этот метод эффективен также для разработки залежей нефти с тяжелыми и высоковязкими ее формами, для вовлечения в повторную разработку полностью обводненных нефтяных залежей, эксплуатация которых была уже завершена. Здесь положительный эффект достигается за счет создания условий для вертикальной, внутрирезервуарной миграции нефти, что способствует образованию как бы новой вторичной залежи, разработка которой может быть продолжена существующей сеткой скважин.

Например, в 70–80-х годах прошлого века затраты на проведение поисковых и разведочных работ составили 3 982 087 рублей, а на каротаж, являющийся методом ядерной физики, – 13 270 рублей.

Угольные пласты в вечной мерзлоте (Нерчуганское месторождение), угли переходные от тощих к антрацитам (Донбасс) обычно не выделяются, и тут ядерная физика приходит на помощь промышленности. Мирные ядерные взрывы помогают при бурении скважин для добычи нефти и газа, залегающих в глубоких слоях.

С помощью ядерных взрывов в нашей стране успешно проводили геофизическую и сейсморазведку, повысили быстроту добычи нефти и газа, а также построили в толще соляных месторождений огромные сферические емкости для их хранения.

Слежавшись в недрах земли миллионы лет, нефть имеет свойство густеть. Самые мощные насосы здесь бессильны. Так, 30–40 % нефти осталось бы в недрах земли. С помощью мирного ядерного взрыва слежавшаяся нефть при помощи мощнейшей ударной волны получила встряску, пласты земли при этом сжались и повысили давление в нефтяном месторождении, в итоге нефть поддалась откачке. Применяя ядерные взрывы для встряски загустевшей нефти, добились фонтанирования двух скважин в Пермской области.

Мирные взрывы успешно использовали и на Кольском полуострове в апатитовых рудниках для дробления руды.

Четверть века назад ученые получили задание исследовать возможность дегазации угольных пластов, в которых содержался высокий процент растворенного метана: при некоторых условиях он начинает быстро испаряться и скапливаться в свободных местах угольного месторождения, т. е. в угольных шахтах, что создает угрозу жизни шахтеров. В шахтах украинского города Енакиево (трест «Орджоникидзеуголь») в год погибало до 100 человек от выбросов метана. Применив маломощный ядерный взрыв и встряхнув пласты угля, атомщики заста-

вили метан уйти, тем самым предотвратив гибель сотен шахтеров. Шахта была застрахована на многие годы от выбросов.

Наконец, подземные ядерные взрывы могут быть применены при разработке битуминозно-глинистых отложений баженовской свиты, запасы нефти в которых на территории Западной Сибири исчисляются сотнями миллионов тонн. Обычные условия эксплуатации таких месторождений характеризуются крайне низким коэффициентом нефтеотдачи, и ни один из существующих в настоящее время способов не дает надежного положительного эффекта при разработке подобных отложений.

Дальнейшее изучение процессов, происходящих в продуктивном пласте после ядерного стимулирования, не только имеет большое практическое, но и сохраняет научное значение. Оно позволяет заложить основы для обоснования использования обычных взрывчатых веществ при комплексной разработке различных типов нефтяных месторождений.

В этом случае вместо ядерного взрыва предполагается одновременно производить взрывы обычных взрывчатых веществ сразу в нескольких добывающих скважинах, расположенных по специальной сетке.

Большие надежды в советской программе мирного применения подземных ядерных взрывов возлагались на использование их для **создания искусственных водоемов, плотин и прокладки каналов**. С этой целью, например, на реке Чаган был проведен специальный эксперимент. За счет перекрытия русла реки насыпной плотиной было создано искусственное водохранилище в виде двух водоемов: внутреннего (образовалась воронка выброса глубиной около 90 м, средним диаметром по уровню первоначальной поверхности около 400 м, высотой навала, окружающего воронку, около 20 м и объемом около 7 млн кубометров) и внешнего, в полтора раза большего по объему.

Мощность взрыва составила 140 кт. Водоем, получивший название Атом-Куль (Атомное озеро), существует до сих пор. Вода в нем пригодна для питья, более того, в нем прижилась и успешно размножается рыба, которую запустили в озеро из других природных водоемов.

В качестве другого примера можно указать на одновременный взрыв трех ядерных зарядов малой мощности, в результате которого была образована траншея канального профиля объемом 77 тыс. кубометров, длиной 142 м и шириной 61–69 м. Высота земляного навала по бортам траншеи составила 9–16 м.

Известно применение подземных ядерных взрывов в СССР для ликвидации мощных аварийных газовых фонтанов.

1 декабря 1963 г. в Узбекистане на Урта-Булакском месторождении возник газовый фонтан высотой 70 м. В сутки сгорало 18 млн кубомет-

ров газа, что угрожало загрязнением атмосферы, образованием озоновых дыр, отравлением людей и животных. Фонтан горел свыше трех лет. За один год сгорало столько газа, что его хватило бы для снабжения такого промышленного центра, как Ростов-на-Дону, или восьми таких городов, как Волгоград. Физики-ядерщики создали ядерный заряд, пробурили скважину, опустили в нее заряд 30 кт и взорвали. Скважина была перекрыта на глубине 1,5 км, и газовый фонтан потух.

На фонтанах «Памук» и «Кратер» среднесуточная потеря газа составила – 1 млн и 700 тыс. кубометров. За время аварийного выброса на каждом из этих фонтанов бесполезно сгорело, соответственно, 15,4; 1,36 и 0,85 млрд кубометров газа, то есть в сумме около 17,6 млрд кубометров. Экономический эффект от использования нового метода гашения оценивался в ценах до 1971 г. для «Урта-Булака» в сумму 25,4 млн руб., «Памука» – 4 млн руб. и «Кратера» – 2,75 млн руб.

Впервые задача дробления больших масс горных пород с помощью подземных ядерных взрывов была детально рассмотрена в СССР сотрудником Арзамаса-16 Д. А. Франк-Каменецким еще в 1950 г. Успешные эксперименты по применению подземных ядерных взрывов для дробления руды были проведены на апатитовом месторождении на Кольском полуострове. Одиноким взрывом в 1972 г. был раздроблен блок размером 50x50x50 м, а групповым взрывом двух зарядов в 1984 г. был подвергнут дроблению блок размером 50x125x90 м. Для отвода и герметизации радиоактивных продуктов взрыва была выполнена специальная горизонтальная выработка, что исключило загрязнение раздробленной руды.

Всего тремя ядерными взрывами было раздроблено 1550 тыс. т руды, причем качество дробления оказалось выше, чем с использованием обычной технологии. Концентрация радиоактивных продуктов в зоне дробления не превысила допустимых величин: по стронцию-90 она оказалась менее 2 Бк/кг, а по цезию-137 – менее 5 Бк/кг.

Рассмотрим кратко возможность использования ядерно-взрывных технологий для решения глобальных экологических проблем современной цивилизации.

С 1990 по 1992 гг., в ВНИИ ЭФ был выполнен значительный объем исследований, который показал принципиальную возможность уничтожения химически токсичных материалов.

Весь объем производимый химической отраслью СССР (40 тыс. т) мог быть уничтожен при использовании ядерного взрыва в течение примерно 10 лет и при затратах в 10 раз меньших по сравнению с заводскими технологиями.

Ядерно-взрывная технология может использоваться для переработки высокоактивных отходов, полученных с АЭС, и тем самым исключить дорогостоящий и потенциально опасный цикл радиохимической переработки. Удельная закладка полной массы таких радиоактивных материалов составляет 70 т/кВт мощности ядерного взрыва и соответствует массе грунта, испаряемого обычно в подземном ядерном взрыве.

Успешное претворение в жизнь многолетней советской программы подземных ядерных взрывов в мирных целях привело к двум главным результатам: были проверены основные идеи и ожидания этой программы и заложен фундамент ядерно-взрывных технологий.

Ученые доказали: новое сверхразрушительное оружие, как уже не раз случалось в ходе эволюции и взаимного переплетения «военных» и «мирных» разработок, может рассматриваться и как огромной мощности компактное, чрезвычайно эффективное средство для разнообразных «мирных» применений с пользой для человека.

В эпоху «холодной войны» люди устали жить под страхом ядерной катастрофы. Человечество видело в ядерной взрывчатке только губительное начало, которое затмило ее потенциальные созидательные возможности. Избавление от угрозы глобального уничтожения, полное запрещение испытаний ядерного оружия стало настоятельной необходимостью.

Чтобы упростить трудный путь к заключению договора о полном запрещении ядерных испытаний, программа подземных ядерных взрывов в мирных целях была принесена в жертву. Действительно, при отсутствии международного контроля за проведением мирных ядерных экспериментов и особенно за конструкциями используемых для этого зарядов (а именно такова была практика) сохраняется опасность того, что в условиях договора о запрещении испытаний та или иная сторона попытается под прикрытием «мирных» взрывов продолжить тайное совершенствование ядерного оружия. В этом случае такие взрывы превратились бы в разновидность полигонных испытаний новых зарядов.

Сейчас, в условиях действия Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний, подземные взрывы в мирных целях, естественно, невозможны. Более того, с учетом общественного мнения, сложившегося под влиянием аварий на объектах ядерной энергетики, и прежде всего чернойбыльской катастрофы, не имеет шансов быть реанимированной даже сама идея обращения к ядерно-взрывным технологиям. Положение усугубляется еще и тем, что ядерно-взрывные технологии были засекречены и о них мало известно. Критики с ходу их отвергают, даже не интересуясь тем, что эти технологии на самом деле могут оказаться весьма полезными. Между тем положительный потенциал под-

земных ядерных взрывов в мирных целях для ряда направлений, упомянутых выше, является бесспорным. И не только в условиях бескрайних просторов России они могли бы найти дальнейшее эффективное применение. Изучение внутреннего строения Земли, ее защита от катастрофических столкновений с массивными космическими объектами, выявление геологических структур в земной коре под океанскими глубинами, перспективных на поиск месторождений полезных ископаемых, и другие направления работ – таким может быть в будущем применение ядерно-взрывных технологий.

Уникальный опыт использования подземных ядерных взрывов в мирных целях, накопленный в России и Соединенных Штатах, не должен быть утрачен.

Человечеству не свойственно отказываться от достижений научно-технического прогресса, – всего того, что приносит ему благо.

В заключение следует подчеркнуть, что использование любой как техники, так и технологии должно базироваться на трех основных принципах: экономическая целесообразность, техническая возможность и экологическая безопасность. Вероятно, что ядерно-взрывная технология, прошедшая захватывающий путь от взлета до вынужденного отказа от этого многообещающего направления, будет в будущем востребована.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атомные взрывы в мирных целях / под ред. И.Д. Морохова. – М., 1970.
2. Дубасов Ю.В., Кривохатский А.С., Мясников К. В., Филонов Н. П. Ядерные взрывные технологии: особенности проведения ядерных взрывов в мирных целях//Бюллетень Центра общественной информации по атомной энергии. 1994. №1. С. 30–35.
3. Дубасов Ю.В., Дедровский О.Л., Касаткин В. В., Матущенко А.М., Цырков Г.А., Мясников К.В., Самойлов Е.В., Филонов Н.П., Харитонов К.В. Подземные взрывы ядерных устройств в промышленных целях на территории СССР в 1965-1988 гг.: хронология и радиационные последствия // Бюллетень Центра общественной информации по атомной энергии. 1994. № 1. С. 18–29.
4. Козловский А.К. Комплексная программа глубинного изучения земных недр // Советская геология. 1982. № 9. С. 2–9.
5. Приходько Н.К., Мясников К.В., Титов В. М. Использование ядерных взрывов при подземном захоронении промстоков /Горный вестник. 1997. № 2.

6. Приходько Н.К., Васильев А.П., Симоненко В.А. Подземные ядерные взрывы для улучшения экологической обстановки//Природа. – 1991. № 2. С. 36–42.
7. Гриценко А.И., Приходько Н.К. Технологические возможности укрупненных скважин // Горный вестник, 1998. № 6. С. 43-47.
8. Применение подземных ядерных взрывов в нефтеперерабатывающей промышленности / под ред. А.А. Бакирова и Э.А. Бакирова. – М., 1981.
9. Мусинов В. И. Добыча нефти и газа с помощью ядерных взрывов // Природа, 1991. № 11. С. 25–33.
10. Мирные ядерные взрывы: обеспечение общей и радиационной безопасности при их проведении / Кол., авт. под рук. проф. В.А. Логачева. – М., 2001. С. 115–166.
11. Клишин В.И., Левченко Н.Я. Экологические последствия ядерных взрывов в мирных целях // Бюллетень Центра общественной информации по атомной энергии. – 1992. № 2. С. 74–77.
12. Битков В.П., Левченко Н.Я. Есть ли будущее у ядерных взрывных технологий // Бюллетень Центра общественной информации по атомной энергии. 2000. №1. С. 8–14.
13. Адамский В.Б., Клишин В.И., Смирнов Ю.Н. Советская программа подземных ядерных взрывов: надежды и результаты. История советского Атомного проекта: документы, воспоминания, исследования. 2002. С. 184–234.
14. Бюллетень по атомной энергии – М: ЦНИИАтоминформ, 2005. №1.
15. Новиков С.А. Мирные ядерные взрывы / Соросовский образовательный журнал. 1999. № 11. С. 82-89.
16. Новиков С.А. Полезные взрывы. – Саратов: РФЯЦ «ВНИ-ИЭФ». 2000. 293 с.
17. Бейлин В.А., Боровик А.С., Малышевский В.С. Радиация, жизнь, разум. – Ростов-на-Дону. 2001.
18. Арцыбашев В.А. Ядерно-геофизическая разведка. – М.: Атомиздат, 1980.
19. Курчатов И.В. Ядерную энергию - на благо человечества. – М.: Атомиздат, 1978.
20. Мухин К.Н. Экспериментальная ядерная физика. – М.: Атомиздат, 1974.
21. Бюллетень по атомной энергии. – М., 2005. № 8.

Глава 5. ЯДЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Физические принципы и методы применения ядерных излучений основаны на том, что при прохождении излучений через вещество в результате взаимодействия с атомами и молекулами изменяются характеристики вещества и проходящего через него излучения.

Эти изменения и основанные на них методы регистрации и применения радиоактивных излучений заключаются в следующем.

а) В зависимости от свойств среды часть проходящего через нее излучения рассеивается (с потерей или без потери энергии) и поглощается с образованием других частиц. Регистрация и количественное измерение прошедшего, рассеянного или вторичного излучения позволяет определять физические свойства, геометрические размеры и другие параметры среды.

б) При прохождении радиоактивных излучений через среду происходит ионизация и возбуждение атомов, диссоциация молекул и образование свободных радикалов, в результате чего изменяется состояние среды и могут протекать процессы, которые в обычных условиях не осуществляются или имеют малую скорость. Ионизирующая способность радиоактивных излучений используется для их регистрации и лежит в основе методов, с помощью которых изменяются свойства веществ и материалов, скорости химических реакций и биологических процессов.

в) При ядерных реакциях, происходящих в результате взаимодействия излучения с веществом, образуются ядра в возбужденном состоянии. Энергия возбуждения снимается испусканием вторичного излучения. Это явление образования радиоактивных ядер под действием облучения (наведенная радиоактивность) является основой метода активационного анализа. Метод используется для определения количественного состава материалов и веществ путем их облучения и последующей регистрации и анализа вторичного излучения. Знание спектральных характеристик вторичного излучения, которое специфично для каждого изотопа, позволяет определить присутствие данного изотопа в веществе и определить его количество.

г) Радиоактивные изотопы испускают излучение, регистрация которого позволяет обнаруживать присутствие атомов радиоактивного изотопа среди других радиоактивных и нерадиоактивных изотопов данного элемента. По характеру радиоактивного излучения (природа частиц, величина их энергии, период полураспада) мы можем проследить за поведением интересующего нас вещества. Поскольку химические свойства атомов радиоактивных и нерадиоактивных изотопов одного и

того же элемента одинаковы, наблюдая за поведением радиоактивного изотопа, мы можем судить и о поведении интересующего нас элемента. Таким образом, радиоактивность является меткой, которая позволяет следить за поведением атомов. Отсюда и название метода – метод меченых атомов, сфера применения которого чрезвычайно велика. Роль меченых атомов могут выполнять и стабильные изотопы, если они входят в природную смесь изотопов данного элемента в количестве, отличном от природного изотопного состава. Например, в естественной смеси кислорода содержится 99.76 % кислорода-16, 0.04 % изотопа кислорода-17 и 0.2 % кислорода-18.

Если каким-либо образом увеличить процентное содержание ^{18}O в смеси, то кислород становится меченым, поскольку, анализируя изотопный состав, можно следить за распространением кислорода с измененным изотопным составом.

Измерение параметров материалов и сред

В настоящее время ядерные излучения широко используются во всем мире и стали ценным средством повышения эффективности многих производственных процессов в промышленности. Важными преимуществами применения ядерных излучений, по сравнению с другими технологическими методами, являются, как правило, экономия энергии, надежность и простота управления соответствующими процессами, сокращение промышленных загрязнений, высокое или даже уникальное качество продукции, высокий уровень безопасности на промышленных радиационных установках. По стоимости радиационные методы сравнимы с другими альтернативными методами.

В промышленности ядерные излучения применяются для автоматизации контроля, регулирования и автоматизации проверки качества материалов и изделий, для придания веществам и материалам новых свойств, для создания новых технологических процессов.

Контрольно-измерительные приборы и устройства, использующие проникающую способность излучений, дают возможность обеспечить без механического контакта измерение параметров среды или технологических процессов, которые протекают при высоких давлениях, температурах, в высокоагрессивных средах. Радиационно-измерительные устройства применяются там, где использование устройств других типов невозможно или менее эффективно. Радиационные приборы имеют большой срок службы. Метод меченых атомов дает возможность непрерывно контролировать технологические процессы. Область применения радиационных приборов охватывает весьма широкий круг задач в ме-

таллургической, машиностроительной, химической, горнорудной, угольной, нефтяной, строительной и других отраслях промышленности. С помощью приборов, действие которых основано на применении ядерных излучений, измеряются физические характеристики различных сред, исследуется структура и состав материалов и веществ, контролируются разнообразные технологические процессы.

Рассмотрим кратко, какие параметры среды и каким образом можно измерять с помощью радиоактивных излучений.

Измерение плотности и толщины

Количество прошедшего и рассеянного излучения зависит от плотности, толщины и состава материала. Для измерения этих параметров используются приборы, основанные на регистрации как прошедшего, так и рассеянного излучения. Для измерения больших толщин используются гамма-излучение и нейтроны. С помощью источников гамма-излучения (^{137}Cs , ^{60}Co) можно измерять, например, толщину железа до 10 см и более. Для измерения очень малых толщин (доли миллиметра) используются источники β -излучения (^{90}Sr , ^{85}Kr и др.).

Сравнение интенсивности прошедшего излучения с эталонной зависимостью интенсивности проходящего излучения от толщины или плотности позволяет определить толщину или плотность данного материала или вещества.

Измерение и контроль толщины используется в сталелитейной бумажной, текстильной промышленности, при производстве пластмасс, резины и стекла. В случае отклонения толщины от нормы система автоматики регулирует технологический процесс, уменьшает разброс в толщине и, следовательно, улучшает качество производимого листа (бумаги, стали, стекла и др.). В строительстве метод применяется для измерения плотности бетона и грунта. В последнем случае бурят две параллельные скважины на расстоянии 0,5 м друг от друга; в одну из которых помещается источник (обычно ^{60}Co), а в другую – детектор. По интенсивности измененного гамма-излучения, используя эталонную зависимость, определяют плотность грунта, точность измерений 1–2 %. Радиоактивные излучения применяются также для непрерывного измерения плотности жидкостей прямо в трубопроводах. Плотность материалов и их толщину можно измерять по регистрации рассеянного излучения. Это особенно важно, когда доступ к объекту контроля возможен только с одной стороны. Так измеряется толщина стенок труб, различных емкостей, стен. В химической промышленности этот метод позволяет проводить профилактический контроль состояния толщины

стенок трубопроводов и сосудов без остановки технологического процесса в тех случаях, когда имеется опасность коррозии стенок под воздействием химических соединений.

Измерение рассеянного β -излучения используется при определении толщины покрытий, наносимых на различные материалы и изделия. Так определяется толщина до 10 мкм покрытий из золота и серебра, осуществляется контроль толщины олова и цинка, наносимого на стальной лист для защиты от коррозии.

Суть метода заключается в том, что коэффициент отражения β -частиц зависит от атомного веса материала. Поэтому коэффициенты отражения от чистой поверхности какого-либо металла от поверхности того же металла, но покрытого слоем другого состава, различаются, и тем больше, чем больше разность атомных весов подложки и покрытия и чем толще покрытие. Если составы подложки и покрытия не изменяются по глубине, то коэффициент отражения β -частиц зависит только от толщины покрытия.

Измерение толщины и плотности материалов дает возможность определять и вес материалов. Метод измерения веса с помощью радиоактивного излучения эффективно используется для непрерывного определения веса породы и веществ на движущейся транспортной ленте. В этом случае над транспортером размещается источник излучения и регистрируется проходящее гамма-излучение. Так измеряется вес руды, угля, химикалий, удобрений, цемента, вес стальных листов на прокатных станах.

Измерение уровня

Радиоизотопные приборы используются во многих областях промышленности для измерения уровней жидкости в сосудах и резервуарах, сыпучих веществ в бункерах, контроля уровня расплава металлов и др. Обычно используются гамма-излучатели ^{60}Co , ^{137}Cs . Важным достоинством таких приборов является возможность бесконтактного контроля агрессивных жидкостей и материалов под высоким давлением и при высоких температурах. Измерители уровня могут иметь различные конструкции. Располагая соответствующим образом источник и детектор, можно определить, когда жидкость или другое вещество достигнет критического уровня или на каком уровне они находятся в данный момент.

Приборы этого типа дают возможность определять уровень границы раздела жидких сред, плотность которых очень мало различается (менее $0,05 \text{ г/см}^3$), а также уровень раздела сред, содержащих и не содержащих водород. Метод применяется в металлургии для измерения

скорости продвижения и уровня шихты (руды и кокса) в доменной печи. Источником излучения служит ^{60}Co . На металлургических заводах на установках непрерывной разливки стали с помощью радиоизотопных приборов измеряется и контролируется уровень жидкого металла в кристаллизаторах.

Измерение влажности

Для измерения влажности используют быстрые нейтроны, источником которых может служить нейтронный генератор или изотопный источник, например ^{252}Cf . Взаимодействуя со средой, быстрые нейтроны в результате неупругих соударений с атомами среды замедляются, и в окружающей среде появляются тепловые нейтроны, плотность потока которых зависит от замедляющей способности вещества. Наибольшей замедляющей способностью обладает водород. Поэтому, измеряя скорость счета тепловых нейтронов при помещении в нее источника быстрых нейтронов, можно судить о наличии воды или органических соединений.

Таким образом, например, контролируется влажность угля на тепловых станциях с целью оптимизации сжигания угля и повышения эффективности котлов и оборудования, влажность кокса на металлургических заводах, исходных материалов (песка и цемента) в производстве бетона, влажность грунта в строительстве и др.

Определение состава

Радиоактивные излучения позволяют определять состав облучаемой среды по изменению интенсивности проходящего или отраженного излучения или по вторичному излучению, возникающему в результате активации элементов среды падающим излучением. В одних случаях проводится определение какого-либо параметра (например, плотности, естественной радиоактивности пород), что позволяет определять породу, вещество или материал по этому параметру. В других случаях необходимо знание элементного состава исследуемой среды. Оба эти подхода широко применяются в промышленности.

В горно-рудной промышленности радиоизотопные методы и приборы находят применение при сортировке и обогащении полезных ископаемых. С помощью ядерных излучений можно отделять пустую породу от угля. Для этого над лентой транспортера устанавливается радиоизотопный источник. Детектор улавливает разницу в поглощении излучения углем и пустой породой, в результате чего приводятся в дей-

ствие устройства, сбрасывающие пустую породу. Аналогичным образом можно производить обогащение руды. Регистрация естественной радиоактивности позволяет отделять от пустой породы урановую и ториевую руды, а также минералы, содержащие повышенные количества радиоактивных элементов (калия, урана, тория).

Одним из интересных применений излучения радиоактивных источников является обнаружение алмазов в кимберлитовой руде. Если над лентой транспортера с рудой установить источник гамма-излучения, то алмазы, попадая в зону облучения, начинают светиться.

Для контроля обогащения нерадиоактивных руд используется активация содержащихся в них элементов медленными нейтронами, в результате облучения образуется захватное гамма-излучение, регистрация которого позволяет отделять пустую породу от руды с повышенным содержанием металла. Этот метод целесообразно применять для обогащения руд, содержащих элементы с большими сечениями захвата нейтронов, таких как Au, Ag, Ca, Mn, Hg, W и др.

Измерение скорости и расхода

Радиоактивные излучения применяются также для определения расхода жидких, сыпучих и газообразных веществ. В этом случае задача сводится к определению скорости движения вещества, например, по трубопроводу. Для определения скорости используется ионизирующая способность радиоактивных излучений.

Метод измерения расхода газа заключается в том, что газопровод в выбранном сечении облучается импульсным потоком радиоактивного излучения. Внутри образуются ионы, которые переносятся вместе с потоком газа и вызывают импульсы тока в детекторе, расположенном на некотором расстоянии. Измеряя среднее время переноса ионов на фиксированном расстоянии, судят о скорости движения или расходе газа.

В другом методе измерения расхода используется ионизационная камера, расположенная в газовом потоке. Газ в рабочем объеме камеры ионизируется потоком α - или β -излучения и регистрируется ионизационный ток камеры, величина которого зависит от скорости движения газа, так как при движении газа часть ионов уносится за пределы камеры и ионизационный ток уменьшается. Это позволяет измерять количество газа, прошедшего через данный объем.

Скорость жидкости можно определять с помощью вертушки, помещенной в поток. В этом случае на лопасти вертушки наносится радионуклид, регистрация излучения которого позволяет определить скорость вращения вертушки, а следовательно, и скорость течения жидко-

сти. Скорость жидкости можно также определять по времени распространения введенного в нее радионуклида.

Счет штучной продукции

На поточных линиях радиоактивные излучения применяют для автоматического учета штучной продукции. Метод счета изделий заключается в ослаблении радиоактивного излучения объектом регистрации прошедшего излучения детектором, связанным с электронно-релейным устройством счета изделий. При прохождении излучения между источником и приемником изменяется интенсивность падающего на детектор излучения, и электронно-релейное устройство преобразует поступающий сигнал в электрический импульс, попадающий на счетчик. Этот метод используется, например, в горнорудной промышленности для счета вагонеток с углем или рудой.

Дефектоскопия

Качество металла, из которого изготовлены детали, определяет долговечность машин и сооружений. Поэтому необходимо выявить скрытые дефекты как в исходном металле, так и в изделиях, поскольку дефекты могут появиться и в процессе их изготовления. Особое значение приобретет контроль при сварочных работах. Контроль качества деталей и сварных швов осуществляется разными методами, среди которых видное место занимает дефектоскопия. Для выявления скрытых дефектов в материалах и конструкциях применяют различные виды радиоактивных излучений: рентгеновское и гамма-излучение, нейтроны.

Метод гамма-дефектоскопии основан на просвечивании контролируемых объектов гамма-излучением. Источник и детектор располагают по разные стороны объекта. Гамма-лучи, прошедшие через объект, ослабляются в зависимости от толщины, рода поглощающего материала и наличия дефекта. В зависимости от способа регистрации и измерения интенсивности гамма-лучей при просвечивании различают два метода: фотографический и ионизационный.

В промышленности строительных материалов и при производстве строительных работ гамма-дефектоскопия широко применяется для контроля железобетонных деталей, сварных швов металлических конструкций и трубопроводов, а также сварных соединений стыков арматуры железобетонных конструкций. В качестве источника излучения обычно используется Co-60 , а также Cs-137 . Метод получения фотографического изображения в результате действия излучений на фотопленку назы-

вается радиографией. В результате удается получить высококачественные снимки железобетонных конструкций толщиной до 600 мм и сварных швов толщиной до 120 мм.

Однако фотографировать внутренние части предметов можно не только с помощью внешних источников излучения. Существует метод, который называется автордиографией. В этом методе с помощью фотопластинок регистрируется собственная или привнесенная радиоактивность изделий и сред. Например, к сплаву добавляется небольшое количество радиоактивного изотопа элемента, входящего в сплав. Образец сплава, содержащего радиоактивную добавку, помещают на фотопластинку и по изображению определяют, насколько равномерно распределен данный элемент в сплаве. Это дает возможность контролировать технологию производства сплавов и наличие неоднородностей.

Радиоизотопные приборы и автоматизация производственных процессов

Радиационные приборы широко используются для автоматизации производственных процессов. Они обладают достаточно высокой точностью, большим сроком службы, широким диапазоном контролируемых параметров. На основе радиоизотопных источников работают многие релейные устройства в системах автоматического контроля и регулирования хода производственных процессов в строительстве, в машиностроении, в металлургии, в горном деле, в химической технологии и др.

Использование радиоактивных излучений для контроля и автоматизации производственных процессов основано на возможности с их помощью непрерывно измерять параметры среды (толщину, плотность, состав, скорость, концентрацию и др.). Включение радиоизотопных приборов в систему контроля и автоматики позволяет поддерживать эти и другие параметры на заданном уровне.

Радиационные приборы используются не только для управления технологическим процессом, но и для его немедленного прекращения в случае опасных технологических отклонений. В металлообрабатывающей промышленности, например, радиоизотопные приборы используются для блокировки станков, машин и автоматических линий в случае нарушения нормального хода процесса или для предотвращения несчастных случаев при неосторожных действиях персонала. Во многих других областях промышленности применяются многочисленные радиоизотопные устройства, сигнализирующие о достижении заданных пре-

делов (уровня, давления, скорости и др.), а также прерывающие процесс, если контролируемые параметры становятся критическими.

Очень большое распространение получили радиоизотопные анализаторы дыма, которыми оборудуются системы противопожарной сигнализации служебных, общественных и производственных помещений. Принцип действия такого извещателя основан на использовании явления ионизации воздуха излучением. В камеру извещателя помещается радиоактивный изотоп ^{239}Pu , α -излучение которого ионизирует воздух в камере и делает его электропроводящим. Если к электродам камеры приложить напряжение, то через нее потечет ток. Попадание частиц дыма в камеру приводит к увеличению вероятности рекомбинации ионов и электронов и, следовательно, к уменьшению протекающего тока. В результате соответствующая электрическая схема приводит в действие световую и звуковую сигнализацию или автоматические устройства пожаротушения.

Все радиоактивные источники, используемые в приборах и устройствах технологического контроля, находятся в специальном контейнере и при правильном обращении с ними для обслуживающего персонала опасности не представляют.

Использование ядерных излучений в химической технологии

Под действием ядерного излучения в веществах образуются активные в химическом отношении ионы, возбужденные атомы и молекулы. Это приводит к тому, что увеличивается скорость протекания химических реакций, а также становятся возможными реакции, которые при других условиях не протекают. Поэтому ядерные излучения применяются в промышленных масштабах для получения новых материалов или придания известным материалам новых свойств. Наибольшее развитие получила радиационная обработка полимерных веществ, состоящих из макромолекул органического происхождения. К природным полимерам относятся такие вещества как целлюлоза, шерсть, натуральный каучук. Искусственные полимеры получают из низкомолекулярных соединений–мономеров (например, этилена) путем полимеризации, в результате которой из мономеров образуются макромолекулы. Таким образом получают большинство полимерных материалов: химические волокна (капрон, лавсан и др.), полиэтилен, фторопласты, стеклопластики, синтетический каучук и другие материалы. В традиционной технологии для получения полимеров требуются повышенные температуры и давление.

Применение радиационной обработки позволяет осуществлять полимеризацию практически в нормальных условиях и получать материа-

лы более высокого качества. Радиационным методом можно осуществлять полимеризацию таких мономеров, которые вообще иными способами не синтезируются. Облучение вызывает ионизацию молекул, которые затем соединяются в макромолекулы. Так с помощью облучения получают из этилена полиэтилен, из стирола – полистирол и др. Процесс можно регулировать изменением интенсивности облучения. Радиационная полимеризация может происходить при любом состоянии мономера: твердом, жидком или газообразном.

Широкое применение в химической промышленности получила также модификация материалов, основанная на методах радиационного сшивания полимеров. При этом характеристики исходных полимеров существенно улучшаются. При получении сополимеров к молекулам полимера одного химического состава и строения прививаются молекулы полимера другого химического состава. Таким образом, например, получают ионообменные мембраны.

Разработана технология получения бетонов на основе полимерных вяжущих веществ (полимербетонов) путем облучения их гамма-лучами или электронами. Облучение существенно упрощает и ускоряет процесс полимеризации полимеров в бетоне. Облучение бетона можно осуществлять непосредственно в конструкции. Полимербетоны практически не подвержены коррозии и применяются всюду, где требуется высокая прочность. Широкое распространение получили также методы улучшения свойств волокон и тканей, основанных на процессах полимеризации с помощью излучений. Облучение полимеров, составляющих волокна и ткани, производится в присутствии мономеров, в результате чего образуются новые полимерные цепи, привитые к макромолекулам исходного материала. Полученные таким образом модифицированные волокна и ткани по ряду характеристик существенно превосходят исходные материалы. Приобретаются такие свойства, как устойчивость к гниению, сминанию и др.

С помощью гамма-излучения можно также внедрять молекулы полимера в волоконную основу ткани. Такая ткань не гниет в почве.

Гамма-излучение большой энергии может инициировать некоторые химические реакции. Примером является производство этилбромиды ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{Br}$), летучей органической жидкости, которую используют в качестве промежуточного соединения в синтезе органических материалов. Гамма-излучение, испускаемое радиоактивным изотопом кобальт-60, играет роль катализатора в реакции бромистого водорода (HBr) и этилена (CH_2CH_2). Гамма-кванты яв-

ляются в этой реакции лучшим катализатором, по сравнению с химическими катализаторами. В настоящее время гамма-катализ применяется при производстве тысяч тонн этилбромиды в год. С помощью гамма-облучения из этилена производится полимер полиэтилен, имеющий большое значение в промышленности.

В настоящее время разработан новый тип деревянного настила. В нем используется древесина, пропитанная пластмассой и подвергнутая затем воздействию гамма-лучей. В результате изменяется молекулярная структура пластмассы и получается поверхность, которая не царапается и не воспламеняется. При этом внешний вид остается неизменным, но древесина приобретает исключительную прочность. Добавочная стоимость обработки окупается повышенным сроком службы. Аналогичным методом изготавливается строительная черепица с улучшенной износостойкостью и повышенной прочностью.

Облучение электронами или гамма-квантами может изменять различные свойства таких полимеров, как полиэтилен. Исходный полимер состоит из очень длинных параллельных цепочек молекул. В результате облучения эти цепочки соединяются (этот процесс называется образованием перекрестных связей). Облученный полиэтилен имеет лучшую теплостойкость и является отличным изолятором проводов. В результате стандартный кабельный полиэтилен при температуре 120 °С сохраняет свои свойства в течение нескольких десятков часов, при дальнейшем повышении температуры на несколько градусов он начинает "течь", в то же время облученный полиэтилен даже при температуре 160 °С сохраняет свои качества свыше 10 000 часов, а при температуре 120 °С его работоспособность практически не ограничена. Этот качественно новый материал способен выдерживать кратковременные температурные нагрузки до 350 °С и обладает повышенной устойчивостью к пробойному электрическому напряжению. Его сопротивление при повышении температуры остается практически неизменным, сопротивление же обычного полиэтилена уменьшается в 10 000 раз.

Эффективным промышленным методом улучшения свойств древесины является ее пропитка мономерами с последующим отверждением в древесине с помощью облучения. В этом случае радиационная полимеризация происходит также в нормальных условиях. В результате получают материалы (древесные пластики) с высокой прочностью, хи-

мической стойкостью и термостойкостью, существенно снижается их способность поглощать воду. Метод используется для сохранения изделий из дерева, представляющих историческую и художественную ценность.

Радиационное облучение применяется для структурной модификация вещества в производстве самых различных материалов и изделий, в том числе для отверждения покрытий, нанесенных на пленки, деревянные изделия, фольги, для отверждения магнитных покрытий материалов для звуко- и видеозаписи и др.

Последние года значительный прогресс был достигнут в области создания нового каучукового материала с использованием радиационной вулканизации натурального латекса, являющегося одним из наиболее важных сырьевых материалов. Технология основана на использовании гамма излучения для вулканизации, т.е. процесса, с помощью которого осуществляется химическая связь молекул, придающая каучуку эластичность и прочность. Использование излучений позволяет отказаться от применения технологических процессов, в результате которых резиновые изделия могут содержать токсичные и канцерогенные вещества. Это очень важно для применения резиновых изделий в медицине, так как основная часть каучука идет на изготовление хирургических перчаток, детских воздушных шаров, сосок и пустышек, презервативов, катетеров и других изделий, которые должны отвечать высоким требованиям.

Радиационная вулканизация является перспективной технологией в производстве автопокрышек автомобилей. Качество изделий не хуже, а в некоторых отношениях даже лучше, чем в обычной технологии с применением серы, но существенно улучшаются условия производства.

Радиационная технология является менее энергоемкой и, как правило, более безопасной и экологически чистой, более экономичной.

Ионная имплантация

Новым и перспективным технологическим процессом является ионная имплантация. Суть этого процесса заключается в облучении какого-либо материала ускоренными ионами примесного вещества, которые имплантируются (внедряются) в поверхностный слой материала.

Ионная имплантация изменяет свойства поверхностей облучаемых материалов и открывает огромные возможности для придания им новых и полезных свойств. Эта технология позволяет внедрить в поверхность определенное количество почти любого химического элемента. Внедрившиеся ионы соединяются с атомами основного вещества и образу-

ют поверхностный слой толщиной в несколько десятков нанометров, свойства которого могут сильно отличаться от свойств поверхности основного вещества. Пучок ионов ускоряется до энергии 10–500 кэВ. Наиболее вероятная длина пробега ионов с такой энергией в металлах лежит в диапазоне 10–1000 мкм. Меняя энергию ионов, можно изменять глубину проникновения и, следовательно, толщину слоя и его местоположение по глубине. Время облучения и количество внедренных ионов зависит от плотности потока ионов.

Применение ионных пучков произвело революцию в микроэлектронике. Ионная имплантация путем изменения электрических свойств полупроводников позволила создать быстродействующие полупроводниковые устройства. Ионные пучки позволили не только обрабатывать полупроводники с целью получения электрической проводимости требуемого типа, но и создавать новые полупроводниковые среды.

Что касается металлов, то в этом случае наиболее важной является задача изменения их механических и химических свойств. Ионная имплантация может существенно улучшить характеристики поверхностей металлических изделий: повысить их прочность и износостойчивость, сопротивление к окислению и коррозии, уменьшить коэффициент трения или изменить в лучшую сторону ряд других свойств.

Облучение ионами поверхностей изделий с целью уменьшения трения и износа находит широкое применение в производстве подшипников, прецизионных приборов, металлообрабатывающих штампов и др. Например, имплантация азота замедляет износ некоторых марок сталей в десятки и даже сотни раз. В хирургии методом имплантации можно существенно повысить качество (износостойкость) протезов тазобедренных суставов, которые изготавливаются из титанового сплава. Можно привести множество примеров, когда после имплантации резко возрастает коррозионная стойкость металлических сплавов. Новые технологии требуют не только новых материалов, но и предъявляют новые требования к старым. С помощью этого метода можно создавать поверхности с новыми свойствами у таких диэлектриков, как стекло, керамика и полимеры.

Одним из ярких примеров является улучшение методом ионной имплантации фоточувствительности ферроэлектрической керамики, которая может регистрировать изображение, если ее подвергнуть одновременному действию ультрафиолетового излучения и электрического поля. Облучение ионами алюминия и аргона увеличивает фоточувствительность керамики более чем в 10 000 раз.

Имплантация позволяет сделать проводниками самые различные полимеры и заменять ими проводники из металлов.

Имплантация – это не только перспективный технологический процесс, но и инструмент для научных исследований. Ионные пучки можно использовать для моделирования физических и химических факторов, действующих на материалы, для изучения в лабораторных условиях поведения материалов в различных средах. Ионные пучки успешно применяются для моделирования действия радиации и сильного нейтронного излучения на материалы, применяемые в реакторостроении. Ионная имплантация, позволяя создавать в металлах любую концентрацию примесей, стала мощным средством исследования поведения веществ в сплавах.

Промышленное строительство

Исследуются физические и химические процессы, связанные с производством цемента, бетона и других строительных материалов. Исследуется равномерность смешивания грунтов со связующими материалами (цементом, известью). Используется для этого ^{45}Ca (β -лучи с энергией 0,25 МэВ). Радионуклид ^{51}Cr применяется для изучения процессов движения цемента по цементопроводам при пневматической транспортировке.

Одной из задач в промышленном строительстве является проверка работы вентиляции. Нужно определить коэффициент обмена воздуха. Для этого в систему вентиляции вводится некоторое количество газообразных соединений, меченных радиоактивными изотопами (например бромистый метил, меченный радиоактивным ^{82}Br), и измеряется активность воздуха в помещении в зависимости от времени при работающей системе.

Важной задачей как при сдаче объектов в эксплуатацию, так и в процессе эксплуатации является обнаружение мест утечек из тепло- и газопроводов, в том числе подземных. Введение радионуклидов внутрь системы и последующее измерение снаружи радиоактивности позволяет обнаружить место утечки, даже если система расположена на глубине. Так, при испытании газопроводов в них накачивают воздух с примесью ^{133}Xe или паров бромистого метила с добавкой ^{82}Br .

Для обнаружения утечки в отопительных системах можно вводить поваренную соль NaCl с добавкой радиоактивного натрия. Следует заметить, что используются радионуклиды с коротким периодом полураспада (от нескольких часов до нескольких дней), поэтому через некоторое время первоначальная малая радиоактивность практически совсем исчезнет.

Радионуклиды применяются для изучения процесса диффузии и самодиффузии, в исследовании работы доменных и мартеновских печей, процесса кристаллизации стали и др. Изучается распределение фосфора и серы между металлом и шлаком, выявляются оптимальные условия для получения чистого металла. Сталь должна быть максимально однородной и не должна содержать шлаков и других неметаллических включений. В связи с этим исследуются процессы перемешивания составляющих сплав металлов (например, хрома с добавлением радиоактивного нуклида ^{51}Cr). Для этого отбираются пробы из различных мест и через разное время измеряется их радиоактивность. Так можно установить время, необходимое для полного перемешивания легирующих добавок. Для обнаружения источников загрязнения стали неметаллическими включениями радиоактивные изотопы добавляются к огнеупорным материалам. По радиоактивности металла определяется источник и степень загрязнения, а также целесообразность применения данного огнеупора.

Использование радионуклидов помогло решить проблему контроля за износом футеровки внутренней теплоизоляции, состоящей из огнеупорных кирпичей доменных печей. Слабые источники излучения вмуровывают в футеровку на разных расстояниях по ее толщине и внешним детектором измеряют радиоактивность. По мере разрушения футеровки источники излучения попадают вместе с футеровкой в печь. В результате чего интенсивность излучения, регистрируемая детектором, падает. По уменьшению уровня радиоактивности можно судить о степени износа футеровки, предотвратить аварийное состояние и своевременно остановить печь для ремонта.

При трении происходит износ поверхности и мельчайшие частицы металла попадают в смазочное масло. По радиоактивности масла можно сделать заключение о скорости, а также степени износа трущихся поверхностей задолго до появления каких-либо видимых признаков износа. Применяется также автордиография. Этот метод позволяет путем добавления в сплавы небольшого количества радиоактивных нуклидов исследовать износ работающих машин в условиях их эксплуатации, определять места наибольшего износа, изучать условия, при которых износ минимален. Метод эффективно применяется при изучении износа деталей в двигателях и станках, штампах, режущих инструментах и др. Результаты исследований используются для усовершенствования машин и инструментов с целью повышения срока их службы, улучшения характеристик, уменьшения эксплуатационных и ремонтных расходов.

Во многих отраслях промышленности, таких как химическая текстильная, бумажная, полиграфическая, резинотехническая, фотокиноплёночная, серьёзную проблему в процессе производства материалов представляет появление вследствие трения статического электричества. Особенно сильно электризуются синтетические материалы. Электризация заметно влияет на производительность и качество продукции, нередко приводит к самовозгоранию, создает повышенную опасность для обслуживающего персонала. Для защиты от вредного воздействия электрических зарядов наибольшее распространение получила их нейтрализация радиоактивным излучением. Для этого используются α - и β -излучения, имеющие высокую ионизирующую способность. Источник излучения помещается рядом с поверхностью материала, и образующиеся в воздухе в результате облучения ионы нейтрализуют заряды, возникающие на материалах. В качестве источников применяют такие изотопы, как ^{239}Pu , Th и др.

Ядерные излучения могут быть эффективно использованы для решения такой серьёзной проблемы, как очистка отходящих газов. Известно, что использование угля и углеводородов в качестве топлива создает серьёзные проблемы для окружающей среды из-за образования и поступления в атмосферу токсичных газов диоксида (серы SO_2) и оксидов азота (NO_x). Следствием загрязнения атмосферы этими газами являются кислотные дожди, наносящие большой ущерб сельскому хозяйству и ускоряющие также коррозию материалов. В настоящее время для улавливания этих газов применяются два разных химических процесса. Для решения этой проблемы, к тому же с большей эффективностью, можно использовать пучок электронов с энергией в несколько сотен мегаэлектронвольт. Облучение отходящих газов электронами высокой энергии ионизирует и возбуждает молекулы, что приводит к образованию активных свободных радикалов, ионов и молекул в возбужденных состояниях. Они более активно могут реагировать между собой, с кислородом и водой, присутствующими в системе, или с химическими компонентами, добавляемыми специально, что приводит к образованию продуктов, которые могут быть осаждены более удобными средствами. Так, введение аммиака в отходящие газы и облучение их электронами приводит к удалению SO_2 и NO_x одновременно с эффективностью 100 % и 85–90 % соответственно. Полученные побочные продукты в виде нитратов и сульфатов аммиака могут быть использованы в качестве удобрений.

Радиоактивный каротаж скважин

Одним из основных современных методов разведки новых месторождений нефти и некоторых других полезных ископаемых является радиоактивный каротаж скважин, основанный на различии процесса распространения нейтронов и γ -лучей в разных породах. В скважину помещается источник γ -лучей или нейтронов, выше источника – разделяющий фильтр (из свинца для γ -источника, из парафина – для источника нейтронов), а над фильтром – детектор. Скорость счета детектора зависит от свойств среды. В зависимости от источника и рода детектируемых частиц различают γ -каротаж, нейтрон-нейтронный каротаж и нейтрон- γ -каротаж. В γ - γ -каротаже скорость счета падает с увеличением плотности окружающей породы, поэтому этот вид каротажа называют каротажем плотности. Аномально малая плотность угольных пластов хорошо идентифицируется γ - γ -каротажем. Более разнообразную информацию дает нейтронный каротаж. Распространение нейтронов в горной породе тем хуже, чем больше в ней водорода, так как в водороде нейтроны быстро замедляются, а замедлившись, поглощаются. Содержание водорода велико как в нефти, так и в воде. Однако нефть практически не содержит примесей, а в воде всегда растворена поваренная соль, ядра хлора которой энергично поглощают нейтроны испусканием γ -квантов. В результате в нейтрон-нейтронном каротаже счет детектора более высок для нефти, чем для воды, в нейтрон- γ -каротаже – наоборот. Это дает возможность уверенно отличать нефтяные пласты от водных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мухин. К.Н. Занимательная ядерная физика. – М.: Атомиздат, 1972.
2. Жербин. Мирные профессии нейтронов. – М., 1980.
3. Меррей. Атомная энергетика. – М., 1979
4. Бюллетень ЦНИИАтоминформ. – М., 1993. № 37–38.
5. Манохин В.Н., Матусевич Е.С. Физико-технические основы ядерной энергетика. – Обнинск, 1993.
6. Сиберг Г. Человек и атом. – Мир, 1973.

Глава 6. РАДИОАКТИВНЫЕ ИЗОТОПЫ И ИОНИЗИРУЮЩИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ В ДРУГИХ СФЕРАХ ЧЕЛОВЕЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

6.1. Медицина

В настоящее время лечение онкологических заболеваний включает в себя хирургические, лучевые, гормональные, лекарственные методы лечения. Благодаря развитию этих методов, наблюдается стойкая тенденция к улучшению результатов лечения онкологических больных, причем более 50 % больных сегодня практически излечиваются. В Европе в настоящее время живут около 10 млн человек, перенесших эти заболевания, 50 % из которых получали лучевое лечение. Роль ионизирующих излучений в этой комплексной терапии определяется видом злокачественного новообразования, периодом заболевания и другими факторами. В развитых странах около 70 % всех онкологических больных проходят курс лучевой терапии. Имеется тенденция к увеличению использования ионизирующих излучений при лечении злокачественных опухолей. Лучевая терапия (ЛТ) – раздел клинической медицины, связанный с использованием ионизирующего излучения в качестве основного лечебного фактора. Образно выражаясь, ионизирующее излучение при этом является «лучевым скальпелем», задача которого «вырезать» опухоль с минимальным поражением окружающих здоровых органов и тканей. Активное применение достижений ядерной и радиационной физики в медицинских целях привело к созданию многих новых источников и аппаратов для лучевого лечения онкологических больных. В связи с этим появилась необходимость сравнительного анализа и систематики различных видов ионизирующих излучений, используемых для терапии. Кроме самого облучения, радиотерапевтическая технология включает диагностическую поддержку, предлучевую топометрическую подготовку, клиническую дозиметрию и измерения радиационных характеристик аппаратов, дозиметрическое планирование, иммобилизацию пациентов, формирование поля облучения, визуальный контроль области облучения, вопросы гарантии качества, радиационной безопасности и компьютерного сопровождения. Будущие медицинские физики, радиобиологи и врачи радиологи должны иметь достаточно полное и правильное представление об этой весьма сложной системе технологического и аппаратного обеспечения лучевой терапии.

6.1.1. Лучевая терапия

Хорошо известно, что зарождение и развитие жизни на Земле в течение многих тысячелетий происходило при наличии ионизирующего излучения (ИИ). Однако сознательно человечество начало осмысливать проблемы использования ИИ только с конца XIX века, когда К.Рентген открыл X-лучи (рентгеновское излучение, 1895 г.), А.Беккерель – естественную радиоактивность урана (1896 г.), а П. и М. Кюри обнаружили радиоактивные свойства полония и радия (1898 г.).

В первые же годы работы с неизвестными ранее излучениями было установлено, что они обладают положительными и отрицательными для человечества свойствами. Первой открылась и привлекла внимание ученых положительная сторона явления. Когда К. Рентген 23 января 1896 г., обобщая свои исследования, в триумфальном выступлении на заседании общества естествоиспытателей в Вюрцбурге под овации всей аудитории произвел просвечивание руки председателя общества, стало ясно, что человечество получило в свое распоряжение совершенно необыкновенные, неизвестные до сих пор возможности.

Первоначально рентгеновские снимки производились, главным образом, для распознавания в теле человека инородных металлических тел, переломов и заболеваний костей.

Однако оказалось, что новое и еще плохо изученное явление таит в себе и опасность. Уже в том же 1896 г. в печати появились сообщения о поражении кожи (эритемах, дерматитах) у лиц, подвергавшихся частым и продолжительным воздействиям X-лучами при проведении экспериментов. Французский ученый, будущий лауреат Нобелевской премии, П. Кюри после появления таких сообщений тотчас провел опыты с радиоактивным источником на собственном предплечье. К его великой радости, участок кожи, соприкасавшийся с радием, оказался пораженным. Такой результат, а также наблюдения и эксперименты на животных дали основание П. Кюри вместе с учеными-медиками Бушаром и Бальтазаром прийти к выводу о лечебном действии излучения на известное заболевание – волчанку.

29 января 1896 года доктором Джилманом из Чикаго предпринята первая, достаточно успешная попытка использовать рентгеновское излучение для лечения рака. Но через несколько лет была выявлена и другая опасность рентгеновского излучения. В 1902 году, семь лет спустя после открытия рентгеновских лучей, оператор завода, где производились рентгеновские трубки, который постоянно использовал свою руку для просвечивания при испытаниях трубок, обнаружил опухоль на коже руки, подвергавшейся постоянному просвечиванию.

Уже из приведенных примеров видно, что полезным свойствам ИИ иногда сопутствовали и нежелательные последствия. Ситуация, безусловно, усугублялась тем, что в те далекие годы первооткрыватели практически ничего не знали о действии излучения. Радиоактивная пыль носилась в их лабораториях, сами экспериментаторы спокойно брали в руки радиоактивные препараты, держали их в карманах, не ведая об опасности. В одном из музеев мира хранится записная книжка П. Кюри. Ее листки и в настоящее время, через десятилетия после того, как он вел записи, являются источником излучения. Если листок положить на фотопластинку и проявить ее, то можно обнаружить следы пальцев, державших его несколько десятилетий назад.

Полное отсутствие знаний о характере биологического воздействия ИИ привело к тому, что человечество в первые два десятилетия исследования ИИ заплатило высокую цену за открытие и продвижение к тайнам природы. В Гамбурге в 1936 году воздвигнут памятник тем, кто прокладывал путь к эффективному и безопасному использованию человечеством рентгеновских лучей и радиоактивных источников излучения. На памятнике высечены имена 169 человек, умерших в результате работы с источниками ионизирующего излучения.

Если исследователи, закладывавшие основы для эффективного использования человечеством источников ИИ, готовы были на себе испытывать действие излучений, то реакция обывателя тех далеких лет по отношению к новому открытию была и курьезной и воинствующей одновременно. Так, некоторые нью-йоркские газеты писали, что новые лучи способны фотографировать души умерших. Одна из них сообщила, что рентгеновские лучи применяются для проецирования анатомических картин прямо в мозг студентов. Член законодательного собрания в Нью-Джерси Рид 19 февраля 1896 года внес законопроект, запрещающий из этических соображений использовать рентгеновские лучи в театральных биноклях. Раздраженная ситуацией лондонская “Пэл Мэл газет” писала в передовой: “Самое лучшее, что нужно сделать цивилизованным странам – это объединиться и сжечь все рентгеновские лучи, а оборудование утопить в океане. Пусть рыбы разглядывают свои кости”. Многие жители Германии в письмах непосредственно к К. Рентгену просили его прислать рентгеновские лучи по почте.

Однако, несмотря на подобное отношение обывателя к новому открытию, интенсивность работ, связанных с ИИ, постепенно нарастала, и трагический опыт первого поколения исследователей не пропал даром. Началась разработка мероприятий по защите от радиационной опасности. Наряду с этим приступили к изучению биологического действия ионизирующих излучений на живую материю.

К настоящему времени масштабы использования источников ИИ и ядерной энергии неизмеримо выросли по сравнению с начинаниями, имевшими место в начале века. Сейчас трудно указать сферу человеческой деятельности, в которой бы в той или иной мере, прямо или косвенно не использовались ионизирующие излучения и радиоактивные изотопы.

Рентгенотерапия

Приблизительно до 1950 года дистанционная лучевая терапия внешним пучком проводилась рентгеновскими лучами, образующимися при напряжении до 300 кВ. Но впоследствии в 50–60-х годах успехи в создании установок с более высокой энергией пучка и возросшая популярность радиоактивных источников ^{60}Co привели к постепенному отказу от обычных низкоэнергетических киловольтных установок, хотя полностью они не исчезли. Термин ортовольтная терапия (или глубокая терапия) применяется для описания облучения рентгеновскими лучами, образующимися при ускоряющих потенциалах от 150 до 500 кВ. Максимум дозы расположен вплотную к поверхности кожи, а 90 %-я доза – на глубине около 2 см. Таким образом, кожа подвергается наиболее сильному воздействию излучения даже в тех случаях, когда не является мишенью. Существуют и другие недостатки ортовольтного облучения: высокая поглощенная доза в кости и увеличение рассеяния в костной ткани, что делает его неприемлемым для облучения опухоли, расположенной за костью.

Несмотря на это, ортовольтная рентгенотерапевтическая аппаратура продолжает играть определенную роль при облучении поверхностно расположенных опухолей, поскольку дозное распределение низковольтного рентгеновского излучения при некоторых формах поверхностного рака более рационально, чем электронов, и, кроме того, исключается возможность использования дорогостоящего времени ускорителей. Так, при лечении опухолей кожи и век короткофокусная рентгенотерапия применяется в 80 % случаев.

Радионуклидная дистанционная γ -терапия

Использование радиоактивных источников γ -квантов в дистанционной лучевой терапии в настоящее время имеет широкое распространение. В мире количество установок с использованием естественных радиоактивных источников составляет десятки тысяч. На этих установках проходят курс лечения сотни тысяч онкологических больных еже-

годно. В дистанционной терапии в качестве источников гамма-лучей использовались такие радионуклиды как ^{226}Ra , ^{137}Cs , ^{60}Co . Однако из всех источников самым подходящим для лучевой терапии внешними пучками оказался ^{60}Co , при распаде которого образуется два фотона с энергией 1,17 и 1,33 МэВ. Его преимуществом перед радиевым и цезиевым источниками является прежде всего возможность получать более высокую удельную активность (кюри/грамм), а также высокая средняя энергия фотонов. Максимум дозы при использовании гамма-излучения ^{60}Co сдвинут с поверхности тела вглубь на 0,5 см, что уменьшает облучение кожи. Источник ^{60}Co получают путем облучения нейтронами из реактора стабильного изотопа ^{59}Co в реакции $^{59}\text{Co} (n, \gamma) ^{60}\text{Co}$. Он представляет собой сплошной цилиндр диаметром 1–2 см., диск или пластинку, упакованную в две сварные или герметизированные капсулы из нержавеющей стали. Располагается источник в корпусе или головке гамма-установки, из нижней части которой выходит пучок. В настоящее время в клиниках широко применяются гамма-терапевтические аппараты с ^{60}Co активностью порядка 5000 Ки, позволяющие осуществлять различные геометрии и режимы облучения. Дистанционное облучение может быть статическим или подвижным. Статическое облучение производится через одно или несколько входных полей на коже пациента и называется соответственно однопольным или многопольным. Многопольное облучение позволяет уменьшить дозу на поверхностных тканях. При проведении подвижного облучения источник все время движется вокруг пациента, оставаясь при этом «наведенным» на патологический очаг. Преимуществом этого метода является еще более значительное снижение дозы в окружающих здоровых тканях. Однако общий объем облучаемых тканей, а следовательно, и интегральная поглощенная доза при подвижном облучении возрастают. Наиболее распространены три способа подвижного облучения: ротационное (источник перемещается по окружности с центром в мишени и применяется при глубоко расположенных опухолях), секторное (источник перемещается по дуге в пределах выбранного угла), касательное (пучок направлен по касательной к телу больного, проходя под его поверхностью на небольшой глубине и применяется при плоских поверхностно расположенных опухолях большой протяженности). Гамма-излучение радиоактивного кобальта наиболее широко используется при лечении рака молочной железы, мочеполовой системы, головы и шеи.

Терапия высокоэнергетичными фотонами.

В ускорителях электронов – линейных, бетатронах и микротронах получают пучки электронов высоких энергий. Эти пучки используются либо непосредственно для облучения, либо их «сбрасывают» на тормозную мишень, в которой образуется пучок тормозных фотонов, имеющий спектр сложной формы, называемый тормозным.

При энергии фотонов 20–25 МэВ максимум ионизации приходится на глубину 3–5 см. При этом ткани, находящиеся перед указанным максимумом получают не более половины дозы. Недостатком данного вида излучения является сравнительно медленный спад дозы.

В настоящее время при выборе вида источника излучения предпочтение отдается аппаратам, генерирующим высокоэнергетические фотоны и электроны, т.е. различного вида ускорительным системам (бетатронам, микротронам, линейным ускорителям). Это обусловлено известными преимуществами последних перед гамма-терапевтическими установками: уменьшением полутени, возможностью изменения энергии фотонов, снижением радиационной опасности для медицинского и инженерного персонала и отсутствием необходимости захоронения радиоактивных источников.

Энергия используемого излучения зависит от локализации опухоли. Так, тормозное излучение с энергией 4–6 МэВ наиболее широко используется при опухолях головы и шеи (55 %), лимфомах (60 %), центральной нервной системы (70 %); а с энергией 8–25 МэВ – при новообразованиях костей (50 %), мочеполовой системы (75 %), желудочно-кишечного тракта (95 %), легкого (90 %) и женской половой сферы. При глубоко расположенных опухолях применяют облучение с двух или более входных полей пучками, пересекающимися в области мишени. При этом очаговая доза оказывается гораздо выше поверхностной.

При некоторых формах злокачественных заболеваний (например, при лимфогрануломатозе) применяют тотальное облучение высокоэнергетичными фотонами всего тела.

Терапия пучками электронов

Помимо γ -квантов в некоторых случаях, прежде всего при облучении поверхности, используются и непосредственно пучки электронов. На выходе из ускорителя электронный пучок представляет собой тонкий луч диаметром около 3 мм. Он направляется на рассеивающую фольгу для равномерного облучения мишени.

Наиболее эффективны электроны с энергиями от 4 до 20 МэВ. Они имеют среднюю длину свободного пробега 2–6 см, испытывают большое количество столкновений из-за их небольшой массы, что приводит к большому углу рассеяния пучка электронов в веществе. Распределение дозы таких пучков, достигнув максимума, спадает существенно быстрее, чем доза γ -квантов, что позволяет избежать облучения ниже расположенных здоровых тканей. Электроны используют в тех случаях, когда проникновение луча в ткань должно быть ограничено несколькими сантиметрами (< 5 см). Максимум дозы, поглощенной в теле пациента, находится не на поверхности, а смещен вглубь на 0,1–2,5 см. Этого оказывается достаточно для того, чтобы кожа не получила ожог при облучении. Пучки ускоренных электронов применяют при лечении неглубоко залегающих опухолей, рака кожи и губ; при облучении грудной клетки при раке груди. К специальным методикам использования электронов в лучевой терапии относятся подвижное облучение электронами, интраоперационная лучевая терапия, методика тотального облучения кожи. Подвижное облучение проводится при перемещении источника по дуге, изоцентр которой расположен на некоторой глубине в теле пациента. При подвижном облучении максимум дозы смещается на большую глубину по сравнению со статическим пучком той же энергии, уменьшается доза на поверхности. Объясняется это тем, что при подвижном облучении области, расположенные глубже в ткани и, следовательно, ближе к изоцентру, облучаются в течение более длительного времени, чем лежащие ближе к поверхности. Эти эффекты становятся более выраженными с увеличением энергии электронов.

Интраоперационная лучевая терапия – это метод лечения онкологических больных однократным подведением высокой дозы, когда доступ к мишени обеспечивается хирургическим путем и облучается либо сама опухоль, либо ложе после ее удаления. В операционную рану пациента в стерильных условиях вставляют специальный пластиковый или металлический тубус, который соединяется другим концом с облучающей головкой. Тубусы не только формируют поле облучения, но и экранируют от первичного излучения ткани и органы, находящиеся вне тубуса. Формировать поле интраоперационного излучения можно также с помощью аппликаторов. Для тотального облучения кожи используют электроны энергиями 2–9 МэВ. Таким образом, возможно адекватное облучение опухоли кожи с глубиной залегания не более 1 см. При различных типах кожных лимфом тотальное облучение можно проводить либо подвижным способом, либо облучать стоящего пациента несколькими большими полями при расстоянии от источника до поверхности от 2 до 6 метров.

Протонная терапия

Тяжелые заряженные частицы в поглощающей среде тормозятся главным образом из-за ионизационных потерь. Скорость потерь энергии пропорциональна квадрату заряда частицы и обратно пропорциональна квадрату ее скорости. Таким образом, с увеличением глубины проникновения энергетические потери на единицу пути тяжелых ионов и протонов (то есть поглощаемая веществом доза) увеличиваются и дают в конце пробега острый максимум – пик Брэгга. Зависимость энергетических потерь заряженной частицы от длины пробега носит название кривой Брэгга. Спад дозы от 90 % до 20 % может осуществляться на дистанции 3–5 мм. Из-за наличия пика Брэгга и небольшого по сравнению с электронами рассеяния протоны имеют преимущество в радиотерапии: возможность концентрации дозы внутри объема мишени, в конце пробега частицы, и минимизации дозы в окружающих здоровых тканях. Использование в клинике протонных пучков основано только на преимуществе их распределения дозы. Относительная биологическая эффективность (ОБЭ) пучков протонов примерно такая же, как и у γ -излучения. Большое преимущество протонная терапия имеет при лечении опухолей, прилегающих к особо чувствительным к ионизирующему излучению органам (головному и спинному мозгу, сетчатке глаза и т.д.). Типичные энергии протонов в пучках, используемых для лечения, составляют 150–250 МэВ. Для облучения опухоли на всю ее глубину необходимо модифицировать острый пик Брэгга в равномерное в некоторой области распределение, т.е. облучать больного пучком протонов с набором энергий. Это достигается с помощью специальных фильтров, установленных на пути пучка. Обычно используют гребенчатые, вращающиеся, спиральные и другие фильтры. Принцип их действия сводится к преобразованию исходного моноэнергетического пучка в пучок с широким энергетическим спектром. Подбором соответствующих параметров можно добиться ширины и равномерности “плато” с заданной точностью. При прохождении пучка протонов внутри пациента на его пути встречаются различные неоднородности: сосуды, полости, кости и другие. При этом искажается фронт пучка, а также равномерность распределения дозы. Одним из способов борьбы с этим эффектом является использование болуса – специального компенсатора неоднородностей, устанавливаемого непосредственно перед пациентом. За последние годы был получен большой опыт лечения больных протонами главным образом в области онкоофтальмологии (почти 55 % случаев), радионейрохирургии (25 % случаев), которые составляют лишь 5–7 % в структу-

ре онкологической заболеваемости. Имеется также небольшой опыт лечения больных с опухолями простаты, шейки матки, легких и некоторыми другими. Это лечение проводилось более чем в 20 лечебных центрах мира, в том числе и трех российских центров (ИТЭФ, Дубна, Гатчина), созданных на базе ускорителей, действующих в научных центрах. В настоящее время методы лечения с помощью протонов находят все большее применение. Планируется расширить сферу использования протонной лучевой терапии (ПЛТ) до 24–27 % от всей структуры онкологической заболеваемости. Дальнейшие перспективы этого метода связаны с нарастающим процессом создания специализированных госпитальных центров протонной лучевой терапии.

«Повышение эффективности и снижение стоимости лечения рака сегодня доказаны» – сказал Дж. Слатер, директор протонного центра Лома Линдс (LLPТC), приветствуя пациентов, собравшихся в ноябре 2000 г. в Лома Линдс на 10-летний юбилей этого центра. – Наша система лечения протонным излучением успешна, хотя и остается младенческой в конечном счете».

В 1991 г. одним из них стал упомянутый выше создатель LLPТC Ф.Ливдал, у которого был диагностирован рак простаты. Он также стал первым пациентом, подвергнутым лучевой терапии в этом центре в связи с такой формой рака. В возрасте 77 лет выздоровевший Ливдал присутствовал на юбилее LLPТC. Среди разновидностей злокачественных новообразований рак простаты у граждан США занимает второе место (после рака легких), в 1999 г. их насчитывалось 180 тыс. чел., такие больные составляют около половины пациентов, подвергнутых успешной протонной терапии в Лома Линдс.

Нейтронная терапия

Подобно рентгеновским и γ -лучам, нейтроны являются косвенно ионизирующим излучением. Взаимодействие нейтронов с веществом происходит в результате действия двух механизмов:

- упругого потенциального рассеяния на ядре;
- ядерных реакций разных типов: радиационного захвата, реакции деления, реакции с образованием протонов или альфа-частиц и др. Распад ядер приводит к возникновению вторичных продуктов реакций: тяжелых заряженных частиц, нейтронов, γ -лучей и дает повышение дозы в мягкой ткани примерно на 30 % по сравнению с ее значением в пике Брэгга. Пучки нейтронов высоких энергий для радиотерапии получают из ядерных реакций под действием заряженных частиц на циклотронах, линейных ускорителях или дейте-

рий-тритиевых (Д–Т) генераторах, при распаде тяжелых ядер. Бомбардирующими частицами являются либо дейтроны, либо протоны, материал мишени обычно бериллий, за исключением Д–Т генераторов, в которых в качестве мишени используется тритий. В результате реакции ${}^2\text{H}+{}^3\text{H}\rightarrow{}^4\text{H}_2+{}^1_0\text{n}+17,6\text{ МэВ}$ в генераторах получают поток моноэнергетических нейтронов с энергией 15 МэВ. Нейтронные генераторы более привлекательны для терапии по сравнению с циклотронами, поскольку являются более компактными и дешевыми. Однако тритиевые мишени имеют небольшой срок службы. Используемые в терапии быстрые нейтроны – с энергией 10–15 МэВ имеют дозовое распределение, близкое к γ -квантам, оставляя большую часть энергии на входе и прилегающих тканях и низкие дозы в объеме мишени. Поэтому превалирующими осложнениями после курса нейтронной терапии являются поражения кожи. Нейтроны характеризуются низкими значениями коэффициента поглощения, в связи с чем они могут проникать в вещество на большую глубину. В отличие от других типов ионизирующего излучения число актов ионизации, вызываемых нейтронами, в значительной степени зависит от элементарного состава вещества, через которое нейтроны проходят. Это обстоятельство сильно затрудняет их дозиметрию.

Основные достоинства быстрых нейтронов, как плотноионизирующего излучения, заключаются в следующем:

- нивелировка различий в радиочувствительности отдельных стадий клеточного цикла;
- более высокий выход двунитевых разрывов ДНК при менее выраженной их способности к репарации (причинами низкой репарируемости ДНК-повреждений считают образование сшивок ДНК–ДНК, ДНК–белок в плотно упакованном хроматине);
- меньшая зависимость эффекта поражения от концентрации кислорода.

Как показали исследования, раковые клетки некоторых злокачественных опухолей, обладающих повышенной устойчивостью к радиационному облучению, разрушаются при воздействии на них пучками быстрых нейтронов. К таким опухолям можно отнести большинство медленно растущих злокачественных новообразований, таких как аденома простаты, меланомы, опухоли головного мозга, шеи, слюнных желез, карциномы гортани и т.д.

Основная проблема нейтронной терапии – плохое распределение дозы, медленно спадающее с глубиной проникновения пучка частиц,

высокие значения ОБЭ для вторичных частиц, возникающих в ядерных реакциях под действием нейтронов, а также различные осложнения, возникающие после применения курса лечения. В настоящее время разрабатывается два пути улучшения дозового распределения нейтронов.

Увеличение энергии нейтронов в пучке до нескольких десятков МэВ позволяет сместить пик максимальной дозы вглубь вещества. Второй способ улучшения распределения дозы связан с захватом медленных нейтронов ядрами бора (используется эффект резонансного захвата нейтронов). В этом методе бор внедряется в опухолевую клетку, затем облучается пучком тепловых или надтепловых нейтронов с энергией 0,025 эВ. После захвата нейтрона ядро бора расщепляется на альфа-частицу и ион лития, имеющих глубину проникновения порядка нескольких диаметров клетки (12–14 мкм). Таким образом, уничтожаются те клетки, в которые были внедрены ядра бора. Частицы одинаково дельтальны для оксигенированных, гипоксических или находящихся в стадии покоя клеток. Этот метод лечения опухолей получил название нейтронно-захватной терапии на боре. Он является относительно новым и весьма эффективным методом лучевой терапии злокачественных опухолей, особенно таких, где применение обычных методов не приводит к желаемым результатам или вообще невозможно.

В настоящее время использование нейтронной терапии получило поддержку в 25 специализированных центрах мира, три из которых находятся в России (Обнинск, Томск, Снежинск).

Уральский центр нейтронной терапии представляет собой реально работающее клиническое объединение, соответствующее современным требованиям к учреждениям такого рода и оснащенное уникальным оборудованием. Уральский центр нейтронной терапии – первый в России центр, открытый в практическом лечебном учреждении и действующий на конверсионной основе.

При создании центра нейтронной терапии преследовались две основные цели:

- обеспечение эффективного метода лечения онкологических больных, пораженных опухолями, нечувствительными к лучевому лечению обычными радиотерапевтическими аппаратами и установками, в том числе линейными ускорителями;
- создание дополнительных рабочих мест для сотрудников ФЯЦ – ВНИИТФ в плане реальной конверсии.

В состав Уральского центра нейтронной терапии входят Челябинский областной онкологический центр (г. Челябинск) и Федеральный ядерный центр – ВНИИТФ им. акад. Забабахина (г. Снежинск – Челябинск-70), находящиеся в 95 км друг от друга.

В сентябре 1998 г. в плане реализации конверсионной программы были закончены работы по созданию первого в России уникального регионального центра нейтронной терапии. Теоретическое обоснование проекта было начато в 1992 г. по инициативе начальника отдела НИО-5 ВНИИТФ-РФЯЦ к.ф.-м.н. Э.П. Магды и врача-радиолога ЧООД к.м.н. А.В. Важенина.

Фотонно-нейтронная терапия применяется в клинике с 1999 г. Курс сочетанной фотонно-нейтронной терапии начинается с этапа фотонного облучения в Челябинском областном онкологическом центре с использованием гамма-терапевтических аппаратов «Рокус-М», «Агат-Р», медицинских линейных ускорителей электронов Philips SL-15 и SL-20. Нейтронная терапия присоединяется либо в конце I этапа расщепленного курса, либо после 10–14-дневного перерыва.

С сентября 1999 по 2002 гг. в клинике накоплен опыт лечения 232 пациентов, имеющих опухоли головы и шеи. Всем им проведено радикальное фотонно-нейтронное облучение. Из 232 пациентов 70,7 % составили мужчины, 29,3 % – женщины, что вполне соответствует распределению по полу при патологии этих локализаций. Большая часть больных (70,6 %) в возрасте до 60 лет. Жители Челябинска составили 77,1 %, жители области – 22,9 %. У 76 % больных злокачественная опухоль имела морфологическую структуру плоскоклеточного рака. По локализации злокачественного процесса больные распределились следующим образом: рак гортани – 40,8 %, рак полости рта – 18,5 %, рак ротоглотки – 10,2 % и др. По степени распространенности злокачественного процесса больные распределились следующим образом: с I стадией заболевания – 19,7 %, со II стадией – 25,5 %, с III стадией – 30,6 %, с IV стадией – 19,7 % и 4,5 % – без стадирования процесса. Для купирования явлений радиоэпителиита у 75 % пациентов курс нейтронной терапии проводился на фоне терапии расфокусированным лазером. Это позволило избежать острых катаральных радиоэпителиитов и выполнить запланированную программу лечения в полном объеме. Выраженные лучевые реакции (пленочный эпителиит) были отмечены в 5,7 % случаев.

При оценке непосредственных клинических результатов выяснилось, что у 40,1 % достигнута полная резорбция опухоли, резорбция более 50 % опухоли достигнута у 7% пациентов, менее 50 % – у 27,3 %. В результате проведенного сочетанного лучевого лечения в 73,3 % случаев достигнута полная ремиссия, в 6,4 % выявлены ранние рецидивы, в 10,8 % – неизлеченность процесса. В 10,4 % случаев оценить эффект от лучевой терапии не удалось из-за неявки пациентов на контрольный осмотр. Все больные с неудовлетворительными результатами лечения

имели местнораспространенный опухолевый процесс (III, IV стадии). Сроки наблюдения за пациентами составили от 2 мес. до 2,5 года. Результаты лечения аналогичных пациентов по традиционным методикам оказались в 1,5 раза хуже.

Более 20 лет прошло с тех пор, как в НИИ онкологии Томского научного центра впервые в России был открыт медико-биологический центр на базе циклотронной лаборатории НИИ ядерной физики при Томском политехническом университете для проведения лучевой терапии быстрыми нейтронами онкологическим больным. Становление нейтронной терапии проходило по определенным этапам.

Первый этап – организационный (1980–1985 гг.), включающий создание терапевтического канала быстрых нейтронов средней энергии 6,3 МэВ циклотрона У-120, проведение дозиметрических и радиобиологических исследований и клинической апробации на контингенте онкологических больных, для которых эта энергия быстрых нейтронов была достаточной.

Второй этап (1986–1990 гг.) ознаменовался проведением широкого комплекса физико-дозиметрических и радиобиологических исследований, теоретических разработок, пробных клинических исследований по изучению эффективности нейтронной и смешанной нейтронно-фотонной терапии злокачественных новообразований отдельных локализаций, приобретения собственного опыта лечения быстрыми нейтронами.

На третьем этапе (1991–1999 гг.) проводились исследования по разработке новых способов нейтронной и смешанной терапии, поиск оптимальных режимов фракционирования дозы быстрых нейтронов при комбинированных и самостоятельных методах лучевого лечения, создание комплексной программы по предупреждению и лечению острых лучевых реакций и отдаленных повреждений нормальных тканей и жизненно важных критических органов.

Онкологические больные с опухолями головы и шеи явились первой клинической моделью для изучения эффективности нейтронной терапии на циклотроне, более четырех лет применяется нейтронная терапия в комплексном лечении местнораспространенных форм рака молочной железы, в последние годы разработан метод гамма-нейтронной терапии резистентных форм мелкоклеточного рака легкого. Это дает возможность специалисту увидеть разноплановость применения быстрых нейтронов в комплексе с операцией, с противоопухолевыми препаратами.

Согласно Программе дальнейшего развития Обнинска, одобренной Правительством России, визитной карточкой этого города – первого в

нашей стране наукограда – становится ядерная медицина. Это одна из самых передовых и социально значимых отраслей современной науки и производства. На основе этой Программы ГНЦ РФ – ФЭИ им. А.И. Лейпунского, ФГУП РФ НИФХИ им. Л.Я. Карпова и МРНЦ РАМН создали совместно два некоммерческих партнерства «Центр ядерной медицины и радиофармацевтики» и «Центр нейтронной терапии».

Инициатива поддержана решением Президиума Российской академии медицинских наук. Предполагается, что со временем оба некоммерческих Центра обеспечат эффективным медицинским лечением жителей не только Калужской области, но и значительной части европейской России. Насколько это важно сегодня, свидетельствует тот факт, что в лечении нейтронами ежегодно нуждаются только в одной нашей стране около 50 тысяч онкологических больных.

Своевременная помощь таким людям, попавшим в беду, – одна из главных государственных и научно-практических задач во всех цивилизованных странах. Ведь чаще, чем от рака, умирают только от сердечно-сосудистых заболеваний. Нейтронная терапия занимает свою особую нишу в лечении опухолей головы и шеи, слюнных желез, костных сарком, рака молочной железы. В некоторых тяжелых случаях этому методу просто нет альтернативы.

Нейтронные пучки для лучевого лечения онкологических больных начали использовать еще 70 лет назад. Но первые такие попытки были быстро приостановлены из-за тяжелых лучевых повреждений нормальных тканей. Сегодня таких негативных последствий удастся избежать. Свою лепту в решение этой проблемы внесли ученые Центра, доказавшие преимущества использования смешанного гамма-нейтронного излучения по сравнению с «чистым» нейтронным воздействием. Врачи по их рекомендациям применяют точно выверенные комбинации смешанных излучений – в определенном соотношении по поглощенной дозе.

Как правило, вклад нейтронов при смешанной гамма-нейтронной терапии в суммарную очаговую дозу не превышает 20–30%. При таких условиях кожа и здоровые ткани повреждаются не более, чем при одном только фотонном воздействии, а противоопухолевая эффективность возрастает на 15–40 %. Это позволяет более надежно излечивать и первичный очаг злокачественных новообразований, и их метастазы. Кроме того, в ряде случаев после предварительного облучения появляется возможность прооперировать опухоль. В эффективности такого подхода убедились более 500 пациентов, которые пролечились с помощью смешанной гамма-нейтронной терапии на медицинском канале ядерного реактора БР-10 ГНЦ РФ – ФЭИ. Многие из них преодолели порог 5-летней выживаемости.

Обновление радиационного оборудования для лечебных целей.

В ближайшее время необходимо соорудить высокотехнологический медицинский комплекс на реакторе ВВЭР обнинского ФГУП РФ – НИФХИ им. Л.Я. Карпова. Он заменит медицинский блок, который функционировал на базе реактора БР-10, исчерпавший свои ресурсы. Физики продолжают сотрудничать с медиками, помогая сейчас в создании терапевтических нейтронных пучков для дистанционной и нейтронно-захватной терапии на ускорителе КГ-2,5. Каналы для лечения онкологических больных закладываются также на новых проектируемых установках, например «Рута», и жидкотопливных атомных реакторах.

В МРНЦ РАМН проходит предклинические испытания импульсный нейтронный генератор (серия ИНГ-031), созданный в Московском ВНИИ автоматики на конверсионной основе. Диаметр этого генератора всего 15 см, а длина меньше метра. Прототипом его послужило миниатюрное устройство, применяемое ранее при испытании ядерных зарядов. Онкологи надеются, что московская новинка поможет им добиться более строгой избирательности в радиационном воздействии на опухоль.

Среди закрытых источников излучений, применяемых в ядерной медицине, особенно хорошо зарекомендовал себя калифорний-252. Он показал свою высокую эффективность при терапии первичных и рецидивных злокачественных опухолей слизистой оболочки дна полости рта, языка, щеки, красной каймы губ, кожи и мягких тканей. Лечебное воздействие этого радионуклида в ряде случаев превосходит хирургический и другие методы лечения онкологических заболеваний.

В настоящее время доклинические испытания проходят микроисточники на основе йода-125. Они предназначены для внутритканевой радиотерапии больных раком предстательной железы. Радиоактивный изотоп йода вводится в опухоль внутри герметичных микрокапсул, которые после полного распада радионуклида остаются в предстательной железе, не создавая неудобств пациенту и не оказывая отрицательного влияния на его организм в целом. Такая современная радиационная технология может сочетаться с уже апробированными методами не только для лечения рака предстательной железы. Она пригодна и для терапии опухолей других локализаций: легкого, поджелудочной железы, влагалища, тела и шейки матки, опухолей головного мозга.

В Обнинске разрабатывается также новый тип радиоактивных микроисточников с ограниченным «пробегом» излучения в ткани на основе палладия-103. Этот тип микроисточников, по сравнению с аналогичными на основе йода-125, создает меньшую лучевую нагрузку на пациента

и медицинский персонал. Снижение такой нагрузки очень важно, поскольку радионуклидные методы диагностики и терапии все шире используются, помимо онкологии, в кардиологии, неврологии, пульмонологии, нефрологии, гастроэнтерологии и гематологии.

К сожалению, по обеспеченности населения услугами радионуклидной терапии Россия далеко отстает от развитых стран. Так, например, в ФРГ на одну специализированную койку приходится 153 тыс. жителей, в России же этот показатель равен 6,7 млн. человек на одну койку. Лучше, чем у нас, положение даже в Португалии: 4,2 млн. жителей на одну койку.

Ежегодно в радионуклидном лечении нуждаются примерно 50 тысяч россиян, в том числе около 4000 больных раком щитовидной железы, 2500 – с тиреотоксикозом, 14000 – с иными онкологическими заболеваниями, 7000 – с заболеваниями опорно-двигательной системы. Фактически же эта помощь оказывается только 2000 больным ежегодно.

Основная нагрузка по лечебному применению РФП в нашей стране ложится на клинику МРНЦ РАМН. За последние 10 лет в Обнинске пролечено, например, более шести тысяч больных раком щитовидной железы. Дальнейший прогресс в радионуклидной терапии сегодня связывают с появлением генераторов рения-188, актиния-225, висмута-213 и реагентов к ним, приготовленных на основе моноканальных антител, пептидов гликопротеинов, олигонуклеотидов.

Радиоактивный йод лечит мужчин

В Обнинске, на базе Медицинского радиологического научного центра РАМН, создан Центр брахитерапии рака предстательной железы. Это одно из самых распространенных онкологических заболеваний у мужчин старше 50 лет, а по темпам прироста оно опережает все другие локализации.

К сожалению, в России его удается выявить на ранних стадиях лишь в 14–15% от всех случаев рака предстательной железы. Только определение опухолевого маркера (простатического специфического антигена, ПСА) может помочь обнаружить его своевременно. Но и тогда пациенту предстоит перенести или сложную операцию со значительной кровопотерей, или дистанционную лучевую терапию с возможным поражением окружающих опухоль здоровых органов и тканей. В обоих случаях требуются большие сроки госпитализации и есть риск развития импотенции и недержания мочи.

Перелом в лечении этого заболевания внесла брахитерапия. Она представляет собой разновидность радиотерапии, когда микроисточни-

ки излучения на основе йода-125 вводятся непосредственно в опухоль через специальные иглы. Обычно их бывает 60–90 в зависимости от объема предстательной железы. Уролог заранее определяет этот объем и размер опухоли. Исходя из его расчетов медицинский физик устанавливает, сколько необходимо микроисточников и где их лучше расположить в пораженном органе, чтобы добиться его равномерного облучения.

Процедура имплантации проводится в операционной под общим наркозом и длится чуть более часа. Она хорошо переносится даже пожилыми людьми с тяжелыми сопутствующими заболеваниями, проходит практически без осложнений и дает высокий процент выздоровлений и в случаях, когда процесс уже сильно распространен. Это особенно важно при рецидивном раке предстательной железы.

После удаления игл микроисточники остаются в пораженном органе, обеспечивая нужный уровень радиоактивного излучения в течение нескольких недель или месяцев. Йод-125 имеет период полураспада 60 дней, обычно рекомендованная минимальная доза не превышает 140–160 Гр. При этой процедуре концентрация облучения внутри опухоли в 2–3 раза выше, чем при дистанционной лучевой терапии, использующей более низкие дозы из-за опасения повредить здоровые ткани.

Микроисточник герметичен, поэтому безопасен и для пациента, и для медицинского персонала. Нет необходимости и в специальном обустройстве палат, канализации и других повышенных мерах радиационной безопасности. Пациент может выписаться из клиники на следующий день после имплантации и вскоре приступить к своей привычной деятельности.

Американский профессор П. Кутревелис, возглавляющий Институт урорадиологии в Вашингтоне, разработал и запатентовал технологию брахитерапии под контролем компьютерной томографии. Эта уникальная технология применяется в шести клиниках мира. Первым в нашей стране эффективным новшеством заинтересовался директор Медицинского радиологического научного центра РАМН академик А.Ф. Цыб. Более пяти лет назад, будучи в командировке в США, он познакомился с профессором П. Кутревелисом и пригласил его в Обнинск. С этого приглашения и началось сотрудничество российских и американских урологов, которое привело к созданию Центра брахитерапии рака предстательной железы в первом наукограде РФ.

Вначале врачи клиники МРНЦ РАМН освоили операции по новой технологии под контролем ультразвука. Для этого они прошли подготовку в Берлине, где находится самый крупный в Европе Центр брахитерапии, под руководством профессора А.Хенкеля и Ф. Хакмана. Про-

шлой весной немецкие специалисты провели в Обнинске показательные операции по имплантации микроисточников, во время которых им ассистировали их молодые российские коллеги. Они получили от своих маститых учителей право самостоятельно осуществлять эту высокотехнологичную процедуру и уже успешно прооперировали более 20 пациентов.

Но брахитерапия под ультразвуковым контролем имеет ряд противопоказаний: большие размеры предстательной железы, конкременты в ней, распространение злокачественного процесса на семенные пузырьки и т.д. Такие ограничения устраняются, когда операция проводится под контролем спиральной компьютерной томографии. Это уникальное дорогостоящее оборудование недавно стало применяться и в Обнинске. С января оно будет регулярно задействовано в клинике МРНЦ РАМН при внедрении российским пациентам радиоактивных микроисточников в опухоль простаты.

Именной сертификат, дающий право делать такие операции, руководитель Обнинского международного центра брахитерапии рака предстательной железы П. Свиридов получил из рук профессора П. Кутревелеса. Они провели совместно шесть операций в Вашингтоне, Афинах и Обнинске.

По мнению П. Свиридова, теперь в нашей стране у мужчин, страдающих злокачественным заболеванием простаты, появилось больше шансов на выздоровление. Ведь брахитерапия под контролем компьютерного томографа позволяет, кроме всего прочего, проводить биопсию семенных пузырьков. Это очень важно для правильной постановки диагноза и точного определения распространенности рака предстательной железы, без чего невозможно его успешное лечение.

В настоящее время в Обнинске создается производство отечественных микроисточников для брахитерапии. Эта работа ведется с участием ведущих научных Центров города в рамках Программы его развития как наукограда.

В НИИ физики и химии имени Карпова начато серийное производство таблеток, излечивающих онкологические заболевания. Таблетки помещают в ядерный реактор, облучают и дают «остыть» несколько дней. Облученное вещество, концентрируясь в опухоли и метастазах, начинало их разрушать изнутри. За весь курс лечения организм получает дозу, которая в несколько раз слабее, чем при одном рентгенологическом обследовании. Медики считают, что за этим лекарством огромное будущее. Рак – только одна из болезней, которая будет лечиться этими таблетками.

Уникальная операция проведена итальянскими хирургами и физиками впервые в мире. Печень пожилого мужчины, в которой обнаружили 14 злокачественных опухолей, лечили вне тела пациента. Дело в том, что такие новообразования не поддаются традиционным способам онкотерапии.

Суть нового метода в следующем. В пораженный орган вводят атомы бора. Их очень интенсивно поглощают раковые клетки, так как растут быстрее нормальных. Затем орган облучают пучком нейтронов, которые расщепляют бор на элементарные частицы. А вот уже они убивают раковые клетки. Красиво, но реализовать крайне сложно. Во-первых, количество нейтронов должно быть одинаковым для всего органа, а этого добиться непросто. Во-вторых, высокую дозу радиации получают окружающие орган ткани.

Поэтому итальянские хирурги пошли на беспрецедентный шаг – «изъяли» печень и облучили ее в ядерном реакторе. А затем вернули на место, как при обычной трансплантации. С момента операции, длившейся 21 час, прошел год. Печень работает нормально, обследование не зафиксировало никаких признаков опухолей. Новый метод можно будет применять для лечения органов, которые в принципе поддаются пересадке, например легких или поджелудочной железы.

6.1.2. Радионуклидная диагностика

Радионуклидная диагностика – это диагностика заболеваний и функционального состояния организма человека с использованием радионуклидов или меченых ими химических соединений.

Допущенные к клиническому применению радионуклиды и меченые соединения называют радиофармацевтическими препаратами (РФП). В качестве РФП используют такие радионуклиды и соединения, поведение которых в организме отражает состояние его органов и функциональных систем. В РФП используют ничтожно малые в весовом отношении количества радионуклидов, которые получили наименование индикаторных количеств и не нарушают нормального течения физиологических и биохимических процессов в организме человека.

Чаще всего используют внутривенное введение РФП. При этом препарат первоначально равномерно распределяется с кровью по всему

организму, а затем начинает концентрироваться в отдельных (критических) органах.

Методы радионуклидной диагностики в зависимости от целей исследования пациента осуществляются с помощью различных приборных комплексов. Так при радиометрии определяют радиоактивность части тела (органа), находящейся в поле зрения детектора радиодиагностического прибора. Это позволяет установить количество радионуклида, заключенного в исследуемом участке.

С помощью радиографии изучают динамику радиоактивности в части тела (органа) и таким образом судят о сроках накопления и выведения радионуклида. С помощью таких исследований судят, например, о движении крови по камерам сердца и по сосудам, о некоторых функциях печени, легких и почек.

Гамма-топография дает возможность изучить распределение радионуклида в органе. По полученным изображениям можно судить о локализации, величине и положении органа и распределении в нем здоровой функционирующей части (паренхимы) органа. Голограммы дают возможность обнаружить патологические очаги в органе и тем самым определить его функциональное состояние.

Разработаны радионуклидные методы исследования, при которых радиоактивный изотоп не вводится в организм человека. В этом случае исследуется взаимодействие РФП с составными частями биологических сред организма. Использование этих методик позволяет определить и количественно оценить гормональный профиль больного, а также исследовать ряд биохимических показателей.

Для клинических исследований можно применять только радиоактивные препараты, использование которых разрешено фармакологическим комитетом здравоохранения РФ. Производится тщательный отбор из большого числа вновь создаваемых РФП. Так, из более чем 1500 искусственно получаемых радионуклидов в клиническую практику вошло сравнительно немного: около 60 радионуклидов и около 100 меченых соединений.

Для обеспечения безопасности пациента при использовании радионуклидов к ним предъявляются специальные требования. Во-первых, необходимо чтобы РФП, включаясь в обмен веществ или переносясь с током жидкости организма, отражал бы какую-нибудь функцию организма или отдельного органа. Другими словами, использование радионуклида должно быть физиологически обосновано. Во-вторых, РФП должен создавать в организме обследуемого минимально возможную лучевую нагрузку. Наиболее приемлемы РФП, которые имеют период полураспада от 6–24 часов до 10–30 дней. За этот срок при вводимых

активностях изотопа не происходит значительного облучения тканей, и вместе с тем можно изучить физиологические функции организма. Естественно, что вводимые внутрь препараты не должны содержать радиоактивных веществ, которые в процессе распада образуют долгоживущие дочерние продукты.

Наибольшее применения получили гамма-излучающие нуклиды. Гамма-излучение частично поглощается в тканях, а частично проникает наружу и может быть зарегистрировано с помощью специальных приборов.

Широкое распространение в радионуклидной диагностике получили радионуклиды: технеций-99 (распознавание опухолей головного мозга, изучение центральной и периферической гемодинамики, исследование щитовидной железы, костной системы и др.); йод-131 и его соединения (исследование йодного обмена, функции печени, почек); хром-51 – в гематологии; натрий-24, калий-42, рубидий-86, бром-82 – для изучения водносолевого обмена; коллоидные растворы технеция-99, золота-198, йода-131, индия-111 и др. (исследование печени, легких, головного мозга); газообразный радионуклид ксенон-133 (исследование функции легких, центральной и периферической гемодинамики, уровня блокады субарахноидального пространства спинного мозга); соединения, меченные селеном-75 и технецием-99, – в онкологии, натрий-24 – при диагностике сердечно-сосудистых заболеваний и т.д.

Для повышения эффективности радионуклидных исследований постоянно совершенствуется техническая аппаратура. Для целей диагностики с помощью радионуклидов и ионизирующего излучения используются такие приборы и установки, как сканеры, гамма-камеры, радионуклидные (эмиссионные) и рентгеновские томографы.

Сканеры обеспечивают визуализацию распределения в организме РФП. Для этого детектор прибора построчно обходит исследуемую часть тела с заранее установленной скоростью.

В отличие от сканеров, гамма-камеры позволяют одновременно получить информацию о распределении РФП в органе.

Если гамма-голограмма представляет собой плоскостное изображение, то с помощью рентгеновского компьютерного томографа можно получить расположение анатомической структуры тела человека в трехмерном пространстве.

Томографическая техника может быть применена и при радионуклидной диагностике. Она несколько хуже по разрешающей способности по сравнению с рентгеновским компьютерным томографом, но зато обладает важной способностью улавливать распределение РФП в разных частях исследуемого органа. Разработаны два типа радионуклидной то-

мографии: однофотонная эмиссионная компьютерная томография (ОЭТ) и позитронная эмиссионная компьютерная томография (ПЭТ). ПЭТ – это метод исследования функционального состояния тканей человека с помощью радионуклидов, испускающих позитроны. В ПЭТ применяются две группы радионуклидов:

1. Ультракороткоживущие (кислород-15, азот-13, углерод-11, фтор-18). Достоинство этих РФП заключается в том, что они представляют собой фундаментальные компоненты биологических соединений. Из-за короткого времени жизни их можно применять только в месте получения – на медицинских циклотронах.

2. Короткоживущие. В большинстве своем это соединения, меченные галлием-68.

ПЭТ – уникальный способ радионуклидного исследования, поскольку он позволяет получить очень точные сведения о локализации РФП в организме.

Радионуклидные исследования в последние годы получили столь широкое распространение и развитие, что их справедливо относят к ведущим методам инструментальной клинической диагностики. Метод радиоизотопов в медицине позволяет решать самые неожиданные задачи и отвечать на самые невероятные вопросы.

Например, при диагностике сердечно-сосудистых заболеваний очень важно знать общее количество крови в организме, скорость кровотока и объем кровотока в единицу времени. Важно потому, что эти параметры являются чувствительными индикаторами заболевания. Эти задачи успешно решаются с помощью применения радиоактивных изотопов (например натрий-24). Для этого в кровоток человека вводится физиологический раствор, содержащий необходимую концентрацию изотопа. Так как гамма-излучение натрий-24 можно регистрировать с помощью гамма-счетчика, появляется возможность следить за движением потока крови в теле человека. В результате можно определить время полного кругооборота крови, объем кровотока в единицу времени и вычислить полный объем крови в организме человека.

Большая серия исследований по диагностике различных заболеваний радиоизотопным методом основана на замечательной особенности организма концентрировать в своих тканях некоторые химические вещества. Известно, например, что щитовидная железа выделяет из организма и накапливает в своей ткани йод, костная ткань – фосфор, кальций и стронций, а печень – некоторые красители и т.д. При этом если орган работает нормально, то процесс накопления характеризуется определенной скоростью и количеством накопленного вещества; при нарушении же функции органа наблюдается отклонение от этого режима. На-

пример, при базедовой болезни активность щитовидной железы резко возрастает, и это сопровождается как ускорением, так и увеличением количества накапливаемого йода. Если же функция слабее нормы – это сопровождается замедлением процесса накопления йода и уменьшением его количества в щитовидной железе. За всеми этими особенностями накопления йода удобно следить с помощью его гамма-радиоактивного изотопа. Если ввести в организм радиоактивный йод-131, то он уже через несколько минут начнет накапливаться в щитовидной железе. Регистрируя счетчиком гамма-излучение изотопа, можно определить функциональное состояние щитовидной железы.

Тот же радиоактивный йод применяется для исследования функции печени, если им пометить специальный органический краситель. За всеми особенностями работы печени опять-таки можно проследить с помощью гамма-счетчика, расположенного над поверхностью печени.

Радиоактивные изотопы йод-131, фосфор-32, золото-198 и др. используют для выявления злокачественных опухолей в различных органах.

Радиоактивный фосфор используют в диагностике опухолей, расположенных вблизи от поверхности тела, так как испускаемые им бета-частицы имеют средний пробег в ткани 3 мм.

Йод-131 и золото-198 испускают гамма-лучи, легко пронизывающие ткани человеческого тела, поэтому они используются в диагностике опухолей внутренних органов. Диагностика злокачественных опухолей основана на том, что клетки опухоли иначе накапливают радиоактивный препарат, по сравнению с клетками здоровой ткани.

Метод меченых атомов, который, по сути дела, является основой радионуклидной диагностики, применяется и для решения некоторых других задач медицинского характера. Так, метод внес существенный вклад в борьбу с отравлениями. Он позволяет проследить пути ядовитого вещества в организме, особенности его вредного действия и способы выведения его из организма. В результате таких исследований были найдены эффективные и быстрые способы выведения различных токсических веществ из организма.

Для терапии рака печени в последнее время с успехом применяют препарат, который представляет собой микросферы диаметром до 35 микрон и готовится на основе ^{90}Y ($T^{1/2} \sim 64$ ч), являющегося чистым бета-излучателем. Пациенту вводится 3 ГБк этого препарата, через 14 суток его активность снижается до 2,5 % первоначальной. Средний пробег бета-частиц в ткани составляет 2,4 мм.

В Австралии к радиотерапии с применением радионуклидов вынуждены обращаться до 150 пациентов каждую неделю. Четыре радио-

нуклида – ^{99m}Tc , ^{67}Ga , ^{201}Tl и ^{131}I – обеспечивают более 95 % всех ядерных процедур.

В настоящее время ведутся исследования по получению новых РФП для лечения и диагностики онкологических заболеваний, болезней сердца, болезней Альцгеймера и Паркинсона, шизофрении. Множество новых РФП для диагностических и терапевтических целей проходят клинические испытания. Ядерная медицина Австралии оказывает одну из самых давних и наиболее надежных услуг в мире, и это безусловно связано с собственным производством медицинских радионуклидов, начавшимся в Лукас Хайтсе в 1960 г. Широко распространенное сегодня клиническое использование почти 100 различных РФП обеспечивает уникальную информацию относительно каждой жизненно важной системы или органа пациента. В настоящее время во всем мире работают 150–200 циклотронов. Около 35 из них используются радиофармацевтическими компаниями исключительно для производства медицинских радионуклидов, еще 25 для этих же целей – частично. Если в конце 80-х гг. шутили, что медицинских циклотронов нет только на двух континентах – в Антарктиде и Австралии, то в начале 90-х гг. в Австралии были построены уже два медицинских циклотрона. Один из них (NMG) был установлен в Королевском госпитале принца Альфреда (КРАН) в Сиднее и начал работать в 1992 г. Этот циклотрон, ускоряющий протоны до 30 МэВ, был закуплен в Бельгии. Затраты на создание центра по производству радионуклидов составили 20 млн долл. NMC работает 100 часов в неделю и 90 % времени производит долгоживущие радионуклиды (^{201}Tl , ^{67}Ga , ^{123}I , ^{18}F) для коммерческих поставок внутри страны и за рубеж; 10 % времени идет на производство радионуклидов ^{11}C , ^{13}N и ^{15}O для позитронной эмиссионной томографии (ПЭТ) госпиталя КРАН. Это позволило почти сразу удовлетворить высокую долю внутреннего спроса на ^{67}Ga и полностью обеспечить потребность в ^{201}Tl на рынке Австралии, хотя некоторые количества Tl все еще поставляют зарубежные радиофармацевтические компании. В стадии разработки находится производство ^{111}In . Ведется создание полностью автоматизированного способа получения ^{64}Cu для ПЭТ. Число ежегодных исследований с применением ПЭТ в КРАН превышает 1200. Объем продажи циклотронных радионуклидов устойчиво расширяется и еще в 1995 г. составил более чем 2,7 млн долл., что было на 14 % больше, чем в течение предыдущего года.

Каждый год в Австралии, где население составляет около 19 млн чел., выполняют приблизительно 430 тыс. ядерно-медицинских процедур с применением радионуклидов, и число таких процедур быстро увеличивается. ANSTO в настоящее время ежегодно производит около 350

тыс. доз реакторных РФП для диагностических и терапевтических целей. По оценке, ежегодная экономическая выгода от их применения достигает 8–10 млн долл. и, как ожидается, увеличится к 2005–2006 гг. до 27–32 млн долл. Эти цифры не включают экономическую выгоду, являющуюся результатом спасенных жизней, усовершенствования качества жизни и минимизации пребывания в больнице.

По данным ANSTO, потребление радионуклидов в ядерной медицине Австралии возрастает, как и в США, на 14 % ежегодно. Ожидают, что в 2007 г. число проведенных с их применением процедур будет составлять уже 1,5 млн. Ожидают также, что региональный рынок для радионуклидов через десять лет составит 150 млн дол. Это свидетельствует о том, что применение ядерной медицины расширяется и большинство австралийцев будут использовать РФП для ранней диагностики заболеваний или лечения различных болезней.

В системе здравоохранения США радионуклиды используют как обязательный компонент при диагностике (до 40 тыс. процедур ежедневно, или около 13 млн/год), лабораторных тестах (100 млн тестов/год) и терапии (50 тыс. терапевтических доз/год) многих заболеваний человека. За последние 20 лет потребление радионуклидов для этих целей резко выросло. Приблизительно третья часть всех обратившихся за помощью пациентов в США получают процедуры, в которых используются РФП. Их проводят в каждом штате более чем в 4–5 тыс. различных лечебных учреждений США, в области ядерной медицины практикуют более 10 тыс. специалистов. Это приводит к снижению затрат на здравоохранение, сокращает сроки оказания помощи и пребывания в госпиталях, а также улучшает уровень обслуживания пациентов. Сегодня ядерная медицина США – это индустрия с годовым оборотом 7–10 млрд долл. Только от продажи радионуклидов для приготовления РФП выручают более 100 млн долл. ежегодно. Подавляющее большинство диагностических процедур проводят при щадящей дозе облучения, для чего используют короткоживущие радионуклиды – ^{99m}Tc , ^{123}I , ^{82}Rb , ^{18}F и др. Федеральная администрация по продуктам и медикаментам (U.S. Food and Drug Administration – FDA) официально разрешила к использованию в медицине 13 реакторных и 11 циклотронных радионуклидов. На их основе создано 17 групп РФП, содержащих 51 различное соединение, каждое из которых имеет специфическое диагностическое применение. Существует и разрешено к применению 117 РФП, из которых 65 % составляют препараты, меченные $^{99\text{r}}\text{Tc}$. Приблизительно 90–95 % радионуклидов (по активности) производят за границами США. Основные производители расположены в Канаде, Голландии, Бельгии, Франции, ЮАР и Японии.

В США радионуклиды производят 15 организаций, среди которых пять Национальных лабораторий: Брукхейвенская, Лос-Аламосская, Ок-Риджская, Тихоокеанская и Сандийская. Некоторые из них осуществляют производство уже более 50 лет. Всего в США для нужд науки, техники и здравоохранения производится 138 радионуклидов.

Ключевым радионуклидом в ядерной медицине США является ^{99m}Tc , образующийся при радиоактивном распаде материнского Мо, который выделяют из облученного тепловыми нейтронами ^{235}U . ^{99m}Tc получают непосредственно в клиниках с помощью генератора $^{99}\text{Mo} \rightarrow ^{99m}\text{Tc}$ и применяют в более чем 80 % радионуклидных процедур, проводимых ежедневно в системе здравоохранения США (во всем мире ежедневно осуществляют до 60 тыс. таких процедур). Еженедельная потребность ядерной медицины США в ^{99}Mo – 3 кКи (707,2 кКи в год). До настоящего времени в США отсутствует собственное производство этого радионуклида, что вызывает определенную озабоченность. Практически весь ^{99}Mo поставляет фирма MDS Nordion. Первые строки в списке радионуклидов, получаемых с помощью ускорителей (как правило циклотронов), занимают ^{67}Ga , ^{201}Tl , ^{123}I , ^{81}Rb и ^{111}In . Поскольку ^{201}Tl используют в 13 % всех диагностических процедур, он занимает второе место после ^{99m}Tc . В 1996 г. выручка от продажи ^{123}I и ^{111}In в США составила около 531 тыс. долл. за каждый радионуклид. Производством радионуклидов для медицины только в США заняты 24 циклотрона.

Появившаяся возможность метить биологические вещества позитрон-излучающими радионуклидами открыла новое поле деятельности в области ядерной медицины. Позитрон-эмиссионная томография (ПЭТ) обеспечивает количественную, локализационную, функциональную и биохимическую информацию, которую трудно или даже невозможно получить другими средствами. Позитрон-излучающие нуклиды, такие как ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O (с $T'_{1/2} = 20,4; 10$ и 2 мин, соответственно) представляют собой радиоактивные изотопы элементов, входящих в состав тканей организма человека. Их производят непосредственно в медицинских центрах с использованием малогабаритных циклотронов. Наиболее часто из позитрон-излучающих радионуклидов используют ^{18}F , ^{68}Ga и ^{82}Rb (с $T_{1/2} = 110; 68$ и $1,25$ мин, соответственно). Препарат фтордезоксиглюкозы для диагностики онкологических заболеваний, содержащий ^{18}F (^{18}F FDG), назван препаратом века. Число ежегодно проводимых в США тестов с его использованием постоянно растет и составляет уже почти 90 % всех ПЭТ-процедур. ^{82}Rb , который используют для диагностики сердечной деятельности, получают с помощью радионуклидного генератора $^{82}\text{Sr} - ^{82}\text{Rb}$, где он образуется вследствие радиоактивного распада

материнского ^{82}Rb ($T_{1/2} = 25,4$ сут). Стоимость такого генератора при активности 0,1 Ки составляет 25 тыс. долл., он рассчитан на обслуживание 85–90 пациентов при стоимости одной процедуры 1850 долл. Существенно, что до 80 % стоимости процедуры пациенты покрывают за счет страхового полиса. Для этих целей ^{82}Rb производится в пяти лабораториях, три из которых расположены за пределами США. Приблизительно четвертую часть всего количества ^{82}Rb поступающего в США для производства ^{82}Rb , получают из Института ядерных исследований (г. Троицк, Россия). Производством радионуклидов для ПЭТ в США заняты 56 специализированных малогабаритных циклотронов. За последние несколько лет вырос спрос на такие радионуклиды для терапии, как ^{89}Sr , ^{153}Sm , ^{103}Pa , ^{90}Y . Например, поступления от продажи ^{90}Y ($T_{1/2}$ 64,2 ч) выросли со 100 тыс. дол. в 1996 г. до 1,4 млн долл. в 1998 г. Более чем 10-летний клинический опыт применения этого радионуклида показал, что с его использованием уничтожение раковых клеток происходит более эффективно и обходится пациенту в США в 2–10 раз дешевле (зависит от количества процедур и длительности лечения), чем при традиционном курсе химиотерапии в сочетании с внешним гамма-облучением, что обычно занимает несколько недель при стоимости такого курса, включая пребывание пациента в стационаре, от 20 до 200 тыс. долл. (3 тыс. долл. за сутки). Терапия же с применением РФП на основе ^{90}Y сводится к 1–3 инъекциям из расчета 0,5 мКи/кг веса пациента и стоит 10–20 тыс. дол. По данным Национального института рака, в США ежегодно регистрируют до 1,2–1,3 млн человек с новообразованиями, и общая сумма, затрачиваемая ежегодно на обычный курс терапии, возросла с 1985 г. на 45 % и составила в 1990 г. 104 млрд долл. Экономия в случае использования для этих целей ^{90}Y составила бы десятки млрд долл. Ежедневное производство ^{90}Y организовано Министерством энергетики США (DOE) с 1991 г. в PNNL, где в 1996 г. был запатентован процесс получения ^{90}Y из отработавшего ядерного топлива, содержащего материнский ^{90}Sr . Использование ^{90}Y в терапии заболеваний эффективнее, чем внешнее гамма-облучение, так как он обеспечивает локализацию и требуемую дозу облучения опухоли за счет высокой энергии его излучения. Кроме того, при этом наблюдаются минимальные побочные эффекты. ^{90}Y , ^{89}Sr и ^{153}Sm в настоящее время широко применяют также для снятия болевого синдрома у онкологических больных с метастазами в костях, что позволяет исключить традиционно используемые для этих целей наркотики.

В США ежегодно производят до 400 тыс. операций ангиопластики, но примерно 30 % пациентов из-за рестеноза требуется дополнительное операционное вмешательство стоимостью 20 тыс. долл. Как показали

исследования, проводимые в ORNL, обработка коронарных артерий излучением ^{188}Re после операции ангиопластики существенно сокращает число случаев сужения артерий. Для этих целей ^{188}Re получают с помощью генератора $^{188}\text{W} - ^{188}\text{Re}$, разработанного в ORNL. В 2000 г. поступления от продажи таких генераторов при суммарной активности 51,53 Ки составили 311 тыс. долл. Сейчас исследуют возможность применения для этих же целей ^{32}P , ^{90}Y и ^{192}Ir .

В рамках проводимой в США конверсии на бывшем заводе K-25 по обогащению ^{235}U в Ок-Ридже DOE планировал совместно с фармацевтической компанией Theragenics уже в 2000 г. построить установку по производству РФП Theraseed, содержащего ^{103}Pd ($T_{1/2} = 17$ суток) и используемого для терапии рака простаты. Стоимость проекта составила 25 млн долл. ^{103}Pd предполагают получать с помощью высокопоточного реактора HFIR мощностью 85 МВт (ORNL), который 43 недели в году производит широкую гамму радионуклидов, в числе которых ^{89}Sr , ^{192}Ir , ^{252}Cf и др. Потребность в ^{103}Pd оценивают в 15 тыс. кКи/год, ежегодное число пациентов - 150 тыс. Предполагают, что общий годовой доход от продажи этого РФП составит 140 млн дол. По данным Национального института рака, в США зарегистрировано 984 тыс. чел. с диагнозом рак простаты. В 1998 г. у 184 500 человек это заболевание было диагностировано впервые, в этом же году оно явилось причиной смерти 39 200 граждан США. Курс обычного лечения рака простаты обходится пациенту в 29 тыс. долл., и побочные эффекты, включая импотенцию, возникают в 50 % случаев. Терапия этого заболевания с применением однократной дозы 100 мКи ^{103}Pd обходится пациенту в среднем 15 тыс. долл., побочные эффекты составляют менее 5 %. Эта же фармацевтическая компания имеет в своем распоряжении 8 циклотронов типа Cyclone 18, с использованием которых возможно крупномасштабное производство ^{103}Pd на мишенях из металлического родия.

В августе 2001 г. между DOE и Калифорнийским университетом в г. Дэвис подписано соглашение, по которому DOE в рамках конверсии предоставляет в распоряжение университета современнейший 2-мегаваттный ядерный реактор, оснащенный новейшими робототехническими устройствами, который в 1990 г. был построен для нужд ВВС США, и технологию производства радионуклида ^{125}I ($T_{1/2} = 60$ сут), включая поставку необходимого для его производства обогащенного сырья из ORNL. По этому соглашению Калифорнийский университет становится главным коммерческим производителем ^{125}I в США. На его основе будут получать еще один РФП для терапии рака простаты. Этот препарат изготавливают в виде графитовых зерен в оболочке диаметром 0,7 мм, которые с помощью тонкой полый иглы вводят пациенту непо-

средственно в опухоль на срок до нескольких месяцев. Тем самым к опухоли подводится высокая локальная доза облучения, в результате чего и достигается необходимый терапевтический эффект, а соседние ткани и органы при этом страдают минимально.

В последнее время растет интерес к ^{203}Bi ($T_{1/2}$ - 45.6 мин), который распадается с испусканием альфа-частиц с энергией 8,4 МэВ. Исследования показали, что его можно с успехом использовать для лечения лейкемии, рака легких и др.

Таблица 1

Некоторые медицинские радионуклиды. Применение

Радионуклид	Область применения
Фтор-18	ПЭТ, диагностика в онкологии и др.
Фосфор-32	Лечение лейкемии, диагностика и лечение костной системы. ОФЭКТ, терапия рестеноза и рака печени, исследования метаболизма и кинетики клеток
Фосфор-33	Лечение лейкемии, диагностика и лечение костной системы. ОФЭКТ, терапия рестеноза и др.
Скандий-47	Снятие болевого синдрома при метастазировании в кости, радиоиммунотерапия
Медь-64	ОФЭКТ, ПЭТ, дозиметрия, изучение церебрального и миокардиального тока крови, терапия рака
Медь-67	Лечение и диагностика рака, радиоиммунотерапия, ОФЭКТ
Селен-75	Диагностика гепатобилиарной системы, изучение процессов в головном мозге
Стронций-82	Материнский нуклид для ^{82}Rb
Рубидий-82	ПЭТ-диагностика в кардиологии
Стронций-89	Терапия рака, паллиативная терапия костных метастазов
Стронций-90	Материнский нуклид для ^{90}Y
Иттрий-90	Радиометка различных соединений для терапии в онкологии
Иттрий-91	Терапия рака, радиоиммунотерапия, дозиметрия на клеточном уровне
Молибден-99	Материнский нуклид для $^{99\text{m}}\text{Tc}$, используемого для диагностики органов человека
Технеций-99m	Широчайшая область применения в диагностике заболеваний органов и систем человека, ОФЭКТ, сцинтиграфия
Палладий-103	Лечение рака простаты
Индий-111	Диагностика, сцинтиграфия, радиоиммунотерапия и др.
Стронций-117m	Терапия рака, снятие болевого синдрома при метастазировании в кости

Продолжение табл. 1

Радионуклид	Область применения
Йод-123	Диагностика заболеваний головного мозга, ОФЭКТ, сцинтиграфия и др.
Йод-125	Различные биомедицинские исследования, радиоиммунный анализ, терапия рака, диагностика, обнаружение тромбоза глубокой вены ног
Йод-131	Диагностика и лучевая терапия, диагностика заболеваний и лечение щитовидной железы, терапия рака и многое др.
Ксенон-127	Радиометка для измерения местного мозгового кровотока, диагностика вентиляции и кровотока легкого, ОФЭКТ высокого разрешения и низкой дозы
Ксенон-133	Диагностика вентиляции и регионарного кровотока легкого
Самарий-153	Терапия и диагностика рака, снятие болевого синдрома от костных метастазов
Гольдмий-166	Лечение ревматоидного артрита, радиометка для моноклональных антител
Рений-186	Терапия и диагностика рака, метка моноклональных антител, терапия ревматоидного артрита
Вольфрам-188	Материнский нуклид для получения ^{188}Re
Рений-188	Обработка коронарных артерий от рестеноза и др.
Иридий-192	Брахиотерапия, терапия опухолей спинного мозга, терапия рестеноза и рака простаты
Осьмий-194	Терапия в онкологии
Золото-198	Терапия рака яичников, простаты, мозга
Талий-201	ОФЭКТ, диагностика в кардиологии
Торий-229	Материнский нуклид для получения ^{213}Bi
Висмут-213	Лечение лейкемии
Калифорний-252	Терапия в онкологии

Методы визуализации, применяемые в ядерной медицине, позволяют "выявлять" заболевания на ранней стадии – буквально на клеточном уровне. Наиболее широко используется в радионуклидной диагностике технеций-99m. На его долю приходится 80 % радионуклидных процедур. Период полураспада этого изотопа – чуть более 6 часов, что позволяет полностью вывести его из организма через 1–2 суток после инъекции. С другой стороны, энергия гамма-квантов технеция-99m оптимальна для их регистрации современными радиодиагностическими приборами. Поэтому с помощью этого радиоизотопа можно метить большинство фармпрепаратов.

У технеция-99m есть еще ряд преимуществ по сравнению с другими радионуклидами. У него, например, отсутствует бета-излучение, что делает его более безопасным для здоровья человека, и относительно низкая цена. Он нарабатывается в отделениях радионуклидной диагностики из генератора молибдена-99, получаемого при делении урана. А проблем с поставками молибдена в нашей атомной отрасли нет. С учетом всего этого в Обнинске стал выпускаться модернизированный генератор 99 мТс, разработанный с участием МРНЦ РАМН.

Специалисты Центра внесли свой вклад также в разработки новых перспективных радиофармпрепаратов (РФП). Среди них – генератор терапевтического назначения на основе Ре-188с набором реагентов к нему. В настоящее время для лечения больных с метастазами в кости успешно используется новый отечественный препарат самарий-153 – оксабифор. Благодаря ему сотни пациентов получила облегчение и улучшили качество своей жизни.

Офтальмоаппликатор с рутением-106, повторяя очертания глазного яблока оптимизирует пространственное распределение тканевой дозы радиации. Облучение с его помощью опухолей глаза позволяет в ряде случаев сохранить человеку зрение. А уреакапс на основе углерода-14 высоко оценили врачи, занимающиеся диагностикой патологии желудочно-кишечного тракта. Новинка помогает своевременно обнаружить микроб-хеликобактер. По современным представлениям, он ответственен за возникновение язвенной болезни желудка и 12-перстной кишки.

Радионуклидные электрокардиостимуляторы

Эффективным средством лечения сердечной недостаточности является стимуляция сердечного ритма электрическими импульсами. Для этого используются электрокардиостимуляторы (ЭКС), имплантируемые внутрь организма и задающие сокращение сердца с нужной частотой и силой. Одним из основных факторов, определяющих надежность и срок службы ЭКС, – это выбор автономного источника питания. Используемые для электронных схем ЭКС химические батареи не всегда позволяют решить полностью все проблемы. Задача увеличения срока службы и энергоемкости имплантируемых ЭКС привела к созданию ЭКС с радионуклидными термоэлектрическими генераторами на основе ^{238}Pu . Срок службы ЭКС с таким источником питания около 10 лет. Перспективным нуклидом для использования в источниках питания ЭКС является ^{242}Sm , имеющий более низкую гамма-активность. Многолетние наблюдения показали отсутствие каких-либо нарушений в рабо-

те жизненно важных органов из-за наличия внутри организма капсулы с радиоактивным препаратом.

Радиационная стерилизация медицинских инструментов и материалов

Одним из путей распространения инфекций является их перенос от инфекционного больного к другому человеку из-за плохой стерильности медицинского оборудования и медицинских материалов. Для стерилизации применяются физические и химические методы. Среди обычно используемых методов – нагрев и применение химических соединений, например окиси этилена и формальдегида. Наряду с этими традиционными методами уже более 30 лет применяется метод радиационной стерилизации. Важными преимуществами этого метода являются возможность стерилизовать материалы после упаковки, производить обработку термочувствительных материалов, экологическая безопасность, высокая гарантия стерильности обработанного изделия. Для облучения используются гамма-источники (обычно ^{60}Co) и электронные ускорители. Стерилизации с использованием излучений подвергаются шприцы, медицинские устройства и инструменты, перевязочный материал, неорганические имплантируемые детали, биологические препараты, биологические ткани для пересадки и др. Возможность стерилизации без повышения температуры изделия стимулировала использование новых материалов и технологий для производства медицинских изделий и их упаковок. Для стерилизации медицинских изделий в большинстве стран принята доза около 25 кГр.

6.2. Сельское хозяйство

Метод стерилизации ионизирующим излучением был применен ко многим видам вредителей сельского хозяйства: яблоневая плодовая жорка, розовый коробочный червь хлопчатника, кукурузный мотылек, муха цеце и множество других сельскохозяйственных вредителей. В настоящее время даже некоторые виды несъедобных рыб и пренеприятных животных рассматриваются как возможные объекты для применения этого метода, хотя до его широкого внедрения необходимо взвесить все “за” и “против” с точки зрения экологии. Рассмотрим метод уничтожения мухи цеце: Самка мухи цеце откладывает яйца в открытые раны крупного рогатого скота, даже в ранку от пуповины только что родившихся животных. По мере роста личинки почти всегда умерщвляют своих жертв. До использования радиоактивного метода убыток, причи-

няемый личинками мух, только на юго-востоке США ежегодно составлял 15–25 млн долл.

Суть метода заключается в следующем. В зараженный вредителями район выпускаются самцы, стерилизованные путем облучения гамма-квантами, испускаемыми радиоизотопом кобальт-60. Доза облучения составляет не менее 2500 рентген. Стерилизованные самцы не теряют своей привлекательности для самок и в этом не отличаются от самцов, не подвергавшихся облучению. Самки производят потомство только один раз и, спариваясь со стерилизованным самцом, потомства не дают. Поскольку продолжительность жизни одного поколения трупных мух не превышает трех недель, то по мере насыщения района стерилизованными самцами количество трупных мух в течение двух – трех месяцев падает почти до нуля.

В конце 50-х годов после проведенных опытов, продемонстрировавших эффективность метода, в США была создана фабрика по размножению мух. Личинки мух облучались гамма-квантами от кобальта-60, и затем им предоставлялась возможность расти. Во время проведения операции около 50 млн стерилизованных мух (как самок, так и самцов) разбрасывались над территорией зараженных вредителями районов; на протяжении 1958–1959 годов было рассеяно примерно 2 млрд мух. Вероятность размножения самок и необлученных самцов стала поистине ничтожной. К 1960 году эти мухи, сущий бич крупного рогатого скота, были полностью уничтожены на территории США.

Следует отметить также, что в исследованиях и разработке методов борьбы с вредными насекомыми применяются радиоактивные нуклиды. Методом меченых атомов изучается поведение насекомых, пути их миграции, эффективность паразитов и хищников, уничтожающих вредных насекомых. С помощью нуклидов можно проследить судьбу инсектицидов в организме насекомого или в окружающей среде и тем самым эффективность химических методов борьбы с ними, исследовать источники питания насекомых, а также количество потребляемой пищи, и определить сопротивляемость растений к конкретному виду насекомых-вредителей.

В 2000 г. МАГАТЭ, откликаясь на просьбы многих государств, проводило анализ технической осуществимости применения метода стерилизации насекомых (МСН). Опыты на средиземноморской фруктовой мушке показали, что этот подход пригоден для массового производства самцов.

Сейчас наиболее подходящими объектами ещё являются яблочная плодожорка, розовый коробочный червь хлопчатника, кукурузный мотылек, огневка и множество других сельскохозяйственных вредителей.

Облучение пищевых продуктов

Согласно данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), ежегодно во всем мире отмечается свыше 4 млрд. случаев диареи, причем значительное их большинство – в развивающихся странах. Согласно статистическим данным по промышленно развитым странам, до 10 % населения этих стран ежегодно страдают от заболеваний пищевого происхождения.

Согласно данным Центра США по борьбе с болезнями и их профилактике, пищевые отравления в США каждый год являются причиной 5 тыс. случаев смерти, 325 тыс. случаев госпитализации и 76 млн случаев заболевания.

При очень высоких уровнях радиоактивного облучения живой организм погибает. Это явление было применено по отношению к бактериям, грибкам и прочим вредным микроорганизмам, которые являются причиной уничтожения пищевых продуктов. В некоторых районах земного шара вредители и вредные микроорганизмы портят до 50 % всех запасов продовольствия. Долгие годы такие процессы, как консервирование, замораживание, пастеризация и другие, помогали человеку защитить продукты питания от порчи и уничтожения. Открытие энергии атомного ядра дало нам в руки новое оружие: обработку облучением.

Выяснилось, что облучение весьма полезно при консервировании продуктов. Радиоактивное облучение пищевых продуктов применяется по четырем направлениям:

1. Обработка корнеплодов для предупреждения их прорастания (это относится в первую очередь к картофелю и луку), с этой целью применяются очень низкие дозы облучения.

2. Облучение умеренными дозами таких продуктов как бананы, плоды папайи, с целью затормозить их созревание.

3. Уничтожение насекомых или дезинфекция в помещениях, где хранятся пшеница, рис, овес, мука, это достигается низкими или умеренными дозами радиоактивного облучения.

4. Уничтожение в пищевых продуктах всех или некоторых микроорганизмов:

– продление срока хранения (так называемая пастеризация облучением) легкопортящихся продуктов (рыбы, домашней птицы, ягод) с помощью умеренных доз облучения.

Проверкой облученных продуктов на их безвредность для питания человека занимались такие “солидные” и компетентные организации, как Институт питания АМН СССР и Институт гигиены им. Ф.Ф. Эрис-

мана. В настоящее время установлено, что после облучения соответствующими дозами (они в настоящее время уже точно определены) сроки хранения пищевых продуктов будут увеличены в 3–8 раз. При этом сохраняется высокое качество продуктов.

Так, например, мясные полуфабрикаты из говядины и свинины сохраняются в течение 7–10 дней при $t = 20^{\circ}\text{C}$ и 8 недель при 5°C .

Существенно возрастает после облучения срок хранения тушек битой потрошеной птицы:

При 1°C – 30 дней, при 3°C – 21 день, при 10°C – 11 дней.

Положительные результаты были получены во Всесоюзном научно-исследовательском институте рыбного хозяйства и океанографии.

После облучения сом, карп и сельдь при $t=0-5^{\circ}\text{C}$ сохраняются свежими до 30 дней, а щука свежая – до 60 дней.

Продолжительность хранения плодов, овощей и ягод может быть увеличена в 2–3 раза.

Получены экспериментальные данные, что ионизирующие излучения наиболее перспективно применять для ускорения созревания коньячного спирта.

При настаивании коньячного спирта на дубовых стружках, предварительно облучённых дозой 20 Мрад, созревание его заканчивается через 10–15 суток. При этом по степени созревания и своему химическому составу такой спирт равноценен спирту, который выдерживался три года обычным методом.

Известно, что картофель при длительном нахождении при температурах ниже $+5^{\circ}\text{C}$ приобретает сладкий привкус из-за осахаривания крахмала, а также прорастает.

Опыты по облучению картофеля γ -лучами показали, что облучённые клубни картофеля теряют способность к прорастанию и выдерживают хранение до нового урожая в условиях обычных неохлажденных хранилищ. Такой картофель безвреден для организма и может употребляться в пищу.

Следует отметить, что после облучения урожайность картофеля повысилась примерно на 15 %, а зерна до 10 %, а в некоторых случаях до 30 %. В опытах с морковью на площади 19 га предпосевное облучение семян привело к повышению не только урожая корнеплодов (примерно на 30 %), но и содержания каротина в них (на 9–12 %), и срок созревания увеличился на 4–5 дней.

Излучения увеличивают скорость естественных мутаций. Так, новый сорт ржи, устойчивый к ржавчине, был выведен за 18 месяцев. При работе обычными методами для этого потребовалось бы до 10 лет.

Интересные результаты получены с помощью излучений в направленном изменении некоторых свойств низших организмов. Известно, что особи мужского типа тутового шелкопряда на 20–30 % шелконоснее и на 10–15 % жизнеспособнее самок. Однако различить пол шелкопряда на стадии яйца – трудная задача.

Путём воздействия на шелкопряда рентгеновскими и γ -лучами в СССР получена линия тутового шелкопряда, которая даёт потомство, меченное по полу.

На стадии яйца самцы белого, а самки чёрного цвета. Это позволило механизировать трудоемкие процессы сортировки шелкопряда и значительно повысить шелконосность коконового сырья.

Большой практический интерес представляет разрабатываемый в настоящее время метод направленного получения у рыб особей женского пола.

Если спермии рыб (осетра, севрюги, стерляди и др.) предварительно подвергнуть облучению, то из икринок развиваются преимущественно самки.

Увеличение числа самок приведет к увеличению продукции такого ценного пищевого продукта, как икра.

Из сельскохозяйственных животных наибольшее количество производственных испытаний стимулирующего эффекта малых доз проведено на курах. Исследования проведены в различных вариантах: облучение яиц до и после инкубации, облучение цыплят, несушек, многократное, разовое воздействие и другие варианты. В результате было четко зафиксировано положительное влияние малых доз.

Стимулирующий эффект на развитие суточных цыплят оказывает также однократное облучение их малыми дозами (25 Р). У них отмечался более быстрый рост и раннее половое созревание. У кур повышалась яичная продуктивность.

Цитологические и биохимические исследования крови и костного мозга кур в течение двух лет не выявили никаких патологических сдвигов. Более того, при исследовании реакции организма на введение вакцины БЦЖ и контрольное заражение возбудителем туберкулеза выявлено повышение иммунобиологической реактивности птиц.

Стимулирующее действие малых доз установлено и на млекопитающих-мышьях, свиньях, норках. Отечественные и зарубежные авторы подобных исследований отмечают раннее созревание и увеличение массы тела у животных во взрослом состоянии, повышение иммунобиологической реактивности и другие положительные сдвиги.

В сельском хозяйстве (растениеводстве и животноводстве) широко применяется радиоиндикационный метод – метод меченых атомов. Вве-

денные в организм животного или в растение радионуклиды ведут себя в биологических системах так же, как их стабильные изотопы. Это обстоятельство позволяет проследить судьбу не только радиоактивных изотопов, но и различных меченых органических и неорганических соединений и контролировать их в процессе обмена. Большим достоинством этого метода является его высокая чувствительность, что позволяет использовать в исследованиях ничтожно малые в весовом отношении количества меченого соединения, которые не могут изменить нормальное течение жизненных процессов.

Важным достижением современной биохимии, полученным с помощью радиоактивных веществ, можно считать представление о динамическом состоянии обменных процессов в живом организме, о взаимопревращаемости многих веществ, о непрерывном распаде и ресинтезе, непрерывном обновлении химических соединений живых клеток.

Благодаря радиоактивным индикаторам удалось определить скорость обновления различных составных частей тканей и органов. Доказано, что белки мышц заменяются медленнее других, а печени, плазмы крови, особенно слизистой кишечника, обладают большой скоростью обновления. Были получены также прямые доказательства обмена между белками мышц, плазмы, печени и других органов.

С помощью метода меченых атомов удалось выяснить такие важные вопросы, как влияние веществ пищевого рациона на продуктивность животных, вопросы промежуточного обмена и взаимопревращаемости соединений, пути распада и синтеза химических веществ в живом организме животных.

Радиоиндикационный метод позволил выяснить особенности обмена и синтетической роли микрофлоры рубца и других отделов желудочно-кишечного тракта жвачных животных, которые не могли быть определены другими методами.

Другой важный результат применения радиоактивных изотопов при изучении минерального обмена – установление скорости обновления минерального состава органов и некоторых соединений костной ткани.

Метод радиоактивных индикаторов нашел применение в энтомологии при изучении путей и скорости миграции мух, комаров, клещей и других насекомых-переносчиков патогенных микроорганизмов и эффективности предпринимаемых мер борьбы с ними.

Стимулирующее действие малых доз на рост, развитие низших грибов имеет большое практическое значение в производстве антибиотиков и других биологически активных веществ. Особенно демонстративно стимулирующее действие ионизирующих излучений прослежено

на растениях. Установлено, что при определенных дозах радиации наблюдается стимуляция роста и развития. Именно поэтому в ряде случаев проводят предпосевное облучение семян, что приводит к существенному повышению урожайности.

В сельском хозяйстве ИИ используются также для выведения новых сортов зерновых и других растений. Дозы облучения способствуют генетическим мутациям. Как правило, мутации вредны, но иногда появляется мутация, приносящая пользу какому-нибудь виду или человеку. Искусственное радиоактивное облучение позволяет человеку ускорить процесс эволюции в желательном для себя направлении.

Мутации, вызванные радиоактивным облучением, имеют особую пользу для ученых-селекционеров в случаях, когда требуется видоизменить какую-нибудь специфическую особенность, например цвет зерна или высоту стебля, не нарушая других полезных характеристик данного вида; или когда нужно вызвать мутацию вегетативно размножающихся видов. К настоящему времени с помощью радиоактивного облучения было создано свыше 80 мутаций сельскохозяйственных растений, выгодных с коммерческой точки зрения. Среди них 10 сортов пшеницы, 4 сорта риса, 11 сортов ячменя.

Современное сельскохозяйственное производство в значительной степени зависит от использования химикатов в качестве удобрений, пестицидов, инсектицидов, а также для регулирования роста растений. Одной из задач сельскохозяйственного производства является эффективное применение удобрений. С помощью радионуклида Р проводятся исследования по применению удобрений, содержащих фосфор. Радионуклид N является незаменимым в исследованиях обмена азота. В этом случае целью исследований является не только изучение эффективности применения азотистых удобрений, но и проблем биологической фиксации азота растениями. Метод меченых атомов позволяет определить, какое количество удобрений было фактически потреблено растениями, сколько осталось в почве для будущих урожаев и сколько потеряно.

Радионуклиды позволяют определять сорта растений, которые наиболее эффективно используют для удобрений, определять наиболее приемлемые для усвоения формулы химических соединений, содержащих нужные вещества, проследить пути распространения и места накопления элементов, вносимых через удобрения или извлекаемых из почвы, определить наилучшие сроки и режим внесения удобрений. Эти исследования послужили основой для разработки методов контролируемого высвобождения питательных веществ, т.е. приготовления и внесения удобрений в такой форме, чтобы их извлечение и усвоение растениями происходило постепенно. Биологическая фиксация азота являет-

ся одним из путей поддержания уровня содержания азота в почве и сохранения ее плодородия. Поэтому важную роль в восстановлении почвы, подвергшейся эрозии, играют растения, фиксирующие в почве азот. Метод меченых атомов с применением N дает возможность определять степень фиксации азота различными растениями и подобрать наиболее эффективные.

Применение пестицидов для борьбы с сорняками требует проведения исследований поведения их в окружающей среде. Остаточные количества пестицидов в продуктах питания представляют особую проблему. Необходимо также заботиться о почвенных и водных ресурсах. Объекты, на которые не нацелены пестициды, не должны подвергаться их вредному воздействию. Поэтому важно выделить пестициды всюду и измерить их количество. С помощью радиоактивных изотопов, введенных в пестициды, можно определить, какое количество пестицидов достигло цели, сколько ушло в остаток и куда попал этот остаток. Применение метода меченых атомов дает возможность провести качественный и количественный анализ.

6.3. Активационный анализ

Этот метод был открыт Г. Хевеши в 1936 г. Облучая редкоземельный элемент диспрозий нейтронами от радий-бериллиевого источника, Хевеши обнаружил сильную активность облученного диспрозия. Это натолкнуло его на мысль, что таким методом можно определять содержание диспрозия в смесях с другими веществами. В СССР этот метод был использован впервые в 1939 г. А. Гринбергом и Ф. Филимоновым.

Для определения элементного состава широко используется активационный анализ, который является эффективным и во многих случаях незаменимым средством определения элементного состава вещества и материалов, обнаружения в них ультрамалых количеств примесей, и основанного на этом анализе контроля технологических процессов. Современная технология предъявляет жесткие требования к чистоте материалов. Например, развитие полупроводниковой техники потребовало разработки методов определения содержания примесей в количествах 10^{-8} % и менее. Высокая чувствительность метода и небольшое время, требующееся для проведения анализа, делает его незаменимым средством в промышленности чистых веществ.

Если предположить, что поток нейтронов 10^{13} нейтронов/с (таков поток тепловых нейтронов в исследовательских реакторах), то чувствительность метода составит для большинства элементов таблицы Менделеева 10^{-12} – 10^{-7} г.

Образовавшуюся активность можно измерить счетчиками, если в результате облучения в смеси образуется один радиоактивный элемент или если периоды полураспадов элементов значительно отличаются. В других случаях необходимо использовать спектрометрический анализ, поскольку каждому образуемому радиоизотопу соответствует не только определенный период полураспада, но и энергия и тип частиц, образующихся при распаде. Естественно, что метод будет тем чувствительней, чем значительно отличаются характеристики изотопов, образующихся в исследуемом материале.

Несмотря на определенные ограничения, для редкоземельных элементов нейтронно-активационный метод на три порядка, а для свыше 30 элементов на один-два порядка более чувствителен, чем методы аналитической химии. Необходимо также отметить, что нейтронно-активационный анализ является во многих случаях неразрушающим методом, он позволяет производить автоматизированные измерения и часто дешевле даже конкурирующих с ним по точности для некоторых элементов, химико-аналитических методов. Эти аспекты и определяют всевозрастающее использование нейтронно-активационного метода во многих областях науки и техники. Большой интерес представляют, в частности, автоматизированные системы контроля качества продукции. В США и РФ существуют серийно выпускаемые установки, транспортирующие образцы в зону облучения, затем автоматически производится определение активности и состав образцов и в случае необходимости их отбраковка. Производительность установки 10–12 исследований в час.

6.3.1. Криминалистика

Если вещество при малом его количестве имеет сложный состав, то энергетический спектр его гамма-излучения будет состоять из нескольких компонентов, каждому из которых в спектре соответствуют максимумы при некоторых энергиях. Все это приводит к тому, что гамма-спектр малого количества какого-либо вещества обладает настолько индивидуальной спецификой, что он совпадает только со спектром того же самого вещества. Так гамма-спектр нитки одежды определяется сортом сырья, технологией обработки пряжи, спецификой изготовления костюма, спецификой его загрязнения и т.д. По указанным причинам активационный анализ занимает важное место в криминалистике.

Самой убедительной уликой против преступника всегда являются отпечатки его пальцев. Техника изучения отпечатков пальцев в настоящее время развилась настолько, что она позволяет производить анализ

практически невидимых или полустертых отпечатков, а также отпечатков, оставленных на грубых поверхностях.

Однако как метод, основанный на изучении отпечатков пальцев, так и метод, основанный на исследовании «почерка» преступника, страдают серьезными недостатками: опытный преступник редко оставляет после себя улики такого рода.

И все-таки следы преступника всегда остаются. Только они имеют настолько невинный характер, что ими не может воспользоваться самый опытный сыщик, даже если он обладает эрудицией и интуицией Шерлока Холмса и в совершенстве владеет его методом дедукции. Речь идет о ничтожном количестве какого-либо вещества или о мельчайшем предмете, которые преступник невольно оставляет на месте преступления или, наоборот, случайно уносит оттуда на себе. Этими веществами и предметами может быть пыль на одежде или обуви, следы краски, волос, нитка от одежды, следы пороха, металлические опилки и т. п. При этом для анализа иногда оказывается достаточно мельчайшей пылинки вещества весом 10^{-11} г, т.е. одной десятитысячной доли микрограмма. Это в десять миллионов раз меньше веса одного короткого волоска! Трудно себе представить столь аккуратного преступника, который сумеет не оставить вещественных улик такого ничтожного масштаба.

Например, чтобы определить, был ли отравлен человек мышьяком, достаточно иметь для анализа несколько миллиграммов волос. Дело в том, что мышьяк селективно осаждается на волосах, а зная, что рост волос составляет 0,35 мм в день, можно определить и время отравления. Для этого волос необходимо разрезать на соответствующие части и отдельно исследовать.

Именно таким путем пытались определить, был ли отравлен Наполеон? В распоряжении исследователей имелся волос Наполеона (правда, абсолютной уверенности в этом нет) длиной 13 см. После облучения на реакторе оказалось, что содержание мышьяка в 10 раз превышает норму. Кроме того, имелся пик потребления мышьяка приблизительно в течение четырех месяцев. Из этих данных можно сделать вывод, что непосредственной причиной смерти Наполеона не явилось отравление мышьяком. Возможно, еще до вторичного отправления на остров Святой Елены Наполеона и пытались отравить. Основанием для этого служат результаты анализа волос Наполеона до ссылки. В них оказалось больше мышьяка, чем в первых образцах.

Однако ведь Наполеон мог принимать мышьяк вместе с лекарствами или даже просто принимать мышьяк регулярно в малых дозах для того, чтобы выработать в себе иммунитет против потенциального отравления. Итак, полной разгадки смерти императора пока нет.

А вот в другом случае – истории смерти американского полярного исследователя Ч. Ф. Холла – достоверно доказано, что Холл был отравлен мышьяком участниками экспедиции, которую он возглавлял.

В криминалистике уже имеются десятки случаев применения нейтронно-активационного анализа. Все это приводит к тому, что γ -спектр остатков какого-нибудь вещества, найденного на месте преступления, обладает настолько индивидуальной спецификой, что он совпадает только со спектром того же самого вещества (которое может быть изъято у предполагаемого преступника). Часто объектом исследования являются волосы. Оказывается, волосы одного человека одинаковы, но отличаются от волос других людей (те же составные части), они отличаются количественным содержанием различных компонентов. Специальная проверка, сделанная для ~ 1000 волос, взятых у разных людей, показала убедительное различие соответствующих им γ -спектров. Состав волос может измениться, если человек сменил образ жизни или сменил место жительства, например переехал из Европы в Америку. Состав волос может дать информацию о профессии человека. Если, например, в волосах содержатся редкие элементы, такие как тантал, вольфрам, кобальт или кадмий, то логично предположить, что этот человек работает там, где соответствующие элементы широко используются.

Благодаря активационному анализу можно узнать исходный географический пункт при контрабанде опиума, сравнивая состав почвы, на которой произрастал мак – сырье этого наркотического средства, с химическим составом последнего. Проводя анализ состава электрических проводников, выпускаемых различными фирмами, можно определить, откуда был взят якобы украденный медный телефонный кабель. В случае, когда неясно, было ли совершено убийство или самоубийство из револьвера, с помощью активационного анализа производится измерение количества бария или сурьмы на руках подозреваемого или жертвы. С учетом характерного содержания сурьмы в патронах производится также идентификация принадлежности оружия.

То же заключение справедливо и относительно любых других предметов и веществ. Например, γ -спектр краски зависит от типа и количества составных частей, которые определяются не только задуманным колером, но и временем изготовления краски, местом добычи сырья, технологией его очистки и переработки, допуском отклонением в процентном составе и т. д. В результате оказывается, что мельчайшие следы краски на рукаве или обуви преступника имеют в точности тот же γ -спектр, что и краска на месте преступления, и, наоборот, человеку, стремящемуся создать точную копию краски (например, художнику, за-

нимающемуся подделкой картин), никогда этого не удастся сделать. Аналогично γ -спектр нитки от одежды определяется сортом сырья, технологией обработки пряжи и ткани на фабрике, спецификой изготовления костюма (например, декатировкой) и особенностями его использования (например, специфическое загрязнение или, наоборот, недавняя химическая очистка определенными моющими составами) и т.п.

По анализу капли масла от автомобиля можно идентифицировать, на этом ли автомобиле совершено преступление. В масле неизбежно содержатся металлические присадки и частицы металла от двигателя, которые для каждого автомобиля находятся в определенном соответствии и количестве.

Установлено, что состав веществ, оставленный каждым человеком при прикосновении к предметам рукой, ладонью или лбом, строго индивидуален. Это тоже может являться основанием для подтверждения или опровержения преступления.

В качестве примера возможности использования ядерно-физических методов для предотвращения преступлений приведем запатентованный в США способ обнаружения взрывчатки в багаже авиапассажиров. Способ основан на том, что взрывчатка обычно содержит азот ($N^{14} + N^{15}$), который при облучении его нейтронами превращается в N^{15} и радиоактивный изотоп N^{16} , испускающий γ -кванты с энергией $E_\gamma \approx 6$ МэВ ($T_{1/2} = 7$ с). Появление γ -квантов с такими E_γ и $T_{1/2}$, при облучении какого-нибудь чемодана, является сигналом о наличии в чемодане веществ, содержащих азот, т.е., может быть, взрывчатки. Способ хорош тем, что в связи с малостью $T_{1/2}$ его применение не требует длительного облучения, так что проверку чемоданов можно осуществлять, перемещая их с помощью конвейерной ленты мимо источника нейтронов и детектора γ -квантов.

Но не только криминалистика является областью применения активационного анализа. Он используется и для решения многих других задач. Например, для решения одной из важнейших на сегодняшний день задачи-мониторинга состояния окружающей среды.

Активационный анализ используется для измерения концентрации вредных веществ и элементов (Са, Fe, Rb, Вг) в зонах перегруженных автомагистралей, для определения микроэлементов в атмосфере Антарктиды и водах Мирового океана. На основе активационного анализа разработан оригинальный метод мониторинга качества окружающей среды, в котором индикатором служит химический состав слюны человека. Метод позволяет определять в сухом остатке слюны человека концентрации более 30 элементов, что дает возможность объективно и достоверно судить об изменении показателей внешней среды обитания.

Активационный анализ используется для определения большой группы элементов в почве и растениях, отбираемых в районах размещения станций комплексного фоновго мониторинга (Березинский, Кавказский, Баргузинский заповедники). Это позволяет определить с высокой точностью уровень вредных веществ в незагрязненных деятельностью человека зонах, которые могут служить и служат базой для сравнения уровней загрязнения в других районах.

6.3.2. Изотопная геохронология и радиоуглеродный метод

Основная задача геохронологии – определение возраста геологических событий. Современная измерительная техника позволяет определить возраст событий произошедших несколько дней назад, и, например, возраст Земли, даже возраст Вселенной. Датирование событий и объектов чаще всего основывается на процессе радиоактивного распада и спонтанного деления ряда изотопов таких элементов, как I, Rb, Sm, La, U, Th. Это долгоживущие изотопы, которые дают информацию об истории Земли, о происхождении пород. Дочерние изотопы ^{238}U и ^{235}U позволяют определить скорость накопления осадочных пород и возраст минералов, которые образовались в течение последнего миллиона лет. Наконец, относительно короткоживущих космогенные радионуклиды, такие как ^{10}Be , ^{14}C , ^{26}Al , ^{36}Cl и др., дают возможность датировать события недавнего геологического прошлого, исчисляемого десятками сотнями тысяч лет. Космогенные радионуклиды формируются в результате взаимодействия атомов стабильных изотопов и космического излучения в атмосфере в обнажающихся породах. Основным источником бомбардирующих частиц, способных вызвать реакции в атмосфере, является космическое излучение галактического и солнечного происхождения. Галактическое излучение обладает наибольшей энергией (10^2 – 10^5 МэВ) и состоит из протонов (84 %), α -частиц и более тяжелых ядер до Ni включительно (около 2 %). Интенсивность солнечного излучения на два порядка выше, но энергия частиц не превышает 500 МэВ. Состав солнечного излучения меняется от вспышки к вспышке и в среднем представлен на 70 % протонами, на 29 % – α -частицами, на 1 % – более тяжелыми ядрами. Особый интерес представляют космические тела, незащищенные атмосферой. Продукт взаимодействия первичного космического излучения с их веществом накапливается, дает информацию об эволюции состава излучения за длительный период времени (более чем за 4,5 млрд лет), о его источниках и позволяют расширить представления о строении и эволюции Вселенной.

Основной прием, применяемый при определении абсолютного геологического возраста, это определение содержания радиоизотопа и накопившихся за определенный промежуток времени устойчивых продуктов его распада. В зависимости от начальных и конечных продуктов распада основные методы геохронологии получили название свинцово-урановый, калий-аргоновый, рубидий-стронциевый, самарий-неодимовый.

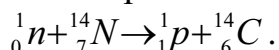
Наиболее пригодными древними объектами для датирования методами ядерной хронологии оказались каменные метеориты, которые в измеряемых количествах содержат торий, уран, калий, рубидий, самарий. Железные метеориты иногда удается датировать по силикатным включениям, пригодным для датирования калий-аргоновым или рубидий-стронциевым методом.

Расчеты возраста Земли основаны на обработке данных по измерениям изотопа свинца, а также рубидия-стронция и самария-неодима. Рассчитанный по этим данным возраст Земли 4500–4600 млн. лет, что очень близко к возрасту самых древних метеоритов.

Изотопные исследования позволяют определить не только возраст тех или иных объектов, но и дают возможность оценить длительность существования жизни на Земле. Например, в датированных свинцово-урановым методом отложениях железистых формаций Канады (3000 млн лет) обнаружен след сульфатредуцирующих бактерий, которых нет в самых древних датированных отложениях (3800 млн лет), обнаруженных в Западной Гренландии. Однако в этих отложениях органического углерода и углерода карбонатов такое же количество, что и в настоящее время. Отсюда следует вывод о том, что геохимический углеродный цикл, связанный с фотосинтезом, стабилизировался около 3800 млн лет назад. Одним из наиболее важных методов радиоизотопной геохронологии, позволяющих исследовать такие события, как эволюция и миграция *homo sapiens*, развитие и гибель мамонтовой фауны, эволюция многолетнемерзлых пород и ледников, развитие гидросферы и современного растительного покрова, является радиоуглеродный метод. Теоретическое предсказание и экспериментальное подтверждение образования в атмосфере космогенного изотопа ^{14}C было выполнено в 1940-е годы У. Либби. Этот ученый не только решил физико-химическую задачу, связанную с изменением концентраций ^{14}C в атмосфере и его распределением в углеродосодержащих объектах, но и сам впервые определил возраст образцов древесины из погребения египетских фараонов и древесных колец с известным возрастом. Эти работы были удостоены Нобелевской премии 1960 г.

Углерод – один из самых распространенных элементов во вселенной и основа существования жизни на Земле. В природе распространены три изотопа – два стабильных ^{12}C и ^{13}C и один радиоактивный ^{14}C . Их соотношение примерно таково: ^{12}C – 98,89 %, ^{13}C – 1,11%, а количество ^{14}C в современном органическом веществе в 10^9 (т. е. в триллион раз) меньше, чем ^{12}C , а в древней органике в 10^{14} – 10^{15} раз меньше.

Радиоактивный углерод ^{14}C формируется в верхних слоях атмосферы в реакциях стабильного изотопа азота ^{14}N с образовавшимися в результате космического облучения вторичными нейтронами:



Образовавшиеся атомы ^{14}C при взаимодействии с кислородом атмосферы переходят в молекулы диоксида углерода. Происходит быстрое перемешивание CO_2 в атмосфере, и концентрация радиоактивного изотопа углерода становится постоянно соответствующей состоянию равновесия. Равновесная концентрация не меняется, поскольку распад ^{14}C уравнивается его образованием в атмосфере. Молекулы углекислого газа попадают в ткани растений в результате фотосинтеза, а также путем поглощения через корни. Концентрация ^{14}C в живых зеленых растениях остается постоянной, поскольку распад ^{14}C уравнивается его поглощением из атмосферы. В организме травоядных животных и в тканях тех животных, в чей организм углеродосодержащие ионы попадают из атмосферы, концентрация ^{14}C также постоянна в течение их жизни. Когда растение или животное умирает, поглощение ^{14}C из атмосферы прекращается, и в результате радиоактивного распада концентрация ^{14}C уменьшается. При распаде радиоактивного углерода испускается β -частица с энергией 0,155 МэВ и образуется стабильный изотоп азота ^{14}N . Содержание естественного ^{14}C в современной древесине составляет около $1 \cdot 10^{-10}\%$. Удельная активность углерода биосферы оценивается примерно в 14 расп./ (мин.г).

Период полураспада изотопа ^{14}C составляет 5568 ± 30 лет, и можно легко вычислить возраст того или иного образца органики по формуле

$$A(t)/A_0 = \exp(-0,693t/5568),$$

где t – возраст органического вещества в годах, т. е. время, истекшее с момента смерти растения или животного; $A(t)$ и A_0 – удельная активность древнего и современного образца, соответственно.

Определение возраста по радиоуглероду основывается на ряде допущений, а именно интенсивность космического излучения и, как следствие, концентрация радиоуглерода оставались постоянными в пределах углеродной хронологической шкалы; время обмена радиоуглерода между атмосферой и биосферой значительно меньше периода полураспада

^{14}C и постоянно на протяжении тысячелетий; содержание радиоуглерода в образце убывает только в результате радиоактивного распада.

В заключение можно подчеркнуть, что изотопная геохронология является важнейшей отраслью геологических, географических и археологических исследований, дающей точную датировку событий, происходивших на Земле в прошлом.

Ядерно-физические методы поиска полезных ископаемых

Широкий круг задач, связанных с происхождением и эволюцией Земли, с изучением строения и свойств земной коры, с поиском и добычей полезных ископаемых, решает ядерная геофизика. Далее рассмотрены физические принципы и методические основы использования ядерной физики при поиске полезных ископаемых.

Радиометрическая разведка

Радиометрическая разведка основана на измерении полей ионизирующих излучений естественных радиоактивных элементов. По условиям применения в разведке выделяют полевые методы поисков и оценки аномалий, методы опробования руд на месте залегания и методы лабораторного анализа.

Главная область применения радиометрической разведки – поиск и разведка месторождений U и Th, содержащих основное сырье для атомной энергетики.

Лабораторные методы радиометрического анализа применяют для определения содержания или активности естественных радиоактивных элементов в горных породах, водах и воздухе путем сравнения интенсивностей ионизирующих излучений пробы и стандартного образца с известным содержанием радионуклидов. Пробу стандартного образца породы насыпают в одинаковые контейнеры, формы и размер которых зависят от измеряемого излучения и конструктивных особенностей детектора. Полевые поисковые методы можно разбить на три группы: 1) методы поиска по излучению; 2) эманационные методы; 3) методы поиска, основанные на различных проявлениях радиоактивного распада. Преобладающее значение имеет первая группа, включающая воздушные (самолетные и вертолетные), автомобильные, пешеходные, глубинные и подводные модификации γ -съемок. Применение γ -спектральной аппаратуры позволяет получить широкую геохимическую информацию распределения радиоактивных элементов, нередко являющихся индикаторам процессов, происходящих в рудах. Внедрение многоканальных γ -

спектрометров дает возможность, наряду с геологическими задачами, решать некоторые вопросы экологически ставшие актуальными в связи с загрязнением атмосферы, биосферы и гидросферы естественными и искусственными радиоактивными элементами.

Аэрогамма-съемка является скоростным методом поиска урановых месторождений, позволяющим локализовать перспективные площади для наземных исследований. На современном этапе она используется также для геолого-геохимического картирования и поиска нерадиоактивных полезных ископаемых (Tf, Ta, Nb, P, Mo, Au, Al, Sn и др.), имеющих генетическую или пространственную связь с зонами аномального распределения урана (радия), тория, калия. Главная область применения авто-пешеходной γ -съемки – детальный поиск радиоактивных руд и связанных с ним полезных ископаемых. Регистрация излучения в глубинных шпурах или мелких скважинах (глубинная γ -съемка) является ведущим методом поиска урановых месторождений на площадях, закрытых рыхлыми отложениями. Подводная γ -съемка наряду с поиском полезных ископаемых используется для геологического картирования морских осадков, и в первую очередь для оконтуривания зон развития песчаных, глинистых или илистых отложений, для детального изучения грунтов при строительстве портовых сооружений, для исследования процессов в мелководных частях шельфа и т.д.

Эманационные методы основаны на регистрации радиоактивных газов (эманации) радона $^{222}_{86}Rn$, торона $^{220}_{86}Tn$ и актиона $^{219}_{86}An$, входящих в цепочки последовательных превращений нуклидов уранового, ториевого и актиноуранового рядов. Образующиеся при радиоактивном распаде газы попадают в поры горной породы и в результате диффузии и конвекции распространяются в пространстве, окружающем эманационный источник. Изучая распределение эманации в горных породах, рыхлых отложениях, водах и атмосферном воздухе, обнаруживаются эманационные аномалии, а по ним – локальные скопления радиоактивных руд.

Третья группа поисковых методов основана на физических явлениях, сопровождающих радиоактивный распад. К таким явлениям относятся накопления конечных продуктов в рядах урана, тория, актиноурана (метод радиогенных изотопов свинца) и нарушения в кристаллической решетке под действием ионизирующих излучений (метод радиационных дефектов).

Свинцовый метод является одним из фундаментальных методов в ядерной геохронологии. В 1970-х годах разработаны и внедрены высо-

копроизводительные методики оценки радиогеохимических аномалий по изотопам свинца, использующиеся при поиске месторождений урана.

Методы радиационных дефектов основаны на пропорциональной зависимости между дозой ионизирующего излучения, полученной минералом за некоторое время, изменениями в его кристаллической решетке. Под действием ионизирующих излучений возникают точечные непримесные дефекты типа вакансий междуузельных атомов, образованные путем смещения атомов или ионов в узле решетки. Наличие радиационных дефектов приводит к изменению окраски минералов, возникновению микротрещин, появлению люминесценции и термолюминесценции, возникновению и усилению парамагнитных свойств. Данные изменения свойств под действием ионизирующих излучений так или иначе используются для изучения поиска радиоактивных руд.

6.3.3. Нейтронно-активационный анализ человека

Заголовок этого раздела наверняка вызовет недоумение у многих читателей. Действительно, если о нейтронно-активационном анализе, используемом в промышленности и научных исследованиях, известно относительно давно, то нейтронно-активационный анализ человека проводится сравнительно недавно. Это позволяет получить в относительных единицах содержание кальция у данного пациента. Полученные результаты используются для оценки динамики содержания кальция в зависимости от течения болезни или результатов проведенной терапии. Поскольку доза облучения невелика – $3 \cdot 10^{-3}$ Зв, облучение может быть повторено, если это необходимо, через 6 месяцев.

В организме человека 99 % общего количества кальция содержится в костях. Поэтому этот тип диагностики наиболее полезен для исследований заболеваний костей, которые, в свою очередь, связаны с функциональным состоянием почек.

При ренальной остеопорозе у большинства больных содержание кальция составляет около 20 % от нормы. Это количество у некоторых больных увеличивается на 60 % при осуществлении хирургического вмешательства (удалении околощитовидной железы) или терапии с помощью витамина D.

Чувствительность активационного метода такова, что содержание кальция в теле человека может быть определено с погрешностью ± 8 %, а изменение у отдельного пациента с погрешностью ± 2 %.

Определение кальция и фосфора в позвоночнике

При этой процедуре облучению подвергается не все тело, а только спинные и грудные позвонки. Размеры поля облучения составляют $20 \cdot 10 \text{ см}^2$. Нейтронно-активационный метод позволяет определить абсолютное содержание кальция и фосфора в позвоночнике с погрешностью ± 4 и $\pm 6 \%$, соответственно.

Для индивидуума могут быть получены и относительные изменения Са и Р при контролировании уровня облучения пациента. Проведенные исследования показали, что для больных ренальной остеодистрофией имеется корреляция между содержанием кальция в позвоночнике и во всем теле. Например, при терапии витаминами группы D₃ наблюдается у большинства пациентов повышение содержания кальция в позвоночнике и во всем теле. Вместе с тем содержание кальция при ренальной остеодистрофии в костях и позвоночнике не связано с радиальной плотностью костей.

Для других заболеваний (остеопороз, гиперкальциемия в слабой форме) содержание фосфора в позвоночнике не коррелирует с общим содержанием кальция в теле пациента и радиальной плотностью костей. Последнее, вероятно, связано с тем, что существуют региональные изменения в костях, не связанные с общим содержанием кальция и зависящие от степени и тяжести болезни.

Измерение содержания железа и меди в печени представляет большой интерес в тех случаях, когда есть основание подозревать повышенное содержание этих элементов. Например, при некоторых заболеваниях крови (гемохроматозе и болезни Уилсона) количество железа и меди в печени достигает 20 и 1 г, соответственно. Чувствительность нейтронно-активационного метода такова, что может быть определено содержание железа на уровне 1 г и меди на уровне 150 мг. Этот же метод используется и для определения изменений содержания этих элементов в печени при проведении так называемой «хелатной» терапии.

В настоящее время предпринимаются усилия для повышения чувствительности активационных методов. Тем не менее уже сейчас к несомненному достоинству использования этого метода относят его неинвазивность, т. к. его применение не наносит пациенту повреждений.

Определение содержания азота

Количество азота во всем теле определяется по наведенной активности при тотальном облучении пациента. Нейтронное излучение гене-

рируется от циклотрона с частотой около 6 кГц и длительностью импульсов 10 мкс.

Далее, после 10 мкс паузы, необходимой для замедления быстрых нейтронов до тепловых скоростей, включаются сцинтилляционные детекторы для подсчета гамма-квантов с энергией 10,8 МэВ, образующихся за счет реакции $^{14}\text{N}(n, \gamma)^{15}\text{N}$.

Одновременно образуются гамма-кванты (с энергией 2,2 МэВ) захватного излучения на водороде $\text{H}(n, \gamma)\text{D}$.

Отношение импульсов этих двух гамма-квантов в течение 20 мкс исследований служит основой для полного определения азота в теле пациента. Дополнительно вводятся поправки на вес больного и данные калибровки, полученные с помощью тканеэквивалентного фантома. Погрешность этого метода составляет $\pm 4\%$.

В процессе исследований выяснилось, что интересно сравнивать количество содержания азота с калием. Было обнаружено, что для здоровых людей отношение содержаний этих элементов во всем теле практически постоянно.

Для пациентов с различными заболеваниями это отношение может измениться почти в 2 раза. Возможно, в будущем этот тест явится объективным критерием физиологического состояния пациента.

В заключение следует подчеркнуть, что нейтронно-активационный анализ является относительно новым инструментом в медицине. Многие экспериментальные факты еще требуют уточнений, дополнений и осмысления. Но потенциальные возможности этого метода несомненны. Практически 99 % элементов, входящих в состав человека, могут быть исследованы таким образом и, возможно, в медицине в будущем нейтронно-активационный анализ пациента будет применяться так же широко, как и методы радиоизотопных исследований.

В университете г. Бирмингема этот метод используется уже около десяти лет и в принципе идентичен обычному нейтронно-активационному анализу, только мишенью для облучения нейтронами служат не образцы или пробы различных веществ, а сами пациенты.

Для этой цели используются нейтроны, образующиеся при бомбардировке литиевой или бериллиевой мишеней заряженными частицами с энергией около 10 МэВ на нуклон. При бомбардировке протонами литиевой мишени и дейтонами или ядрами гелия бериллиевой мишени граничная энергия нейтронов составляет 9 и 35 МэВ, соответственно.

Медицинские исследования проводятся с целью определения содержания во всем теле кальция, азота, натрия. Кроме того, нейтронной активацией определяется количество железа, меди и кадмия в печени, а также кальция и фосфора в позвоночнике. В зависимости от цели иссле-

дования количество наведенной активности вычисляется или по кривым распада, или по спектрометрическим измерениям. В первом случае пациента после облучения помещают в счетчик всего тела, защищенный от внешних источников излучений защитой из железа. Определение активности производится с помощью восьми кристаллических детекторов NaI (4 над и 4 под больным). Детекторы калибруются по источникам известной активности, распределенным в фантоме человека. Во втором случае спектрометрические измерения производятся последовательно за импульсами нейтронного излучения или одновременно с облучением нейтронами (при определении азота или кадмия).

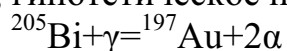
При спектрометрических измерениях используются в основном кристаллы NaI. Для определения кадмия применяют Ge–Li полупроводниковые детекторы, для того чтобы разрешить гамма-излучение кадмия (662 кэВ) от пика аннигиляционного излучения (511 кэВ).

Радиационные нагрузки при нейтронно-активационном анализе пациентов сравнимы с нагрузками при обычной рентгеновской диагностике. Например, при облучении всего тела пациента для определения содержания Na, Ca, N доза облучения составляет $3 \cdot 10^{-3}$ Зв, 10^{-2} Зв, 10^{-3} Зв, соответственно. При локальном облучении позвоночника дозы облучения составляют около $3 \cdot 10^{-2}$ Гр или 10^{-3} Зв, а при облучении печени – от $3 \cdot 10^{-2}$ Гр или $3 \cdot 10^{-3}$ – $5 \cdot 10^{-3}$ Зв. (Напомним, что Грей (Гр) является единицей поглощенной дозы, а Зиверт (Зв) – единицей эквивалентной поглощенной дозы.) Для сравнения приведем дозы облучения при некоторых рентгеновских исследованиях. Доза облучения печени при некоторых исследованиях достигает 0,3 Гр, а при снимках зубов – $2 \cdot 10^{-2}$ Гр.

Несмотря на то что дозы облучения пациентов при активации нейтронами сравнимы или даже меньше, чем при рутинных рентгеновских процедурах, назначения врачом на этот вид диагностики производятся особенно тщательно, и положительное решение принимается только тогда, когда другие методы исследований не в состоянии представить адекватную информацию.

6.3.4. Радиоактивное золото

Писатель К. Дауман в своей книге "Конец золота", вышедшей в 1938 году, сообщил нам рецепт, как превратить висмут в золото: отщеплением двух альфа-частиц от ядра висмута с помощью рентгеновских лучей большой энергии. Такая (γ , 2α) реакция неизвестна и до настоящего времени. Помимо этого, гипотетическое превращение



не может идти и по другой причине: не существует устойчивого изотопа ^{205}Bi . Висмут – моноизотопный элемент! Единственный же природный изотоп висмута с массовым числом 209, который можно получить только по реакции Даумана – только радиоактивное золото-201, которое с периодом полураспада 26 мин снова превращается в ртуть. Как видим, герой романа Даумана, ученый Баргенгронд, не мог получить золото!

Теперь нам известно, как действительно получить золото. Вооруженные знанием ядерной физики рискнем на мысленный эксперимент: 50 кг ртути превратим в атомном реакторе в равновесное золото – в золото-197. Настоящее золото получается из ртути-196. К сожалению, этого изотопа содержится в ртути только 0,148 %. Следовательно, в 50 кг ртути присутствует лишь 74 г ртути-196, и только такое количество мы можем трансмутировать в истинное золото.

74 г ртути-196 содержат $2,27 \cdot 10^{23}$ атомов. В секунду с данным потоком нейтронов мы можем трансмутировать $1,69 \cdot 10^{15}$ атомов ртути. Сколько времени потребуется для превращения всего количества ртути-196? Вот ответ: потребуются интенсивная бомбардировка нейтронами из реактора с большим потоком в течение четырех с половиной лет! Эти огромные затраты мы должны произвести, чтобы из 50 кг ртути в конце концов получить только 74 г золота, и такое синтетическое золото надо еще отделить от радиоактивных изотопов золота, ртути и др.

Да, это так, в век атома можно сделать золото. Однако процесс слишком дорог. Золото, полученное искусственно в реакторе, бесценно. Проще было бы продавать в качестве “золота” смесь его радиоактивных изотопов. Может быть, писатели-фантасты соблазнятся на выдумки с участием этого “дешевого” золота?

“Mare tingerem, si mercuris esset” (Я море бы превратил в золото, если бы оно состояло из ртути). Это хвастливое высказывание приписывали алхимику Раймундусу Луллусу. Предположим, что мы превратили не море, но большое количество ртути в 100 кг золота в атомном реакторе. Внешне неотличимое от природного, лежит перед нами это радиоактивное золото в виде блестящих слитков. С точки зрения химии это тоже чистое золото.

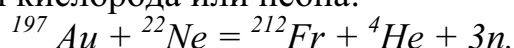
Какой-нибудь миллионер покупает эти слитки по сходной, как полагает, цене. Он и не подозревает, что в действительности речь идет о смеси радиоактивных изотопов ^{198}Au и ^{199}Au , период полураспада которых составляет от 65 до 75 ч. Можно представить себе этого скрягу, увидевшего, что его золотое сокровище буквально утекает сквозь пальцы.

За каждые три дня его имущество уменьшается наполовину, и он не в состоянии это предотвратить; через неделю от 100 кг золота останется только 20 кг, через десять периодов полураспада (30 дней) – прак-

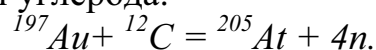
тически ничего (теоретически это еще 80 г). В сокровищнице осталась только большая лужа ртути. Обманчивое золото алхимиков!

Современная наука вне всякого сомнения скажет: превращение элементов – да, превращение в золото – нет! Для чего? Сегодня золото растрачивают, не задумываясь, для синтеза других элементов, представляющих интерес для науки. Золото используют, чтобы искусственно получить изотопы франция и астата – элементов, которые, как известно, нельзя получить из природных источников. Здесь также алхимию ставят с ног на голову.

Франций получают из золота, которое в современных ускорителях бомбардируют ионами кислорода или неона:



Астат образуется путем превращения золота при обстреле последнего разогнанными ядрами углерода:



Вот, каким “дорогим” стало золото для современной науки: она не стремится получить его искусственно, а, скорее, использует как “сырье” для синтеза других элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ионизирующие излучения в медицине: учебное пособие // В.А. Костылев, А.П. Черняев, Н.А. Антипина – МГУ имени М.В. Ломоносова.
2. Куренков Н.В. Применение радионуклидов для диагностики и терапии в Австралии. – Атомная техника за рубежом, 2002. № 7. С. 3–7.
3. Green J. Future supply of medical radioisotopes in Australia / Phd Thesis. – Australia: University of Wollongong, July 1997.
4. Куренков Н.В., Чувиллин Д.Ю. Производство ^{99}Mo для использования в ядерной медицине в генераторах $^{99\text{m}}\text{Tc}$. – Атомная техника за рубежом. – 1999. № 5. С. 8–14.
5. Medical and Industrial Radioisotopes.-ANSTO Brochure Private Mail Bag 1, Menai, NSW 2234. – Australia, July 1999.
6. Buckland R. The Nation's Nuclear Medicine Supplier. – ATSE Focus, № 100, 15 January 2000.
7. Smith S.V., Di Bartolo N.M. new process for the Separation of ^{111}In from ^{112}Cd . – 4th International Conference on Isotopes, Cape Town, South Africa, 10–14 March 2002. – final Programme and Abstracts. – p. 30.
8. Izard M.E. Smith S.V. Automation of ^{64}Cu Production and ^{68}Zn Recycling. – Ibid. – p. 42.

9. Куренков Н.В. Применение радионуклидов для диагностики и терапии в США. – Атомная техника за рубежом. 2001. № 11. С. 11–15.
10. Expert Panel: Forecast Future Demand for Medical Isotopes. Report. – March 1999.
11. Nuclear Energy Research Advisory Committee(NERAC). Subcommittee for Isotope Research & Production Planning. Final Report. – April 2000.
12. Availability of Radioisotopes Produced in North America. – J.Nucl.Med. 2000. V. 41. No. 9. P. 13N.
13. Wagner H.M. Clinical Pet: Role in Diagnosis and Management. – Ibid. No 8. p. 36N.
14. Яблоков Б.Н. Протоны против рака. – Атомная техника за рубежом. 2002. № 2. С. 20–22.
15. Reisselman. Protons against Cancer– FermiNews. 2001. v. 24. Nol. p. 10–13.
16. CERN Courier. 2001. v. 41. Nol. p. 5.
17. Опыт работы онкологических учреждений// Сибирский онкологический журнал. 2003. № 1. С. 30–33.
18. Л.И. Мусабаева. Быстрые нейтроны в онкологии. – Томск: РНЦ СО РАМН, 2000.
19. www.minatom.ru
20. В.Н. Манохин, Е.Г. Матусевич, Физико-технические основы ядерной энергетики. – Обнинск, 1993.
21. Е. Жербин, Мирные профессии нейтронов. – М., 1980.
22. Радиоактивные изотопы в химических исследованиях. – Л.–М., 1965.
23. Рогинский С. 3., Теоретические основы изотопных методов изучения химических реакций. – М., 1956.
24. Ядерно-физические методы анализа веществ // Всесоюзная научно-техническая конференция “XX лет производства и применения изотопов и источников ядерных излучений в народном хозяйстве СССР ” Минск.– М., 1968–1971.
25. Камен М., Радиоактивные индикаторы в биологии. пер. с англ. – М., 1948.
26. Хевеши Г. Радиоактивные индикаторы, их применение в биохимии, нормальной физиологии и патологической физиологии человека и животных, пер. с англ. – М., 1950.
27. Бюллетень МАГАТЭ. – 2001. № 43/2.
28. Г. Сиборг Человек и атом. – Изд-во «Мир», 1973.
29. Р. Меррей Атомная энергетика. – Москва Энергия, 1979.
30. К. Мухин Занимательная ядерная физика. – Энергоатомиздат, 1985.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

XXI век несомненно будет веком растущего воздействия человека на окружающую среду, при этом ядерная энергетика, по мнению большинства ученых и специалистов, признается безальтернативным источником получения энергии.

Её успешное развитие обеспечивает экологическую безопасность окружающей среды и открывает хорошие перспективы будущим исследованиям специалистов в области космоса, промышленности, сельского хозяйства, медицины и т. д. Ядерные технологии способны расширить возможности человека в решении глобальных проблем XXI века.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ЯДЕРНОЕ ОРУЖИЕ	6
История создания ядерного оружия в СССР и США	6
Типы ядерного оружия и физические основы	33
Ныне физики в почете	49
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	52
ПРИЛОЖЕНИЯ	54
2. ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ	93
Человеческое общество и энергия	93
Атомная энергетика в мире и России. Состояние, перспективы. Атом- ные станции малой мощности	99
Облученное ядерное топливо (ОЯТ) и техническая практика обращения с радиоактивными отходами РАО. МОКС-топливо	121
Радиация и ее воздействие на живой организм	134
Чернобыльская авария. Как это было? Почему это было?	150
Перспективы атомной промышленности Сибири и Томского региона	157
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	177
ПРИЛОЖЕНИЯ	180
3. ЯДЕРНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ТРАНСПОРТНЫЕ УСТАНОВКИ	217
Атомные суда в мирных целях	217
Атомные подводные лодки и надводные корабли	224
Ядерно-двигательные установки в космосе	236
Литература	246
4. ЯДЕРНЫЕ ВЗРЫВЫ В МИРНЫХ ЦЕЛЯХ	249
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	265
5. ЯДЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ	267
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	283
6. РАДИОАКТИВНЫЕ ИЗОТОПЫ И ИОНИЗИРУЮЩИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ ОБЛАСТЯХ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ	284
Медицина	284
6.1.1. Лучевая терапия	285
6.1.2. Радионуклидная диагностика	302
Сельское хозяйство	315
Активационный анализ	322
6.3.1. Криминалистика и экология	323
6.3.2. Изотопная геохронология и радиоуглеродный метод	327
6.3.3. Анализ человека	332
6.3.4. Радиоактивное золото	335
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	337
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	339

Учебное издание

Бойко Владимир Ильич
Кошелев Феликс Петрович

**ЯДЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В РАЗЛИЧНЫХ СФЕРАХ
ЧЕЛОВЕЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ**

Учебное пособие

Редактор

О.Н. Свинцова

Дизайн обложки

О.Ю. Аршинова

О.А. Дмитриев

Подписано к печати 04.08.2008. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».


Печать Хегох. Усл. печ. л. 19,83. Уч.-изд. л. 17,94.

Заказ ••• . Тираж 500 экз.



Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2000



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.