

ЭНЕРГИЯ ДЛЯ БУДУЩЕГО

Ядерная альтернатива

Декларация ЕФО

Европейское физическое общество

ENERGY FOR THE FUTURE

The Nuclear Option

A position paper of the EPS

European Physical Society

more than ideas

ЭНЕРГИЯ ДЛЯ БУДУЩЕГО – ядерная альтернатива

Декларация ЕФО

Европейское физическое общество (ЕФО) является независимой организацией, финансируемой национальными физическими обществами, другими организациями и индивидуальными членами. Оно представляет свыше 100,000 физиков и может проводить экспертизу во всех областях, связанных с физикой.

Декларация состоит из двух частей: изложения позиции ЕФО, суммирующей рекомендации, и научно-технической части. Научно-техническая часть является сутью Декларации, так как в ней содержатся все факты и аргументы, формирующие основу декларации ЕФО.

1. Цель Декларации (преамбула)

Использование ядерной энергии для генерации электричества является предметом широкой дискуссии: некоторые страны существенно увеличивают ее использование, другие постепенно сворачивают, а в некоторых ее использование запрещено законом. Декларация нацелена на сбалансированное представление «за» и «против» ядерной энергетики, на информирование ответственных за принятие решений лиц, а также широкой общественности путем сообщения доступных проверке фактов. Она нацелена на демократическое обсуждение, признающее научные и технические факты, а также на связанную с ядерной энергетикой озабоченность людей.

2. Будущее потребление энергии и производство электроэнергии (Раздел 1)

Рост населения Земли с 6,5 млрд. сегодня до, оценочно, 8,7 млрд. к 2050 году будет сопровождаться увеличением потребности в энергии примерно на 1,7 % в год. Нет такого источника энергии, который сам по себе обеспечит нужды будущих поколений. В Европе примерно треть производимой энергии приходится на электроэнергию, 31,0% которой производится атомными электростанциями и 14,7% возобновляемыми источниками энергии.

Хотя вклад возобновляемых источников энергии существенно вырос с начала их использования в 1990-х годах, потребности в электричестве невозможно удовлетворить без вклада ядерной энергетике.

3. Потребность в энергоцикле, свободном от CO₂ (Раздел 1)

Выброс антропогенных парниковых газов, среди которых двуокись углерода составляет основной вклад, усилил естественный парниковый эффект и привел к глобальному потеплению. Главный вклад дают сжигаемые полезные ископаемые. Дальнейшее увеличение парникового эффекта приведет к губительным последствиям для жизни на Земле. Для борьбы с изменением климата необходим энергетический цикл с наименьшим возможным выбросом CO₂. Атомные электростанции производят электричество без выброса углекислого газа.

4. Производство ядерной энергии сегодня (Раздел 2)

Во всем мире имеется 435 атомных электростанций, которые производят 16% мировой электроэнергии. Они надежно поставляют электроэнергию в режимах базисной и пиковой нагрузок. Чернобыльская авария привела к широкому обсуждению безопасности атомных электростанций, и по этому поводу была выражена серьезная озабоченность. Вероятно, производство ядерной энергии в Европе не будет существенно расти в будущем; в то же время, существенное расширение использования ядерной энергии предвидится в Китае, Индии, Японии и Южной Корее.

5. Риски (Разделы 3 и 4)

Как производство любого вида энергии, производство ядерной энергии несет в себе определенные риски. Безопасность атомных электростанций, хранение отходов, возможность распространения и террористические угрозы являются предметом серьезного беспокойства. Насколько

приемлемыми можно считать связанные с этим риски, зависит от оценки специфических рисков, связанных с альтернативными источниками энергии. Эту оценку можно дать рационально на основе технических аргументов, научных разработок, открытого обсуждения точек зрения и сравнения с рисками альтернативных источников энергии.

6. Производство ядерной энергии в будущем

Откликом на возросшие требования к безопасности стала разработка нового поколения реакторов (Поколение III), которые отличаются повышенной безопасностью и улучшенной технологией предотвращения катастроф с тем, чтобы в случае крайне маловероятного события – плавления ядра реактора – весь радиоактивный материал остался внутри системы локализации аварии.

В 2002 году международная рабочая группа представила концепции реакторов IV поколения, являющихся по сути безопасными. Они также являются более экономичными при генерации электричества, производят меньшее количество ядерных отходов, и менее подвержены риску распространения ядерных материалов. Хотя необходимы дальнейшие исследования, ожидается, что некоторые из этих систем войдут в действие уже к 2030 году.

Ускорительно-бланкетные системы (ADS, Accelerator Driven Systems) предлагают возможность преобразования плутония и второстепенных актинидов, несущих основной долговременный радиоактивный риск современных реакторов, основанных на делении атомного ядра. Они также имеют потенциал внести существенный вклад в крупномасштабное производство энергии после 2020 года.

Реакторы, основанные на синтезе, производят энергию без выброса CO₂ за счет синтеза дейтерия и трития. В отличие от реакторов, основанных на делении, реакторы синтеза по сути не производят долгоживущих радиоактивных отходов. Эта многообещающая возможность может быть доступна во второй половине этого столетия.

7. Декларация ЕФО

Перед лицом экологических проблем на нашей планете, ради будущих поколений нынешнее не должно отказаться от технологии, доказавшей способность надежного и безопасного производства электричества без выброса CO₂. Ядерная энергия может и должна дать важный вклад в набор источников с низким выбросом CO₂. Это возможно только при поддержке общества через открытую дискуссию, уважающую озабоченность людей и учитывающую доступные проверке научные и технические факты.

Так как некоторые европейские страны выступают против производства ядерной энергии, а исследования ядерного синтеза поддерживаются лишь в нескольких странах, число студентов и экспертов в данной области уменьшается. Имеется ясная потребность в образовании в области ядерной физики и сохранения уже имеющихся в этой области знаний, а также долговременных исследований ядерного деления и синтеза и методов сжигания, преобразования и хранения отходов.

Европа не должна отставать в разработке реакторов независимо от тех решений, которые принимаются по поводу их строительства в Европе. Это является важной вспомогательной причиной для инвестиций в исследования и технологии ядерных реакторов, если Европа намерена успевать за программами в таких быстро развивающихся странах, как Китай и Индия, приверженных строительству атомных электростанций, и помогать им обеспечивать безопасность, например, через активное участие в МАГАТЭ.

Исполнительный комитет ЕФО

Ноябрь 2007

Предисловие

Европейское физическое общество берет на себя ответственность определить свою позицию в области, в которой физика играет большую роль и которая представляет большую важность для общества. Необходимость сформулировать приведенные ниже утверждения по ядерной энергетике и ее роли в будущем широкомасштабном экологичном производстве электроэнергии без выбросов CO₂ вызвана тем фактом, что многие высокоразвитые европейские страны не рассматривают ядерную энергетiku в качестве варианта в своей долгосрочной политике в области энергетике. Изменение климата, рост мирового населения, ограниченность ресурсов нашей планеты, быстрый экономический рост азиатских и латиноамериканских стран и просто стремление развивающихся стран к разумному уровню жизни – все это неизбежно указывает на необходимость экологически чистых источников энергии.

Авторы данного отчета являются членами Совета по ядерной физике (СЯФ) Европейского физического общества, деятельность которого связана с фундаментальными исследованиями в области ядерной физики, но не касается промышленной ядерной энергетике. Данный отчет представляет наш взгляд на плюсы и минусы ядерной энергии как экологически чистого источника, удовлетворяющего наши долгосрочные потребности в энергии. Мы требуем пересмотреть решение о выводе из эксплуатации атомных электростанций,

которые функционируют безопасно и эффективно, и подчеркиваем необходимость будущих исследований в области ядерной энергетике, особенно в области реакторов IV поколения, которые обещают существенное продвижение в сферах безопасности, переработки ядерного топлива, сжигания и утилизации отходов. Мы подчеркиваем необходимость сохранять знания о ядерной энергетике посредством образования и исследований в европейских университетах и институтах.

Хартвиг Фрейслебен (председатель СЯФ),
Технический университет Дрездена, Германия

Рональд С. Джонсон,
Университет Сюррея, Гилдфорд,
Великобритания

Олаф Шольтен,
KVI, Гронинген, Нидерланды

Андреас Тюрлер,
Технический университет Мюнхена, Германия

Рамон Висс,
Королевский институт технологии, Стокгольм,
Швеция

Ноябрь 2007,
Европейское физическое общество

ул. братьев Люмьер, 6
68060 Мюлуз • Франция

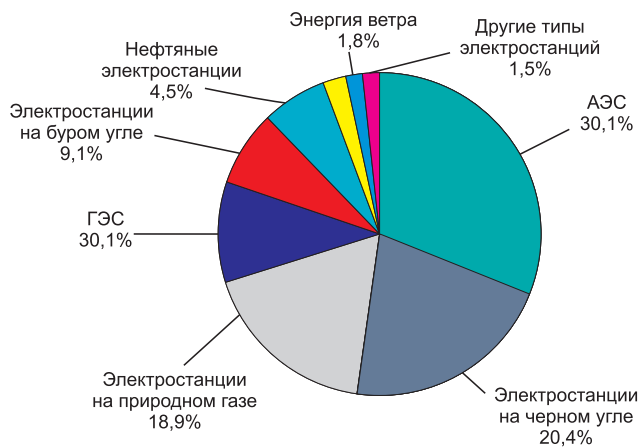
ЭНЕРГИЯ ДЛЯ БУДУЩЕГО – ядерная альтернатива

>>> Научно-техническая часть

1. Потребности в экологически чистой энергии, производимой без выбросов CO₂

Доступность энергии каждому – это необходимая предпосылка благосостояния человечества, мира во всем мире, социальной справедливости и экономического процветания. Однако у человечества имеется

одна общая планета, которую мы обязаны оставить следующим поколениям в жизнеспособном состоянии. Это выражается термином "экологичность", определение которого дано в отчете Брундтланда [1] в 1987 году: "Экологичное развитие удовлетворяет потребности современного поколения, не уменьшая надежды будущих поколений на их



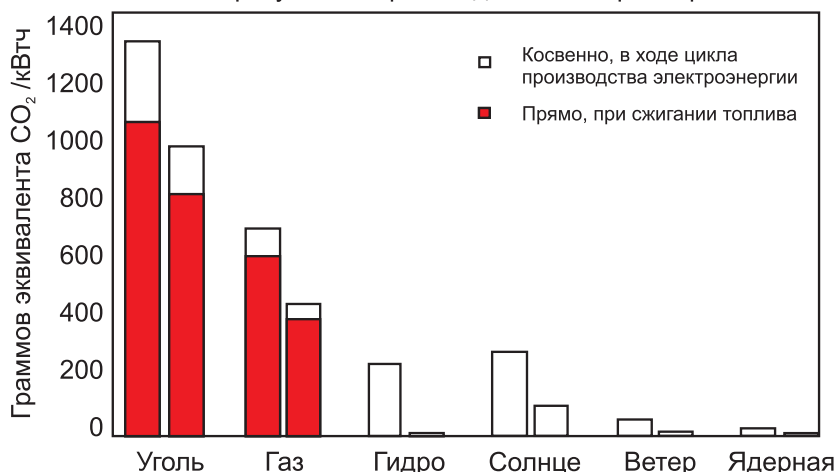
▲ Рис. 1. Распределение производства электричества по видам топлива, используемому на электростанциях 25 странами ЕС, 2004 (Источник: [2])

удовлетворение". Этот этический императив требует, чтобы любая дискуссия о будущем энергетики принимала во внимание краткосрочные и долгосрочные аспекты источников энергии, такие как доступность, безопасность и влияние на окружающую среду. Для окружающей среды чрезвычайно опасно производство загрязнений и увеличение их количества, будь это CO₂ от сжигания ископаемого топлива, радиоактивные загрязнения от сжигания ядерного топлива и т.д. В следующих параграфах обрисована ситуация с наиболее широко используемыми источниками первичной энергии и производством электричества в Европе на сегодняшний день, а также рассмотрена проблема выбросов CO₂. Мы также обращаемся к вопросу энергопотребления в будущем.

Источники первичной энергии

В 2004 году полное потребление первичной энергии 25-ю странами Евросоюза составило 0,88 миллиардов тонн в нефтяном эквиваленте, или 10,2 ПВтч (1 ПВтч = 1 петаватт × час = 1 миллиард МВтч) [2]. Эта энергия была получена из ряда широко используемых источников первичной энергии (ядерное топливо: 28,9%; природный газ: 21,8%; антрацит и бурый уголь: 21,6%; сырая нефть: 15,3%) и их производных (кокс, нефтяное топливо, бензин) и используемых в меньших масштабах возобновляемых источников энергии (биомасса и отходы: 8,2%; гидроэнергия: 3,0%; геотермальная энергия: 0,6%; ветер: 0,6%; всего 12,4%). Первичные источники удовлетворяют потребностям промышленности, сельского хозяйства, транспорта и отдельных людей в концентрированных объемах энергии. Кроме того, нефть и газ можно использовать как распределяемые источники, обеспечивающие гибкость, необходимую для мелкомасштабного производства энергии, например, в транспортном секторе. Из приведенных выше данных очевидно, что ядерная энергия на сегодняшний день составляет значительную долю энергопотребления. Около 58,7% всей производимой энергии получается из сжигаемого ископаемого топлива (антрацит, бурый уголь, сырая нефть и природный газ) и сопровождается выбросами CO₂, которые вносят 75%-й вклад в антропогенный парниковый эффект.

Выброс газов, вызывающих парниковый эффект, в результате производства электроэнергии



◀ Рис. 2. Результаты анализа выбросов CO₂ за один цикл производства энергии различными методами (Источник: [5])

Другими веществами, вносящими вклад в существование парникового эффекта, являются метан (CH_4 , 13%), оксид азота (N_2O , 6%) и фреон (5%) [2]. Для подавления парникового эффекта необходимо минимизировать использование ископаемого топлива или снизить, где это возможно, выбросы двуокси углерода. Самое большое снижение выбросов CO_2 возможно в сфере производства электроэнергии, транспортном секторе, а также путем экономного использования, например, с помощью энергосбережения.

Производство электричества и выброс CO_2

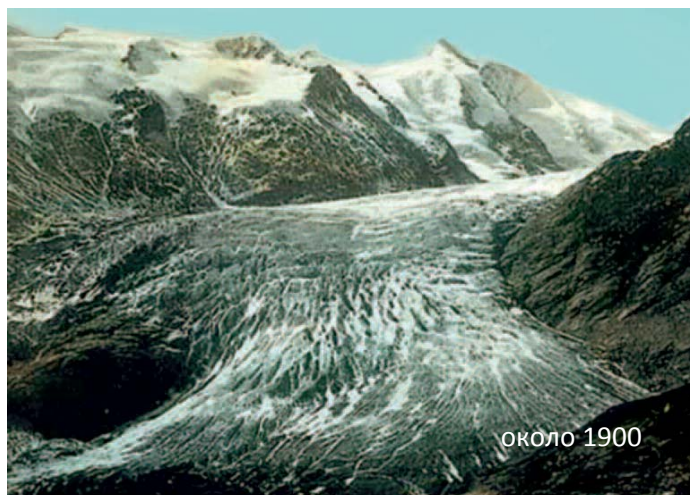
Полное производство электроэнергии в размере 3.2 ПВтч 25 странами ЕС соответствует 32,3% всей энергии, произведенной 25 странами ЕС в 2004 году. Детали, касающиеся различных источников, показаны на Рис.1. Около 31,0% производства этой электроэнергии пришлось на атомные электростанции, 10,6% на гидроэлектростанции, 2,1% на станции, работающие на сжигании биотоплива, 1,8% на ветряные турбины, и 1,5% на остальные источники, среди которых вклад геотермальных составляет 0,2%; вклад фотогальванических источников был пренебрежимо мал [2]. Ни один из перечисленных источников не вырабатывает CO_2 при работе. Напротив, электростанции, работающие на газе, нефти, и угле производят CO_2 ; их совокупный вклад в производство электроэнергии составляет 52,9%.

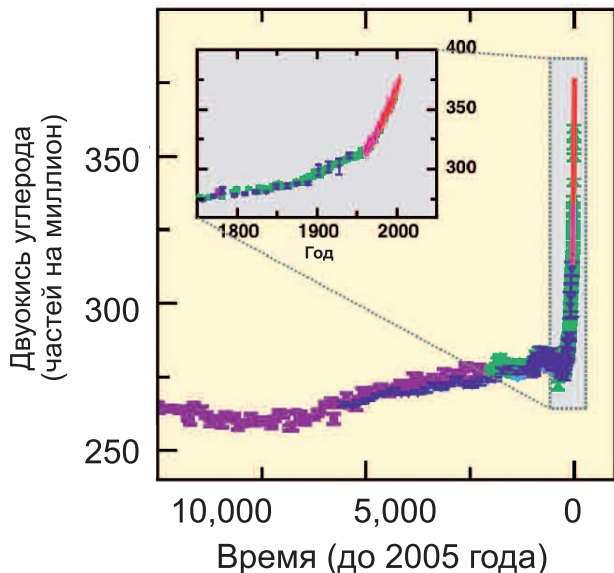
Из приведенных данных очевидно, что АЭС составляют оплот снабжения Европы

электроэнергией; они в больших масштабах обеспечивают базисную нагрузку и, в случае необходимости, пиковую нагрузку. Снижение их доли в энергоснабжении приведет к серьезному недостатку электричества в Европе.

Все источники электричества требуют строительства предназначенных для них станций и обеспечения топливом. Сюда также включаются извлечение, обработка, переработка и транспортировка, сопровождаемые выбросом CO_2 . Вместе эти этапы формируют восходящий топливный цикл. Существует также и нисходящий топливный цикл. В случае АЭС он включает обработку и хранение израсходованного топлива, а в случае электростанций, работающих на сжигании угля и нефти – удержание двуокси серы (SO_2), не сгоревшего углерода, а в идеальном случае, хранение CO_2 [3] во избежание его выброса в атмосферу. Эта технология, однако, требует тщательного исследования, поскольку эффекты долгосрочного хранения CO_2 пока не известны. Закрытие электростанции также является частью нисходящего топливного цикла. Как восходящий так и нисходящий топливный циклы неизбежно сопровождаются выбросом CO_2 . Преимущества и недостатки того или иного способа производства электроэнергии можно обсуждать, только оценивая полный жизненный цикл рассматриваемого способа.

▼Рис.3. Подножие ледника Пастерце с горой Гросглокнер в Альпах (3798 м) (Источник: [11])





▲ Рис. 4. Концентрация CO₂ (частей на миллион) в атмосфере за последние 10 000 лет; вставка: с 1750 года (Источник: [10]).

Количество CO₂ на 1 кВтч произведенной электроэнергии иногда называется углеродным следом. Эта величина может быть вычислена в результате анализа жизненного цикла [4]. Получаемые результаты зависят от типа электростанции, и дают широкий разброс значений, изображенных на Рис. 2 в виде пар столбиков для каждого вида топлива.

В других работах используются иные меры, что приводит к несколько отличающимся значениям. Модель Глобального Выброса для Интегрированных Систем, разработанная Германским Эко-Институтом [6], дает следующие результаты по выбросу CO₂ (в граммах) на кВтч: уголь (около 1000), газ с рециркуляцией (около 400), ядерная (35), гидро (33), ветер (20) (цитируется по [7]). Эти значения отражают ситуацию в Германии, и, возможно, будут отличаться в других странах [8]. Например, во Франции 79% электричества генерируется на АЭС (в Германии – 31%), и поэтому выброс углекислого газа там ниже, чем в Германии. Даже если принять значения из [4], электростанция, сжигающая уголь, выбрасывает от 29 до 37 раз больше CO₂, чем атомная электростанция. Это означает, что производство электроэнергии на АЭС (31,0% из 3,2 ПВтч) позволяет избежать эмиссии от 990 до 1270 миллионов тонн CO₂ каждый год, тогда как все возобновляемые источники

энергии, вместе взятые (14,7 % от 3.2 ПВтч), дают почти вдвое меньшее значение. Ядерная энергетика позволяет удерживать CO₂ больше, чем выброс 704 миллиона тонн CO₂ всеми автомобилями Европы каждый год (4,4 Ткм/год [2], 1 Ткм=1 Теракилометр=1 миллион миллионов км; 160 г/км [9]). Замещение электроэнергии АЭС на электричество за счет ископаемого углеродного топлива в Европе было бы эквивалентно более чем удвоению выброса углекислого газа автомобильным парком Европы. Глобальный выброс CO₂ порядка 28 миллиардов тонн [3] возрос бы на 2,6–3,5 миллиардов тонн в год, если бы ядерное топливо было заменено на углеродное топливо.

Эти примеры анализа жизненного цикла несомненно показывает, что ядерная энергетика дает пренебрежимо малый вклад в эмиссию парниковых газов, а также, что этот вывод является независимым от отношения к ядерной энергии конкретных учреждений, проводивших анализ.

Изменение климата

С начала индустриализации на нашей планете наблюдается рост средней температуры, который почти наверняка является следствием усиления парникового эффекта за счет увеличения эмиссии парниковых газов в результате человеческой деятельности [10]. Свидетельствами увеличения температуры являются таяние ледников (Рис.3) и зон вечной мерзлоты, а также арктических льдов с повышенной скоростью.

За это же время концентрация в атмосфере антропогенных парниковых газов, среди которых двуокись углерода (CO₂) вносит основной вклад, возросла до уровня, который является беспрецедентным на протяжении нескольких сотен тысяч лет; Рис.4 показывает динамику концентрации CO₂ за последние 10000 лет. Среди ученых имеется согласие по поводу того, что дальнейшее увеличение концентрации углекислого газа в атмосфере приведет к губительным последствиям для жизни на Земле [10,12]. Таким образом, возросшая эмиссия парниковых газов,

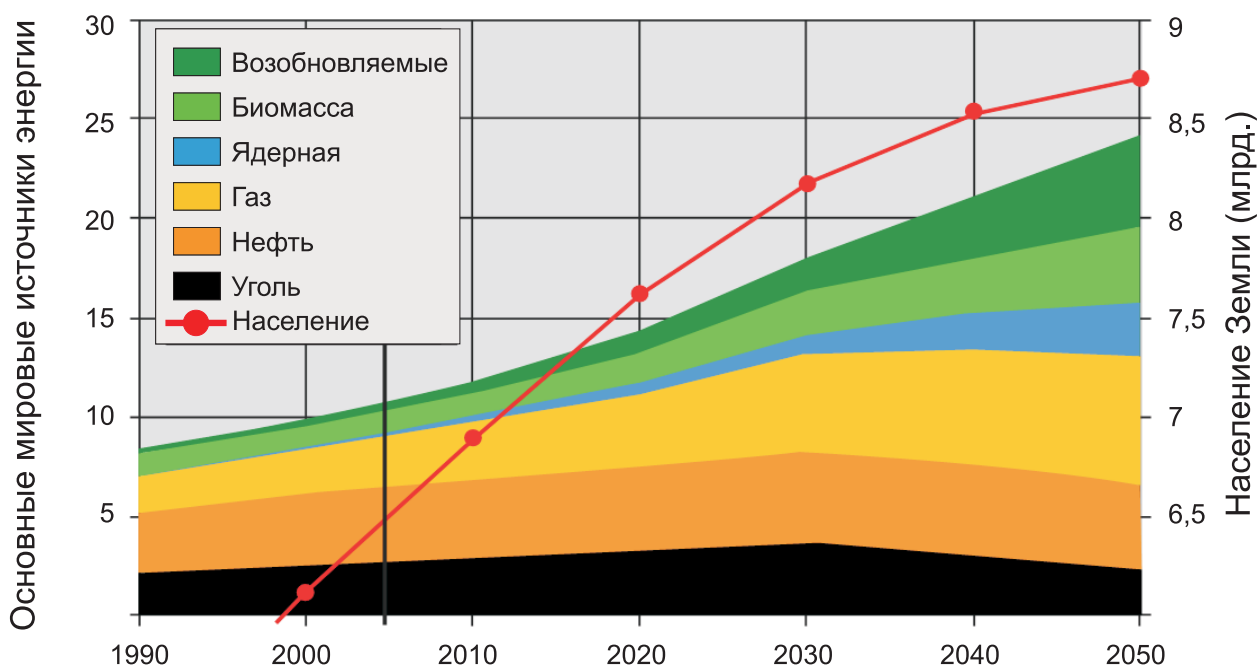
происходящая за счет сжигания ископаемых, должна контролироваться в соответствие с Киотским протоколом [13].

Основные мировые источники энергии

Сценарии основных источников энергии в будущем подробно рассматривались во многих исследованиях. Устойчивый сценарий развития МАЭ (Международного энергетического агентства) и ОЭСР (Организации по экономическому сотрудничеству и развитию) [14] предсказывает прогрессию, представленную на рис. 5 в Гт н.э. (1 Гт н.э. = 1 гигатонна нефтяного эквивалента = 11.63 МВтч), с ростом мирового населения от 6,5 миллиардов сегодня до приблизительно 8,7 миллиардов в 2050 году. Для обеспечения растущих потребностей в электроэнергии, необходимо будет увеличить вклад всех имеющихся на данный момент источников. После 2030, как показано на рис. 5, когда ископаемое топливо начнет давать меньший вклад в основную энергию, ядерная, биомасса и другие источники возобновляемой энергии (гидроэнергия, ветровая, геотермальная) начнут усиленно эксплуатироваться. Согласно «Обзору мировой энергетики в 2004 году» МАЭ [16], потребности в электроэнергии и связанные с этим выбросы CO₂ будут расти до 2030 года, в среднем на 1,7% в год.

Необходимо иметь в виду, что основным источником возобновляемой энергии является гидроэнергия (см. рис. 1), чей вклад в Европе не может быть увеличен в обозримом будущем; это же справедливо и для геотермальных источников. Фермы ветряных мельниц стоятся в большом количестве, начиная с 1990 года; однако, едва ли электроэнергия, получаемая из ветра, заменит в ближайшем будущем электроэнергию, генерируемую газом, нефтью и углем (всего 52,9%) или ядерную (31,0%); как можно видеть на Рис. 5, ее годовой положительный прирост недостаточно высок. Следовательно, должны использоваться все возможные источники энергии, чтобы справиться с растущим потреблением. Недавний амбициозный план ЕС по сокращению выбросов к 2020 на 20% ниже уровня 1990 года основывается на значительном сокращении выбросов в транспортном секторе, а также посредством более быстрого роста, чем в прошлом, солнечных и ветряных ферм.

▼ Рис. 5. Сценарий первичных источников энергии для поддержания будущих потребностей (Источник: [14], см. также [15].) Начало отсчета на шкале населения отвечает 1998 году.



Однако производство электричества, например, ветряными станциями, должно быть увеличено в 17 раз, чтобы сравняться с уровнем АЭС. Трудно представить как это может быть достигнуто к 2020 году. Кроме того, эти расчеты не учитывают ожидаемый ежегодный рост потребностей в электроэнергии на 1,7%. Также, для обеспечения поставок энергии, не зависящих от погоды, необходимы устройства для накопления энергии; не сегодняшней день таких устройств нет. Таким образом, в реальности замена АЭС возобновляемыми источниками энергии является спорной целью [12]. Следовательно, план ЕС по уменьшению выбросов CO₂ сильно зависит от доступности электроэнергии от АЭС.

Замена АЭС сжиганием угля не подойдет, поскольку это существенно увеличит мировые выбросы CO₂. Возобновляемые источники энергии не развиваются достаточно быстро, чтобы заменить АЭС в ближайшем будущем. Чтобы удовлетворить растущие потребности в электроэнергии и достичь цели ЕС по снижению выброса CO₂ и потенциально опасных изменений климата, выбор должен включать не атомные ИЛИ возобновляемые источники, а атомные И возобновляемые источники энергии.

2. Производство атомной энергии сегодня

Атомная энергия уже используется для широкомасштабной генерации электроэнергии, и сегодня базируется на делении урана-235 (U-235) и плутония-239 (Pu-239). Это соответствует около 5% все производимой в мире энергии, и обеспечивает 16% (2,67 ПВтч) мировой электроэнергии [19]. В год это позволяет избежать в среднем 2,6-3,5 миллиардов тонн выбросов CO₂. Использование новых технологических решений (см. далее) позволит АЭС остаться в

качестве основного источника энергии в долгосрочной перспективе, с одновременной возможностью уничтожения ядерных отходов и удовлетворения требованиям безопасности. На 31 мая 2007 в мире действовало 435 АЭС, 196 из них в Европе. Сегодня применяются различные виды реакторов: 264 реактора избыточного водяного давления, 94 – на кипящей воде, 43 – избыточного давления тяжелой воды, 18 газо-охлаждаемых реакторов; кроме того, 11 графитовых реакторов на легкой воде действуют в России и один в Литве; 4 реактора на быстрых нейтронах в Японии [19]. 37 новых реакторов вводится в строй, преимущественно в Восточно-Европейских и Азиатских странах, суммарной мощностью 32 ГВт.

В таблице 1 приведены действующие, строящиеся и планируемые реакторы, производящие электроэнергию.

Мощность реакторов с некоторыми модернизациями (преимущественно в Восточной Европе) и увеличенным временем жизни не изменится в ближайшем будущем. Некоторые страны (Бельгия, Германия, Голландия, Швеция) планируют постепенное снижение использования АЭС, в то время как в других (Австрия, Дания, Греция, Ирландия, Италия и Норвегия) использование АЭС запрещено законодательно. Ситуация на Дальнем Востоке, Южной Азии и Ближнем Востоке сильно отличается: здесь находится 90 действующих реакторов и предусматривается увеличение их числа, особенно в Китае, Индии, Японии, и в Южной Корее [19].

АЭС производят 16% мировой электроэнергии; являются основной статьей в европейском производстве электроэнергии и производят 31% европейского электричества. В Европе строится несколько новых ректоров, в то время как значительное увеличение числа и роли АЭС планируется в Юго-Восточной и Южной Азии.

	Электричество, создаваемое АЭС		Действующие реакторы, май 2007		Строящиеся реакторы, май 2007		Проектирующиеся реакторы, май 2007	
	ТВт ч	% электр.	Кол-во	МВт	Кол-во	МВт	Кол-во	МВт
Бельгия	44,3	54	7	5728	0	0	0	0
Болгария	18,1	44	2	1906	0	0	2	1900
Чехия	24,5	31	6	3472	0	0	0	0
Финляндия	22,0	28	4	2696	1	1600	0	0
Франция	428,7	78	59	63473	0	0	1	1630
Германия	158,7	32	17	20303	0	0	0	0
Венгрия	12,5	38	4	1773	0	0	0	0
Литва	8,0	69	1	1185	0	0	0	0
Нидерланды	3,3	3,5	1	485	0	0	0	0
Румыния	5,2	9,0	1	655	1	655	0	0
Россия	144,3	16	31	21743	3	2650	8	9600
Словакия	16,6	57	5	2064	0	0	2	840
Словения	5,3	40	1	696	0	0	0	0
Испания	57,4	20	8	7442	0	0	0	0
Швеция	65,1	48	10	8975	0	0	0	0
Швейцария	26,4	37	5	3220	0	0	0	0
Украина	84,8	48	15	13168	0	0	2	1900
Великобритания	69,2	18	19	10982	0	0	0	0
Европа	1194,4	35,4	196	169966	5	4905	15	15870

▲ Таблица 1. Европейские АЭС

3. Проблемы

Риски и безопасность

В повседневной жизни мы сталкиваемся с угрозами, с которыми ассоциируются определенные риски. В частности, и производство энергии несет потенциальную опасность. Поскольку человечество зависит от энергии, то необходимо уметь оценивать риски, присущие различным способам получения энергии. Ученые разработали инструменты для количественной оценки уровня рисков.

Например, Институтом Пола Шерера в Виллигене (Швейцария) был выполнен [20] ориентированный на оценку рисков сравнительный анализ, в котором основной акцент был сделан на изучении серьезных инцидентов, произошедших при производстве энергии в период 1969-2000 годов. Один из

результатов этого анализа показан на Рис. 6, где представлено количество смертей на производстве, приходящееся на гигаватт (электрических мощностей) в год (обращаем внимание на нелинейный масштаб по вертикальной оси).

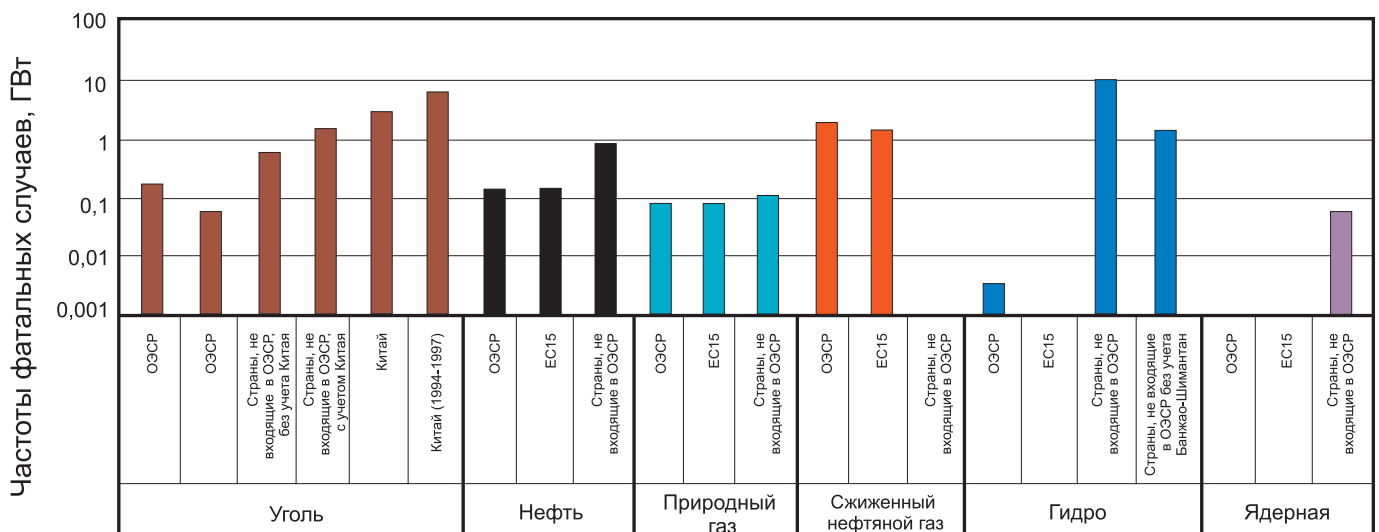
Из этих данных видно, что атомные электростанции являются наименее опасными объектами. Однако, в случае Чернобыльской катастрофы следует учитывать долговременные последствия. Они изучались в 2005 году группой ВОЗ (Всемирной Организации Здравоохранения) [21], которая включала в себя 8 специализированных агентств ООН, а также представителей правительств Республики Беларусь, Российской Федерации и Украины. В ее отчете перечислены 50 пострадавших из числа призванных ликвидаторов, которые скончались от острого радиационного

поражения и 9 детей, которые умерли от рака щитовидной железы. Вопрос о количестве смертей в будущем, причинно связанных с выбросом значительного количества радиоактивного материала в окружающую среду, достаточно сложен и также детально осуждается в данном отчете [21].

Несмотря на то, что можно изучить случившиеся в прошлом инциденты, оказывается трудным определить возможные последствия инцидентов, которые могут иметь место в будущем. Такой анализ рисков был выполнен Б.Л. Коэном (B.L. Cohen). Для количественной оценки риска он ввел величину, названную им «сокращением средней продолжительности жизни» [22]. Научный анализ показал, что риск при производстве электроэнергии на атомных электростанциях гораздо меньше других рисков нашей повседневной жизни [22]. Такое объективное определение относительных рисков необходимо соотносить с тем фактом, что часто имеется существенное расхождение между воспринимаемым риском события и реальным шансом такого события случиться. Малый риск серьезной катастрофы воспринимается иначе, чем значительный риск незначительной аварии, даже если полное число пострадавших за год может быть одинаковым в обоих случаях. Такая ситуация особенно характерна для общественного восприятия атомной энергии, когда вступает в игру радиоактивность.

Радиоактивность – явление спонтанного распада или трансформации ядер атомов, сопровождающееся испусканием альфа, бета или гамма излучения, называемого собирательно ионизирующим излучением, и являющееся одним из природных явлений, имевших место задолго до образования нашей планеты. Радиоактивные элементы, например, торий и уран, добываются в различных областях мира. Их естественное содержание в земной коре составляет около 7,2 миллиграмм тория на килограмм коры [23] и 2.4 миллиграмма урана на килограмм коры [24].

▼ Рис. 6. Сравнение агрегированных, нормированных, привязанных к энергопроизводству частот появления фатальных случаев, основанное на историческом анализе серьезных инцидентов, которые имели место в странах, входящих в ОЭСР, в странах, не относящихся к ОЭСР, и ЕС15 за период 1969–2000 годов, за исключением данных по Китаю, для которого ежегодные отчеты о состоянии угольной промышленности имеются только для 1994-1999 годов. В случае гидроэлектростанций значения даны с учетом и без учета крупнейшего инцидента, произошедшего в Китае и приведшего к гибели 26 000 человек. В этом случае не делалось никакого перераспределения последствий для стран, входящих и не входящих в ОЭСР. Отметим, что здесь рассматривались только прямые фатальные исходы (см. [20]).



Оба элемента распадаются, и в результате распада получаются радий и радон – благородный радиоактивный газ, который выходит из рудосодержащих залежей и является основным источником естественной радиоактивности вблизи таких залежей. Естественная радиоактивность найдена также во флоре и фауне. Например, радиоактивный углерод-14 (С-14) непрерывно генерируется при ядерных реакциях в земной атмосфере под действием интенсивного потока космического излучения. С-14 попадает в биосферу и пищевые цепочки всего живого. Кроме того, кости всех животных и людей содержат, например, элемент калий (К); его радиоактивный изотоп К-40 (естественное содержание 0.0117%) имеет время жизни, превышающее возраст земли. В целом, в теле среднего 25-летнего человека, имеющего вес около 70 килограмм, происходит около 9000 радиоактивных распадов в секунду [25].

Часто утверждается, что атомные электростанции вырабатывают радиоактивные материалы, которые являются потенциально опасными. Многие страны ввели законы, устанавливающие верхний предел как для испускания ионизирующего материала через выхлоп в воздух, так и для их попадания в окружающую среду в виде радиоактивных отходов или иных веществ (например, Федеральный Акт Регулирования Выбросов Германии [26]), и соответствие таким законам контролируется достаточно строго. Кроме того, работа атомных электростанций для промышленного производства электроэнергии и исследовательских реакторов является предметом строгих ограничений, соответствие которым отслеживается независимыми правительственными агентствами, которым может быть позволено прекращение работы электростанций в случае нарушения ограничений. Было установлено, что как выхлопы, так и выбросы радиоактивных материалов вблизи атомных электростанций близки к уровню пространственных флуктуаций фонового излучения [27]. Следует отметить, что электростанции на угле также испускают радиоактивные материалы, поскольку уголь содержит 0.05–3

миллиграмма урана на килограмм веса [28]. Сам по себе уран и продукты его радиационного распада нельзя полностью собрать с помощью фильтров, так что они попадают в окружающую среду [29].

Другим широко распространенным предубеждением является утверждение о том, что случаи лейкемии более часто имеют место вблизи атомных установок. Однако исследования показали, что «локализация случаев лейкемии появляется достаточно независимо от местонахождения ядерных установок» [30], см. также [31]. Количество случаев рака, являющихся результатом чернобыльского инцидента, было изучено ВОЗ [21]. Результаты таких исследований обсуждались выше. Безопасность атомных электростанций является важным моментом. Уникальный инцидент с чернобыльской атомной станцией ассоциируется с использованием особого типа графитовых реакторов на легкой воде (РБМК), которые до сих пор используются в России и Литве; такой инцидент невозможен для всех других ядерных реакторов вследствие иных использованных технологий. Дальнейшее совершенствование безопасности является одним из основных моментов при создании реакторов следующего поколения. Они проектируются таким образом, чтобы в них либо было физически невозможно плавление ядра реактора, либо в случае плавления последствия были локализованы удерживающей системой и не повлияли на окружающую среду. Также герметизирующая система реактора конструируется таким образом, чтобы она была способной противостоять падению на реактор самолета.

Отходы

Ежегодно по всему миру ядерными реакторами производится 10500 тонн отработанного топлива [32]. Отработанное топливо может быть либо переработано, либо изолировано от окружающей среды на сотни тысяч лет – во избежание вредного воздействия на биосферу. Все радиоактивные ядра, содержащиеся в отходах, с течением времени в результате распада превратятся в

стабильные ядра. Различные изотопы в радиоактивных отходах при поглощении или вдыхании оказывают вредоносное действие в зависимости от свойств, периода полураспада и времени удержания. Такая угроза может быть квалифицирована как радиотоксичность – мера вредоносного воздействия радиоактивных отходов. Примерами изотопов с высокой радиотоксичностью являются долгоживущие изотопы плутония и малые актиниды (МА), такие как нептуний, америций и кюрий. Вещества с меньшим периодом полураспада менее радиотоксичны, и их вредоносное воздействие быстро снижается с течением времени. Радиоактивные отходы являются результатом деятельности и утилизации не только атомных электростанций, но также и медицинской радиологии и научно-исследовательских лабораторий. Хранение этих отходов с низкой и средней активностью в специальных хранилищах не очень распространено и практикуется только в нескольких странах. Необходимо отметить, что все европейские страны, на территории которых находятся АЭС (см. таблицу 1), а также другие страны, использующие радиоактивные материалы или ионизирующее излучение, подписали «Объединенную конвенцию о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами», разработанную МАГАТЭ [33].

Однако переработка отработанного топлива в долгосрочной перспективе является важным вопросом. В кратковременной перспективе безопасная переработка отработанного топлива практикуется с первых дней использования атомной энергии. После отключения ядерного реактора, отработанное топливо временно хранится под водой для того, чтобы осуществился распад короткоживущих ядер. После этого отработанное топливо либо перерабатывается, в результате чего уран и плутоний извлекаются химическим путем и повторно используются в качестве топлива для реактора, либо консервируются (с использованием стеклования) для длительного хранения глубоко под землей в специально

предназначенных для этого хранилищах. В этом случае отработанное топливо должно храниться в течение 170000 лет для того, чтобы его радиотоксичность снизилась до радиотоксичности урана, из которого оно было получено. Удаление 99,9% урана и плутония снижает время хранения до 16000 лет. Дополнительное применение новейших технологий по переработке, которые позволяют удалить актиниды, могло бы сократить время хранения до 300 лет [34]. Извлеченные актиниды необходимо преобразовать в короткоживущие изотопы или использовать для определенных целей, которые будут обсуждаться далее.

Долгосрочное ограждение подземных хранилищ от воздействия воды является основной проблемой в этой области. Возможные места для размещения таких хранилищ были определены в некоторых странах и их долговременное геологически безопасное положение детально изучено (см. информацию о хранении отработанного топлива финского реактора в Ойкилуото (Olkiluoto) [35]). Такой способ хранения решает проблему отходов, по крайней мере, временно, но в некоторых случаях не устраняет проблему извлечения этих отходов для переработки в будущем [35], [36].

Распространение угрозы экстремизма

Использование радиоактивных материалов в не мирных целях является предметом серьезнейшей тревоги; см [37]. При обсуждении этой проблемы необходимо понимать различие между производством ядерных боеголовок ядерными державами, с одной стороны, и изготовлением экстремистами атомных бомб, с другой стороны. Ядерные боеголовки изготавливаются и высокообогащенного урана или из оружейного плутония; для производства последнего используются не обыкновенные АЭС, а специальные реакторы для производства плутония-239 (Pu-239) [38]. Низкообогащенный уран используется в качестве топлива для АЭС и не пригоден для военных целей. Плутоний, извлеченный из отработанного топлива, не обладает необходимым изотопным составом

для эффективного применения в военных целях. Поэтому необходимо подчеркнуть, что плутоний, который производит в результате своей работы АЭС, не пригоден для изготовления ядерных боеголовок. Возможность для данной страны изготавливать ядерные боеголовки зависит не от присутствия на ее территории АЭС, а от наличия возможностей для переработки и/или обогащения радиоактивных материалов.

Отдельный вопрос состоит в возможности использования экстремистами радиоактивных материалов. Дискуссию по поводу этого вопроса можно найти, например, в [39]. Радиоактивные материалы, химически извлеченные из отработанного топлива, могут, в принципе, использоваться экстремистами для производства ядерного устройства, которое имеет относительно низкую взрывную силу, эквивалентную приблизительно 2 килотоннам тринитротолуола [40], однако выбрасывает в атмосферу большое количество радиоактивных веществ (см. [41]). Также весьма вероятен сценарий, когда обыкновенная бомба используется для распыления радиоактивных веществ, содержащихся в отработанном топливе. Для предотвращения такого развития событий местонахождение радиоактивных материалов тщательно отслеживается международными агентствами, например МАТЭ, см. также [42]. Так как переработка ядерного топлива требует значительных промышленных мощностей, то этот процесс может быть организован максимально безопасно, препятствуя тем самым хищению материалов. В обозримом будущем некоторые генераторы IV поколения будут производить меньшее количество плутония по сравнению с современными реакторами (см. раздел 5) [43].

Другая опасность, которую нельзя игнорировать, заключается в возможности экстремистских группировок получить доступ к ядерному оружию путем проникновения в хранилища ядерного оружия. Очевидно, что в этом случае угроза экстремизма не имеет ничего общего с мирным использованием ядерных технологий.

Ядерная энергетика не является полностью безопасным источником энергии. Безопасность АЭС, процедуры утилизации отходов, возможность распространения угрозы экстремизма являются серьезными проблемами, которые необходимо учитывать. Насколько приемлемыми являются сопутствующие риски, можно определить, только объективно сравнив их с рисками, присущими альтернативным источникам энергии. Окончательный вывод может быть сделан на основании научных исследований и открытого обсуждения приводимых доводов и сравнения с опасностями альтернативных источников энергии.

4. Топливный цикл

Большинство современных реакторов используют принцип распада U-235 при бомбардировке тепловыми (медленными) нейтронами. Тот же процесс используется для Pu-239 и U-233, которые получают в результате тепловой реакции при захвате нейтрона U-238 и торием-232 (Th-232) соответственно. Наоборот, цепная ядерная реакция деления в ядерных реакторах на быстрых нейтронах поддерживается при помощи быстрых нейтронов. Другие тепловые реакторы - ядерный реактор на расплавленных солях (см. раздел 5) и типа CANDU (канадский тяжеловодный урановый ядерный реактор). Реактор типа CANDU охлаждается и замедляется при помощи тяжелой воды и может работать с использованием природного урана. Оба производят достаточное количество U-233 для продолжения работы, хотя радиоактивные продукты должны регулярно извлекаться. Ядерные реакторы на быстрых нейтронах могут производить даже больше топлива (плутоний), чем они могут использовать (бридерный реактор на быстрых нейтронах). В дополнение к этой классификации два различных типа реактора можно выделить в зависимости от вида топливного цикла: однократный цикл (в

основном используется в США) и замкнутый цикл (применяется, например, во Франции). Каждый из них будет рассмотрен отдельно, и оба имеют свои преимущества и недостатки. Однако сначала необходимо рассмотреть вопрос о запасе урановых руд.

Запасы урановой руды

Традиционные запасы урановой руды оцениваются в 14,8 миллионов тонн. Они включают в себя приблизительно 4,7 миллионов тонн разведанных ресурсов. К ним имеется простой доступ, и их добыча обходится менее, чем в \$130 за 1 кг урана [45,46]. В результате подробных исследований и разведки месторождений, а также геологических сведений, указывающих на территории, где, вероятно, находятся залежи руды, имеющиеся запасы оцениваются в 10 миллионов тонн. Эта величина, возможно, является заниженной, поскольку только 43 страны предоставили такие сведения.

Среди остальных источников — нетрадиционные источники урана (очень низкокачественный уран) и другие виды топлива, которое потенциально можно использовать в качестве ядерного (например, торий). В основном, нетрадиционные источники обычно ассоциируются с ураном в фосфатах (около 22 миллионов тонн), но существуют и другие потенциальные источники, к примеру, морская вода и черный сланец. Эти ресурсы, вероятно, будут исследованы, если стоимость урана возрастет. Торий имеется в избытке, его запасы составляют более 4,5 миллионов тонн [46], хотя в эту величину не входят данные из многих стран, в которых, возможно, имеются залежи тория.

4,7 миллионов тонн разведанных ресурсов следует сопоставить с мировой потребностью в уране, составлявшей 67 тысяч тонн в 2005 году [19]. Мировая потребность в уране для реакторов, по прогнозам, увеличится до 82–101 тысяч тонн в 2025 году. Потребность Северной Америки и западноевропейского региона, как ожидается, будет либо оставаться приблизительно постоянной, или будет

немного снижаться, в то время как спрос всего остального мира будет повышаться [44]. Из этих оценок следует, что урана из разведанных месторождений хватит для питания ядерных реакторов еще на 50 лет. Принимая во внимание традиционные (около 10 миллионов тонн) и нетрадиционные (около 22 миллионов тонн) ресурсы, которые, скорее всего, будут разрабатываться, если возникнет потребность, урановой руды хватит на несколько сотен лет, даже если уран будет использоваться в однократном цикле. Если же использовать замкнутый топливный цикл, запасов урана будет достаточно на несколько тысяч лет (см. далее).

Однократный или открытый цикл

После добычи, урановая руда преобразовывается в гексафторид урана UF_6 . UF_6 изотропно насыщается для увеличения концентрации делящихся ядер U-235 до 4,6%. Концентрация U-235 в естественном уране, 0,72%, слишком низка для большинства реакторов, кроме реакторов типа CANDU, который может работать с естественным ураном. Соединение фтора затем превращается в оксид обогащенного урана UO_2 , из которого изготавливаются топливные таблетки, которые составляют стержни. Эти стержни находятся в реакторе приблизительно до 4 лет, в течение которых в результате управляемой реакции ядерного распада выделяемая энергия преобразуется в электричество. Каждая стадия производства представляет собой заверченный технологический процесс.

Поскольку использованные топливные стержни не перерабатываются, все актиниды, присутствующие в малых количествах, в особенности, плутоний, остаются в топливных стержнях в форме, которая не позволяет использовать их для производства эффективного оружия. Это неотъемлемая защита против распространения ядерного оружия является основным преимуществом однократного цикла. Другие преимущества такого режима работы можно найти в [47].

Основным недостатком такого процесса является образование радиоактивных отходов, которые необходимо хранить сотни тысяч лет для того, чтобы снизить их уровень радиотоксичности до уровня естественной руды. В таком цикле уран и распадающийся плутоний идут в отходы. К примеру, в работающих в настоящее время реакторах на легкой воде изначальная доля U-235 составляет 3,3%, а в отработанном топливе — 0,86% [48]; относительное содержание U-235 в естественном уране составляет всего 0,72%.

Замкнутый цикл

Процессы в реакторе замкнутого цикла, в основном, протекают так же, как и в однократном цикле. Основным отличием является химическая обработка отработанного топлива (процесс восстановления урана и плутония путем экстракции) в результате которого плутоний и уран восстанавливаются для последующего использования в качестве смешанного оксидного ядерного топлива. Экстракция урана и плутония из отработанного ядерного топлива планомерно выполняется в г. Аг (Франция), г. Селлафилд (Великобритания), г. Роккасьо (Япония) и г. Маяк (Россия). Малые актиниды не извлекаются и являются основной составляющей радиоактивных отходов, которые необходимо безопасно сохранять (см. ранее: Отходы) или сжигать/преобразовывать (см. далее: Дальнейшие перспективы переработки отработанного топлива). Безусловно, разделение является крупномасштабной процедурой, и риски, связанные с ней, были описаны выше (см. Распространение ядерного оружия и угроза экстремизма). На работающих в настоящее время предприятиях разделенные изотопы находятся под пристальным наблюдением международных органов для отслеживания их местонахождения.

Преимуществом закрытого топливного цикла является намного меньшая потребность в урановой руде. Переработанный материал может использоваться в реакторе-размножителе на быстрых нейтронах, который

на два порядка более эффективен. На известных в настоящее время запасах урановой руды ядерные реакторы деления могут работать в течение 5 000 лет, а не всего несколько сотен лет, как с реакторами однократного цикла. Меньшая потребность в урановой руде приведет к уменьшению влияния добычи на окружающую среду, и погасит геополитические и экономические конфликты из-за поставок урановой руды. Другой возможный закрытый цикл основан на тории [50], залежи которого в 3–4 обширней, чем урана.

Дальнейшие перспективы переработки отработанного топлива

Альтернативой длительному хранению отработанного топлива является его сжигание в специализированных реакторах ([43], см. далее) или превращение долгоживущих изотопов в имеющие малый период полураспада в ускорительно-бланкетных системах (ADS). Для обоих процессов требуется эффективное разделение не только урана и плутония, но и МА. Эффективность разделения составляет 99,9%; а для сжигания/преобразования, как ожидается, она будет составлять около 20%. Поэтому для значительного снижения количества долгоживущих радиоактивных изотопов требуется проведение нескольких циклов разделения и сжигания/преобразования [34]. После этого, по истечении немногим более 300 лет, срока, в течение которого легко обеспечить безопасное хранение, радиотоксичность отработанного топлива будет меньше, чем радиотоксичность урана, из которого топливо изначально было получено. В течение последних десятилетий были изучены многообещающие схемы преобразования, основанные на ADS [51]. Эта новая концепция рассматривается и в Европе, и в Азии.

▼ Таблица 2. Реакторы IV поколения и некоторые их свойства, согласно [43].

GFR	Газоохлаждаемый реактор на быстрых нейтронах	Эффективное регулирование актинидов; замкнутый топливный цикл. Поставляет электричество, водород или тепло.
LFR	Реактор на быстрых нейтронах с охлаждением свинцом	Небольшая установка заводского изготовления; замкнутый цикл с очень большим интервалом между дозаправками (15–20 лет). Передвижной, для рассредоточенного производства энергии, питьевой воды, водорода. Также рассматриваются проекты больших LFR.
MSR	Реактор на расплавленных солях	Изготавливается специально для эффективного сжигания плутония и актинидов; жидкое топливо исключает необходимость изготовления; по строению безопасный. Имеет самый высокий рейтинг устойчивого развития; наиболее подходит для ториевого цикла.
SFR	Реактор на быстрых нейтронах с натриевым охлаждением	Эффективное регулирование актинидов; преобразование топливного U, замкнутый цикл.
SCWR	Сверхкритический водоохлаждаемый реактор	Эффективное производство электроэнергии; возможность регулирования актинидов; самый простой однократный урановый топливный цикл; также возможна реализация замкнутого цикла.
VHTR	Реактор сверхвысокой температуры	Однократный урановый топливный цикл; производство электричества и тепла для нефтехимической промышленности, термохимическое производство водорода.

Основной идеей является использование гибридного реактора, в котором сочетается ядерный реактор деления и сильноточный ускоритель протонов. Последние используются для производства очень интенсивного потока нейтронов, которые индуцируют ядерный распад в мишени из урана, плутония или младших актинидов. Нейтроны требуются для запуска и поддержания процесса распада, а самоподдерживающаяся цепная реакция не используется. В принципе, в такой гибридной системе радиоактивные отходы могут быть преобразованы в продукты распада с малым периодом полураспада с одновременным производством энергии.

В 6 рамочной программе Европейской комиссии стартовал проект, в котором будут разработаны первые экспериментальные установки для демонстрации осуществимости преобразования с помощью ADS. Разработка концепции проводится параллельно с промышленной реализацией блоков [52]. Это исследование также должно включать изучение надежности и экономической конкурентоспособности. Такие гибридные системы, помимо возможности сжигания отходов, возможно, внесут вклад в широкомасштабное производство энергии после 2020 года. ADS представляют собой сильную конкуренцию реакторам IV поколения, которые также разработаны для эффективного сжигания младших актинидов (о

генераторах IV поколения см. следующую главу).

В ядерных реакторах и открытого и закрытого цикла энергия производится за счет вызываемого нейтронами распада тяжелых ядер, используемых в качестве топлива, но отходы в них преобразуются различным образом. Системы с открытым циклом являются привлекательными с точки зрения безопасности. В системах с закрытым топливным циклом из отходов извлекается пригодное для использования топливо и, поэтому, достигается значительно меньшая потребность в урановой руде.

5 Будущее ядерной энергетики

Передовые ядерные реакторы

Сценарии развития энергетики на следующие 50 лет показывают жизненную важность сохранения возможности использования ядерных источников для генерации электричества. Однако технологии современных реакторов и связанные с ними топливные циклы, основанные на уране-235, приводят к производству большого числа потенциально опасных отходов. Кроме того, для некоторых типов реакторов риск катастрофического сбоя неприемлемо высок. В свете этих проблем безопасности и ассоциирования ядерной энергии с Чернобыльской катастрофой и ядерным оружием, ядерная энергетика встречает сильную оппозицию в некоторых европейских странах.

В качестве ответа были разработаны реакторы III поколения, такие как Европейский герметический реактор (European Pressurised Reactor, EPR) строящийся в настоящее время в Ойкилуото, Финляндия и представляющий собой шаг вперед в технологии безопасности [35]. Этот реактор будет обладать передовой системой предотвращения сбоев, приводящей к дальнейшему уменьшению вероятности

повреждения активной зоны реактора. Улучшенный аварийный контроль гарантирует, что даже в чрезвычайно маловероятном случае аварии в активной зоне реактора, весь радиоактивный материал останется в пределах системы локализации аварии и что последствия подобной аварии будут ограничены пределами самой электростанции. Этот реактор также будет обладать улучшенной устойчивостью к прямому падению самолета, включая большие коммерческие сверхзвуковые лайнеры.

В 2001 году более 100 экспертов из Аргентины, Бразилии, Канады, Франции, Японии, Кореи, Южной Африки, Швейцарии, Великобритании, США, МАГАТЭ и Агентства по ядерной энергии ОЭСР начали совместную работу по определению задач для систем нового поколения, выделяя наиболее перспективные концепции, оценивая их и выделяя необходимые направления научно-технических исследований. К концу 2002 года было выработано описание шести систем и связанных с ними необходимых направлений научно-технических исследований [43]. При разработке реакторов IV поколения делается сильный акцент на безопасности. Ключевым требованием является исключение аварии подобной Чернобыльской. Кроме того, эти реакторы будут иметь улучшенные экономические показатели производства электричества, уменьшенное количество ядерных отходов, требующих утилизации, большую защиту от несанкционированного распространения, а также иметь некоторые новые свойства, такие как производство водорода для применения на транспорте (см. таблицу 2). Также имеется возможность использования ториево-уранового цикла. В недавней статье [53] обсуждались его преимущества, например, невозможность по законам физики образования как продукта деления плутония и/или младших актинидов, что уменьшает радиотоксичность отходов примерно в 1000 раз по сравнению с однократным урановым циклом.

Хотя до сих пор остается необходимость в научных исследованиях, для некоторых из этих систем введение в действие ожидается к 2030

году. В наиболее передовых топливных циклах, скомбинированных с переработкой, большая часть долгоживущих продуктов деления в свою очередь подвергаются распаду, так что требование изоляции отходов снижается с сотен тысяч до нескольких сот лет.

Еще рано выносить окончательное суждения об относительных достоинствах реакторов ADS и реакторов IV поколения для производства энергии и сжигания/преобразования отходов, но наиболее общие преимущества каждого из них очевидны. Сравнительное изучение может быть найдено в [54].

Термоядерные реакторы

Еще одной возможностью для генерации ядерной энергии без производства углекислого газа в топливном цикле является процесс термоядерного синтеза. Важный шаг в направлении его реализации был предпринят в 2005 году после принятия решения о постройке Международного экспериментального термоядерного реактора [55] в Карадаш, Франция. В этом реакторе дейтерий и тритий сливаются, образуя гелий-4 и нейтрон, несущий 80% высвобождаемой энергии. Гелий-4 представляет собой «нерадиоактивный пепел» термоядерного процесса. Будучи приведенным в действие, такой реактор порождает тритий, необходимый в качестве топлива, из лития. Дейтерий является тяжелым изотопом водорода и доступен из природных источников в практически неограниченных количествах. Мировые ресурсы лития оцениваются в 12 миллионов тонн [56], чего достаточно для рассмотрения термоядерного синтеза как источника энергии на протяжении значительного отрезка времени. В конструкции термоядерной электростанции будут использоваться материалы, для которых, после неизбежного облучения нейтронами, радиоактивность затухает сравнительно быстро до безопасного уровня в течение сотен лет. Впоследствии с материалом можно безопасно работать в заводских условиях. Опыт работы с радиоактивным тритием подтверждает положение о высокой степени безопасности термоядерного синтеза как

источника энергии. Однако термоядерный синтез может стать существенным поставщиком энергии не ранее второй половины текущего столетия, поскольку технология термоядерных реакторов требует тщательной дальнейшей разработки.

Новые концепции реакторов (GenIV) будут соответствовать строгим критериям устойчивости и надежности, как в отношении производства энергии, так и в отношении безопасности и нераспространения. Деление и синтез ядра обладают потенциалом для значительного вклада в удовлетворение будущих потребностей в электричестве.

6. Заключение

В процессе нашего анализа мы пришли к следующим выводам:

- Никакой отдельно взятый источник энергии не будет способен удовлетворить нужды будущих поколений.
- Ядерная энергия может и должна внести важный вклад в совокупность источников электрической энергии.
- В современных ядерных реакторах, основанных на проверенных технологиях, в которых используются передовые методики предотвращения аварий, включая пассивные системы безопасности, аварии, схожие с чернобыльской, со всеми их последствиями, практически невозможны.
- Должно быть инициировано или продолжено выполнение программ всесторонних и долгосрочных исследований, конструкторских работ и демонстрационных программ, включая все возможные стабильные источники электроэнергии. НИР для конкретных источников должны быть направлены в сторону реализации и анализа действующей демонстрационной системы, к примеру, основанной на реакторе IV поколения.

- Должно быть рассмотрено преобразование отходов с помощью перспективных реакторов с ускорителем или реакторов IV поколения; аналогично, следующими необходимыми шагами являются опытно-конструкторская разработка и демонстрационные предприятия.
- Также должна быть изучена возможность увеличения срока службы существующих реакторов.
- Слова «ядерная энергия» должны подразумевать получение энергии как в процессе деления, так и в результате ядерного синтеза.
- Принимая во внимание большой срок между демонстрацией и реализацией любой предлагаемой схемы, о потенциале ядерной энергии после 2020 года можно судить только по интенсивным и расширенным программам научно-исследовательских разработок. Для того чтобы в таких программах была изучена безопасность и экономические аспекты получения электроэнергии в долгосрочном периоде, требуются согласованные усилия ученых и политиков.
- Должно быть реализовано предложение Европейской комиссии о создании общей европейской энергетической политики, представленное в мае 2006 года. Целью данной политики является помощь в преодолении Европой трудностей, связанных с будущими проблемами с энергоресурсами и с тем влиянием, которое они окажут на экономический рост и окружающую среду [57], и строится она в соответствии с «Зеленым документом» по энергетической стратегии ЕС в области безопасности энергоресурсов [58].
- Для научно-исследовательских программ, касающихся ядерной энергии, также требуется поддержка фундаментальных исследований в ядерной физике и материаловедении соответствующих веществ, поскольку только таким образом могут быть получены знания, необходимые для нахождения новейших технологических решений.
- Европе необходимо поддерживать достойный уровень конструкторских работ для проектов реакторов независимо от решения о построении их на территории Европы. Это является важным аргументом для инвестирования в научно-исследовательские работы по ядерным реакторам и представляет собой ключевой фактор, если Европа будет способна следовать за программами в быстро развивающихся странах, например, в Китае или Индии, которые направлены на построение ядерных электростанций, и помогать в обеспечении их безопасности посредством, к примеру, активного участия в деятельности МАГАТЭ.
- Научно-исследовательские работы необходимо проводить во всемирном масштабе. Проблемы, связанные с устойчивым и крупномасштабным получением ядерной энергии, такие как преобразование отходов, безопасность, нераспространение ядерного оружия и принятие общественностью, по масштабам выходят далеко за национальные границы.
- При вынесении решений высшими должностными лицами должна учитываться насущная необходимость разрешения проблемы парникового эффекта путем четкой определенной энергетической стратегии, стимулируя и финансируя научно-исследовательские работы, включая ядерную энергию. Европейская комиссия уже приняла во внимание данную фундаментальную идею [59].
- Для того чтобы получить поддержку общественности, требуется внушающая доверие и беспристрастная информационная программа по всем вопросам производства ядерной энергии, поддерживаемая программой осведомления общественности, которая поможет широкой публике лучше понять и судить о технологических рисках и оценить другие риски в промышленно развитой экономике. Необходимо прикладывать огромные усилия для

информирования широкой публики о кратковременных и долгосрочных аспектах безопасности и о влиянии на экологию различных технологий, используемых в сильно развитых промышленных регионах Европы. Если ядерной энергии предстоит внести вклад в будущее энергетики Европы и помочь избежать серьезного влияния других источников энергии, важным является получение общественного признания. В противном случае, передовые разработки могут быть заторможены или даже остановлены общественным мнением.

Никакой отдельно взятый источник энергии не будет способен удовлетворить нужды будущих поколений. Ядерная энергия, включающая в себя последние достижения в области технологий и безопасности, должна стать одним из основных источников энергии в будущем. Существует явная потребность в долгосрочных исследованиях, конструкторских работах и демонстрационных программах, равно как и в фундаментальных исследованиях как ядерного деления и синтеза, так и сжигания, преобразования и хранения отходов. Необходимо найти способы информирования широкой публики о том, как можно рационально оценить относительные риски. Каждый участник процесса принятия решений должен быть хорошо проинформирован о проблемах, связанных с энергетикой. Важной целью европейских научных исследований является обеспечение этого процесса.

Литература

(Интернет-ссылки действовали на ноябрь 2007)

[1] World Commission on Environment and Development, Our Common Future (New York: Oxford University Press, 1987).

[2] Statistical Office of the European Communities <http://epp.eurostat.ec.europa.eu>. См. также: Europe in figures, eurostat yearbook 2006-07, ISBN 92-79-02489-2, электронная версия: http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_OFFPUB/KS-CD-06-001-ENERGY/EN/KS-CD-06-001-ENERGY-EN.PDF

[3] Helmut Geipel, Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit, Berlin, Germany, at Greenpeace Workshop on "Klimaschutz durch CO₂-Speicherung Möglichkeiten und Risiken" (in German), www.greenpeace.de/fileadmin/gpd/user_upload/the_men/energie/Geipel_BMWA_CCS_50926.pdf

[4] Externalities of Energy. A Research Project of the European Commission, www.externe.info

[5] Uranium Information Centre Ltd., GPO Box 1649N, Melbourne, Australia, www.uic.com.au/nip100.htm

[6] Öko-Institut e.V. (Institute for Applied Ecology) Postfach 50 02 40, 79028 Freiburg, Germany, www.oeko.de/service/gemis/en/index.htm

[7] World Information Service on Energy (WISE), P.O. Box 59636, 1040 LC Amsterdam, The Netherlands www.nirs.org/mononline/nukesclimatechangereport.pdf

[8] см также: Parliamentary Office of Science and Technology (October 2006, No. 268): Carbon Footprint of Electricity Generation, www.parliament.uk/documents/upload/postpn268.pdf

[9] http://auto.ihs.com/news/2006/eu-en-auto-emissions.htm#wbc_purpose=Ba

[10] International Panel on Climate Change, IPCC-report 2007, Working group I, www.ipcc.ch/SPM2feb07.pdf

[11] Gesellschaft für ökologische Forschung e.V., Frohschammerstr. 14, 80807 München, www.gletscherarchiv.de/202006past1.htm, (in German)

[12] International Panel on Climate Change, IPCC-report 2007, WG III www.ipcc.ch/SPM040507.pdf

[13] Kyoto-Protocol, <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.html>

[14] Energy to 2050: Scenarios for a Sustainable Future (2003), International Energy Agency (IEA/OECD) Paris, France, www.iea.org/textbase/nppdf/free/2000/2050_2003.pdf

[15] The Role of Nuclear Power in Europe, World Energy Council, 2007, www.cna.ca/english/Studies/WEC_Nuclear_Full_Report.pdf

[16] World Energy Outlook, International Energy Agency, 9 rue de la Fédération, 75015 Paris, France, www.iea.org/textbase/nppdf/free/2004/weo2004.pdf

[17] Institute of Physics Report: The Role of Physics in Renewable Energy, RD&D, 2005

[18] http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/site/en/com/2007/com2007_0002en01.pdf

[19] World Nuclear Association, 22a St James's Square, London SW1Y 4JH, United Kingdom, www.world-nuclear.org

[20] Paul Scherrer Institut (PSI), 5332 Villigen, Schweiz, Technology Assessment/ GaBE, <http://gabe.web.psi.ch/research/ra/>

[21] World Health Organisation, Avenue Appia 20, CH-1211 Geneva 27, Switzerland, www.who.int/mediacentre/news/releases/2005/pr38/en/index.html

[22] Bernard L. Cohen: Before it's too late; Springer 1983, ISBN-13: 978-0306414251, and www.ecolo.org/documents/documents_in_english/Bernard.Cohen.rankRisks.htm

[23] Mineral Information Institute, 505 Violet Street, Golden CO 80401, USA, www.mii.org/Minerals/photothorium.html

[24] Deutsche Zentrale für Biologische Information, www.biologie.de/biowiki/Uran (in German)

[25] Martin Volkmer, Radioaktivität und Strahlenschutz (in German), Courier Druckhaus, Ingolstadt, 2003, ISBN 3-926956-45-3, new edition (in German), www.ktg.org/r2/documentpool/de/Gut_zu_wissen/Materialien/Downloads/013radioaktivitaet_strahlenschutz2005.pdf

[26] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Alexanderstraße 3, 10178 Berlin, Germany, www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/anhang_a.pdf (in German)

[27] Niedersächsisches Umweltministerium; Archivstraße 2, 30169 Hannover, Germany,

www.umwelt.niedersachsen.de/master/C24150382_N23066970_L20_DO_I598.html

[28] Zur Geochemie und Lagerstättenkunde des Urans, (in German) Gebrüder Borntraeger, Berlin Nikolassse, 1962, ISBN 3-443-12001-6

[29] Strahlenschutzkommission, Geschäftsstelle beim Bundesamt für Strahlenschutz, Postfach 12 06 29, 53048 Bonn, Germany, www.ssk.de/werke/volltext/1981/ssk8102.pdf (in German)

[30] Deutsches Krebsforschungszentrum, Im Neuenheimer Feld 280, 69120 Heidelberg, Germany, http://web.archive.org/web/20050430173258/http://www.dkfz.de/epi/Home_d/Programm/AG/Praevent/Krebshom/texte/englisch/204.htm

[31] R.Neth: Radioaktivität und Leukämie, Deutsches Ärzteblatt 95, Ausgabe 27, 03.07.1998, S.A-1740 / B-1494 / C-1386 (in German), www.aerzteblatt.de/v4/archiv/artikeldruck.asp?id=12227

[32] www.iaea.org/About/Policy/GC/GC51/GC51InfDocuments/English/gc51inf-3_en.pdf

[33] www-ns.iaea.org/conventions/waste-jointconvention.htm

[34] A.Geist et al.: Reduzierung der Radiotoxizität abgebrannter Kernbrennstoffe durch Abtrennung und Transmutation von Actiniden: Partitioning, NACHRICHTEN-Forschungszentrum Karlsruhe Jahrgang 36(2004) p. 97-102, <http://bibliothek.fzk.de/zb/veroeff/58263.pdf>

[35] Posiva Oy, 27160 Olkiluota, Finland, www.posiva.fi

[36] The Long Term Storage of Radioactive Waste: Safety and Sustainability; A Position Paper of International Experts, IAEA 2003, www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/LTS-RW_web.pdf

[37] Gerald E.Marsh and George S. Stanford: Bombs, Reprocessing, and Reactor Grade Plutonium; Forum on Physics and Society of the American Physical Society, April 2006, Vol. 35, No. 2 <http://units.aps.org/units/fps/newsletters/2006/april/article2.cfm>

[38] Management and Disposition of Excess Weapons Plutonium, National Academy of Sciences (U.S.), Panel on Reactor-Related Options, 1995, www.ccnr.org/reactor_plute.html

[39] NuclearFiles.org, A Project of the Nuclear Age Peace Foundation, 1187 Coast Village Road, Santa Barbara CA 93108-2794, USA, www.nuclearfiles.org/menu/keyissues/nuclear-weapons/issues/terrorism/introduction.htm

[40] J.CarsonMark, Science & Global Security, 1993, Vol. 4, pp 111-128 www.fissilematerials.org/ipfm/site_down/sgs04mark.pdf

[41] Making the Nation Safer - The Role of Science and Technology in Countering Terrorism. In: The National Academy Press (Washington DC, USA) 2002; http://books.nap.edu/catalog.php?record_id=10415

[42] nuclearfiles.org, A Project of the Nuclear Age Peace Foundation 1187 Coast Village Road, Santa Barbara CA 93108-2794, USA, www.nuclearfiles.org/menu/key-issues/nuclearweapons/issues/proliferation/fuel-cycle/index.htm

[43] A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy System, issued by the U.S.DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum, December 2002, www.gen-4.org/Technology/roadmap.htm

[44] Resources, Production and Demand, A Joint Report by the OECD Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency ("Red Book", 21st edition) www.nea.fr/html/ndd/reports/2006/uranium2005-english.pdf

[45] International Atomic Energy Agency, P.O. Box 100, Wagramer Strasse 5 A-1400 Vienna, Austria, www.iaea.org/NewsCenter/Statements/DDGs/2006/sokolov01062006.html

[46] The 2005 IAEA-NEA "Red Book", quoted in www.worldnuclear.org/info/inf62.html

[47] Frank N. von Hippel: Plutonium and Reprocessing of Spent Nuclear Fuel; Science, 293 (2001) 2397-2398, www.princeton.edu/~globsec/publications/pdf/Scienc293n5539.pdf

[48] Martin Volkmer, Kernenergie Basiswissen (in German), Courier Druckhaus, Ingolstadt, 2003, ISBN 3-926956-44-5, new edition, <http://lbs.hh.schule.de/klima/energie/kernenergie/basiswissen2004.pdf>

[49] AREVA Head Office, 27 – 29 rue Le Peltier, 75433 Paris cedex, France, www.avevaresources.com/nuclear_energy/datagb/cycle/indexREP.htm

[50] Shaping the Third Stage of Indian Nuclear Power Programme, Government of India, Department of Energy, www.dae.gov.in/publ/3rdstage.pdf

[51] [http://cdsagenda5.ictp.trieste.it/askArchive.php?base=agenda&categ=a04210&id=a04210s122t8/lecture notes](http://cdsagenda5.ictp.trieste.it/askArchive.php?base=agenda&categ=a04210&id=a04210s122t8/lecture_notes)

[52] <http://nuklear-server.ka.fzk.de/eurotrans/>

[53] S. David et al. in Europhysicsnews 2007, Vol. 38, no.2, p. 24

[54] OECD Nuclear Energy Agency, Le Seine Saint-Germain12, boulevard des îles, F-92130 Issy-les-Moulineaux, France, www.nea.fr/html/ndd/reports/2002/nea3109.html

[55] www.iter.org

[56] Mineral Information Institute, 505 Violet Steet, Golden CO 80401, USA, www.mii.org/Minerals/photolith.html

[57] SCADPlus: Green Paper: A European strategy for sustainable, competitive and secure energy <http://europa.eu/scadplus/leg/en/lvb/l27062.htm>

[58] [http://ec.europa.eu/energy/green-paper-energy-supply/doc/green paper energy supply en.pdf](http://ec.europa.eu/energy/green-paper-energy-supply/doc/green_paper_energy_supply_en.pdf)

[59] http://ec.europa.eu/energy/nuclear/doc/brusselsfde_may2002.pdf

ЭНЕРГИЯ ДЛЯ БУДУЩЕГО

Ядерная альтернатива

Декларация ЕФО

перевод с английского:

А.А.Букач, А.А.Игнатенко, А.С.Малоштан, А.П.Низовцев,
Д.И.Пустоход, Д.Б.Хорошко, В.Н.Шатохин

под редакцией С.Я.Килина, Д.Б.Хорошко, В.Н.Шатохина, А.А.Букача

Подписано к печати 30 октября 2008 г. Формат 60x90 1/16

Тип бумаги – офисная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,7

Уч. изд. л. 1,2. Тираж 250 экз. Заказ №28. Бесплатно.

Институт физики им. Б.И.Степанова НАНБ

220072 Минск, ГСП, пр. Независимости, 68.

Отпечатано на ризографе Института физики НАНБ.

Лицензия ЛП №20 от 27 мая 2003 г.

European Physical Society

6,rue des Frères Lumière

68060 Mulhouse Cedex • France

tel: +33 389 32 94 42

fax: +33 389 32 94 49

website: www.eps.org

Европейское физическое общество

ул. братьев Люмьер, 6

68060 Мюлуз • Франция

тел: +33 389 32 94 42

факс: +33 389 32 94 49

веб-сайт: www.eps.org