

ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА, АТОМНАЯ ЭНЕРГИЯ И ЯДЕРНОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ: ВЕЛИЧИНА ИМЕЕТ ЗНАЧЕНИЕ

Роберт Дж. Голдстон

Интегрированное моделирование энергетики, окружающей среды и экономики позволяет предположить, что в 2100 году общемировое потребление электроэнергии увеличится до примерно 12 ТВт (эл.). Из-за ограничений других источников энергии с низким содержанием углерода может потребоваться, чтобы в 2100 году во всем мире атомная энергия предоставляла около 30% электроэнергии. Расчеты связанных запасов и потоков урана, плутония и других актинидов показывают, что риски распространения при использовании современной технологии легководных реакторов, станут обескураживающими. Существуют институциональные мероприятия, которые могут оказаться способными предоставить приемлемый уровень уменьшения риска, но их будет трудно осуществить. Если в середине столетия начнется переход к реакторам на быстрых нейтронах, то к 2100 году глобальные риски ядерного распространения станут намного большими, и более устойчивыми к устранению риска. Термоядерная энергетика, если она успешно продемонстрирует свою экономическую конкурентоспособность, может предоставить источник атомной энергии с намного меньшим риском плутониевых "мин" и плутониевых "рек", который мотивировал данный анализ. Эта работа была поддержана контрактом # DE-AC02-09CH11 Министерства энергетики США.

Роберт Дж. Голдстон работает в Принстонской лаборатории физики плазмы, Принстонский университет, Принстон, штат Нью-Джерси, США.

Статья получена редакцией 22 февраля 2011 года и принята к опубликованию 1 апреля 2011 года.

Автор желает поблагодарить Ларри Гришама и Грега Хэммета за их вклад в обсуждение секвестрации углерода и нерегулярных возобновляемых источников энергии, Валентину Босетти за помощь в доступе к базе данных EMF 22, Александра Глэзера за помощь в понимании топливного цикла легководных реакторов и полезные комментарии, и Стивена Пайета за помощь в поиске ключевых ссылок по параметрам реакторов на быстрых нейтронах и очень полезные обсуждения. Он хотел бы поблагодарить М.В. Рамана за полезные обсуждения и Фрэнка фон Хиппеля за то, что он поднял вопрос плутониевых "мин" и плутониевых "рек", который мотивировал данный анализ. Эта работа была поддержана контрактом # DE-AC02-09CH11 Министерства энергетики США.

Почтовый адрес для корреспонденции: Robert J. Goldston, Princeton University, Plasma Physics Laboratory, MS 41, P.O. Box 451, Princeton, NJ 08543.

Электронный адрес: rjg@princeton.edu

ВВЕДЕНИЕ

Атомная энергетика обладает потенциалом производства очень большого количества электроэнергии с минимальным выбросом двуокси углерода в атмосферу. Она также обладает потенциалом способствовать распространению ядерного оружия. Ущерб, нанесенный человечеству и мировой окружающей среде как от изменения климата, так и от ядерной войны, может стать очень большим. Как то, так и другое может оказать разрушительное воздействие на наследие, переходящее к следующим поколениям. В этой статье недавние результаты моделирования энергетики, окружающей среды и экономики на период до 2100 года используются для оценки масштабов значительной роли атомной энергии в уменьшении изменения климата, а расчеты запасов и потоков расщепляющихся материалов, базирующиеся на последних технологических исследованиях, используются для оценки ключевых характеристик такого предприятия. Коллечественная зависящая от времени перспектива предоставляется для рисков ядерного распространения, которые могут возникнуть, для сравнения с рисками изменения климата, которые могут быть уменьшены атомной энергией. Эта статья дополняет предыдущие работы в этой области, опубликованные Уильямсом и Фейвесоном¹, Фейвесоном², Шнейдером и Сэйлором³, Фейвесоном и др.⁴, Соколу и Глэзером⁵, и Фейвесоном⁶.

ИНТЕГРИРОВАННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИКИ, ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И ЭКОНОМИКИ

Атомная энергия рассматривается прежде всего как источник электроэнергии, хотя в некоторых конструкциях может быть произведено тепло для высокотемпературных процессов, которое может содействовать производству водорода или биотоплива. Здесь основное внимание направлено на рынок электроэнергии. Основной вклад атомной энергии в транспортный сектор может быть в любом случае осуществлен через подключаемые гибридные или электрические транспортные средства.

Прогноз будущего использования электроэнергии, хотя он и подвержен большим неопределенностям, при этом любым долгосрочным предсказаниям, является относительно устойчивым в отношении изменений в прогнозируемом требовании для ограничения выбросов CO₂. Согласно исследованию электрификации Эдмондсом и др.⁷, если выбросы CO₂ ограничиваются более строго, то

общее использование энергии подавляется. Однако, в то же самое время отношение производства электроэнергии к общему потреблению энергии в 2100 году увеличивается с 32 процентов до 60 процентов. Эти эффекты очень точно уравнивают друг друга, предоставляя стабильный прогноз для будущего производства электроэнергии.

Целесообразно перейти от результатов Эдмондса 2006 года к более новому анализу и к более широкому диапазону моделей, объединяющих энергетику, окружающую среду и экономику. Источником такой информации является база данных исследования Форума моделирования энергетики 22 (EMF 22)⁸. Опубликованная в конце 2009 года, она включает результаты моделирования многих различных групп во всем мире, учитывающего многие источники энергии и возможности для повышения эффективности конечного использования. В исследовании изучался широкий диапазон вариантов: ограничения на CO₂ изменялись от варианта отсутствия изменений (без ограничений) для концентрации в атмосфере вплоть до такой низкой, как эквивалент 450 частей на миллион; временное превышение концентрации CO₂ над конечной целью разрешалось или запрещалось; и раннее участие в ограничениях на выбросы предполагалось только для развитых стран, или предполагалось полное раннее участие. Прогноз общемирового потребления электроэнергии для широкого диапазона моделей с таким широким диапазоном ограничений был на удивление стабильным. Вариации между моделями были больше, чем вариации в зависимости от CO₂ и других ограничений, и направление вариаций производства электроэнергии в зависимости от строгости ограничений на CO₂ было не согласующимся. Медианный прогноз производства электроэнергии по базе данных EMF 22 показан на рис. 1. 20-ая и 80-ая перцентили относятся к диапазону результатов всех моделей при всех ограничениях⁹. Для перспективы можно отметить, что средний логарифмический рост для медианного случая от 2010 до 2100 года несколько меньше, чем исторически наблюдавшийся рост от 1986 до 2006 года.

В то время как рис. 1 предоставляет базис, хотя и неопределенный, для рассмотрения будущих потребностей в электроэнергии, он не дает основания для оценки того, как много потребуется атомной энергии. Полностью рассчитанные комбинации источников электроэнергии для различных прогнозов моделей не были представлены в базе данных исследований EMF 22, и опубликованные

описания результатов моделей EMF 22 указывают на значительные вариации в комбинациях¹⁰⁻¹⁷. Существует, однако, очевидная тенденция к большей доле атомной энергии, к более высокой секвестрации углерода, и большей доле возобновляемых источников энергии по мере того, как пределы концентрации CO₂ становятся более строгими. В целом представляется, что сжигание с захватом и хранением углерода, включая биомассу, яв-

ляется дающим основной вклад методом в производстве электроэнергии в прогнозах моделей с ограничением по углероду, с относительно меньшим вкладом возобновляемой энергией, получаемой из отвода природных потоков энергии, таких, как гидроэнергетика, ветер, или солнечное излучение. Атомная энергия в различных опубликованных прогнозах моделей вносит вклад, больший, или меньший, чем эти возобновляемые источники энергии.

Табл. 1. Источники электроэнергии

	2007		2100	
	ГВт(эл.)-год/год	%	ГВт(эл.)-год/год	%
Сжигание	1482	69,2%	4800	40%
Атомная энергия	296	13,8%	3600	30%
Гидроэнергетика	342	15,9%	700	6%
Прочие возобновляемые	26	1,2 %	2900	24%
Итого	2046	100%	12000	100%

Обсуждение сжигания, секвестрации, и возобновляемой электроэнергии, которое приводится ниже, представляет базис для оценки того, что из 12 000 ГВт(эл.)-год/год, прогнозируемых для 2100 года, 40 процентов может быть предоставлено сжиганием, в том числе и биомассы, с большой долей секвестрации, и 30 процентов может быть предоставлено возобновляемой электрической энергией, получаемой из отвода природных потоков энергии: гидроэнергией, ветром, солнечной энергией, геотермальными источниками, и т.п. Основной задачей этой статьи является исследование последствий, в особенности для ядерного распространения, предоставления оставшихся 30 процентов от деления ядер, и (или) от термоядерного синтеза. Обсуждаемая здесь комбинация источников электроэнергии довольно похожа на недавние подробные результаты расчетов по модели MiniCam для случая, в котором атмосферная концентрация CO₂ ограничена 550 частями на миллион^{18,19}.

лент небольшого количества производимого на атомных станциях водорода)²⁰, равного 3650 ГВт(эл.)-год/год в 2100 году, однако с очень широким диапазоном вариаций между 20-ой и 80-ой перцентилями от 1850 до 7510 ГВт(эл.)-год/год, как показано на рис. 3. Временная кривая медианного значения производства электроэнергии на атомных станциях очень близка к временной кривой, предполагаемой в этой статье с использованием приведенной выше логики.

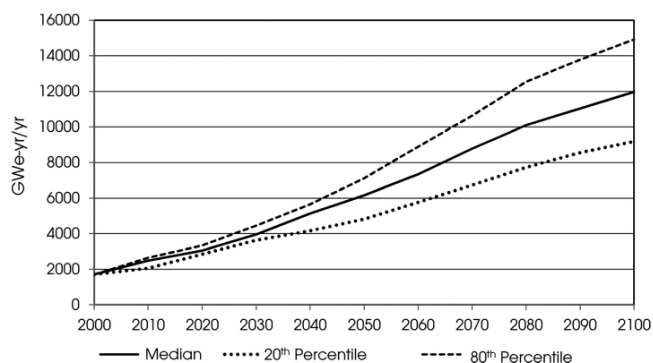


Рис. 1. Производство электроэнергии в моделях EMF 22. Для указания производства энергии используется единица "ГВт(эл.)-год/год", в отличие от производственной мощности, часто обозначаемой как "ГВт(эл.)". По горизонтальной оси отложены годы, по вертикальной оси - производство электроэнергии в ГВт(эл.)-год/год. Сплошной линией показан медианный вариант, штриховой линией - 80-ая перцентиль, пунктирной линией - 20-ая перцентиль.

Для того, чтобы просто произвести моделирование количественной эволюции энергетической системы, доля каждого источника электроэнергии (но не ее величина) предполагалась линейно изменяющейся от ее текущего значения до ее предполагаемого значения в 2100 году (см. табл. 1) с общим временным профилем, задаваемым медианным вариантом EMF 22, показанным на рис. 1.

Полученные временные профили для каждого источника показаны на рис. 2. Интегрированное производство электроэнергии от сжигания равно 320 ТВт(эл.)-лет, от атомной энергии - 150 ТВт(эл.)-лет, и от возобновляемых источников электроэнергии, получаемой от отвода природных потоков энергии - 160 ТВт(эл.)-лет. Для информации отметим, что это составляет 12-кратное увеличение атомной энергетики от 2010 до 2100 года.

Интересно, что база данных EMF 22 включает прогноз специально для полного производства электроэнергии на атомных станциях (включая электрический эквива-

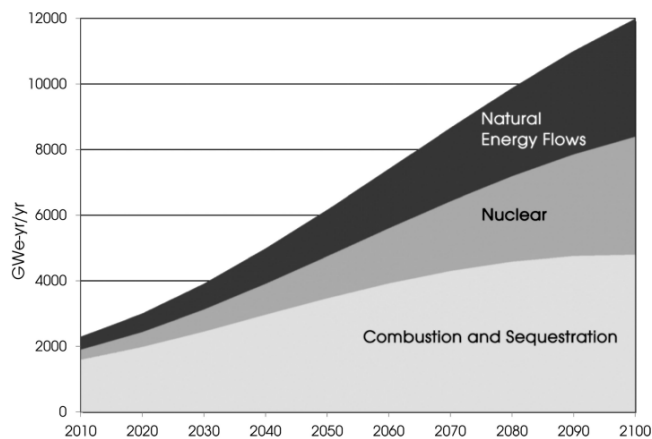


Рис. 2. Предполагаемые временные профили производства электроэнергии. По горизонтальной оси отложены годы, по вертикальной оси - производство электроэнергии в ГВт(эл.)-год/год. Надписи на рисунке (сверху вниз): 1 - природные потоки энергии; 2 - атомная энергия; 3 - сжигание и секвестрация.

Доли и временные профили, показанные на рис. 2 нельзя рассматривать как предсказания, но они могут быть использованы для иллюстрации масштаба имеющейся проблемы и ее последствий. Например, в отношении к климату, можно оценить влияние производства 150 ТВт-лет из угля без секвестрации в качестве замены атомной энергии, приведенной на рис. 2. Например, типичная электростанция, работающая на размельченном угле, выбрасывает 6,68 Мт CO₂ на ГВт(эл.)-год^{21,22} (эти выбросы включают только эксплуатацию, игнорируя небольшой вклад от других выбросов за срок службы, таких, как связанные со строительством, добычей и транспортировкой угля). Увеличение общих выбросов на 1000 Гт CO₂ из-за замены атомной энергии на не секвестрированное сжигание угля к 2100 году приведет к увеличению концентрации CO₂ в атмосфере на 80 частей на миллион²³. Межправительственная комиссия по изменению климата (МКИК) оценивает, что это вызовет дополнительное увеличение долгосрочной равновесной усредненной по всему миру температуры на поверхности на 0,64 °C с диапазоном неопределенности от 0,43 °C до 0,96 °C²⁴. Этот диапазон с фактором 1,5 в каждом направлении называется МКИК как "вероятное" (с вероятностью более 2/3) предсказание.

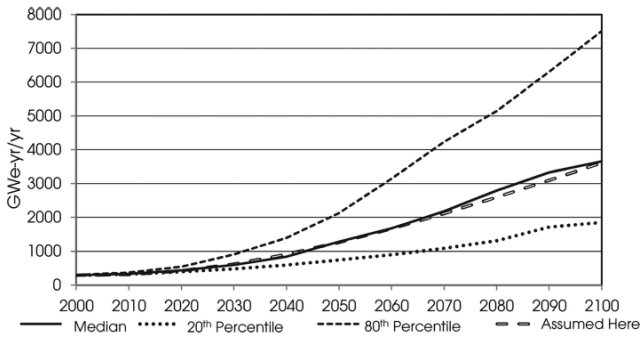


Рис. 3. Производство электроэнергии на атомных станциях в моделях EMF 22. По горизонтальной оси отложены годы, по вертикальной оси - производство электроэнергии в ГВт(эл.)-год/год. Сплошной линией показан медианный вариант, штриховой линией - 80-ая перцентиль, пунктирной линией - 20-ая перцентиль, Длинными штрихами показана предполагаемая в этой статье зависимость.

Усредненная по всему миру температура поверхности достигает своего равновесного значения за период в несколько столетий, и трудно выразить количественно влияние долговременных изменений, подобных этим, но, например, сообщалось, что изменение усредненной по всему миру температуры на поверхности в 2100 году на 1 °C будет означать различие между "обесцвечиванием большинства кораллов" и "широко распространенным вымиранием кораллов"²⁵. Изменение примерно на 2 °C будет означать различие между "увеличением риска исчезновения до 30 процентов видов" и "значительным исчезновением по всему миру". Изменение в диапазоне 2,5 °C будет означать различие между "тенденциями к понижению продуктивности зерновых на низких широтах" и "понижением продуктивности всех зерновых на низких широтах".

Оценка подъема температуры от 0,43 °C до 0,96 °C, вероятно, является слишком высокой, потому что в отсутствие атомной энергии в целом будет производиться меньше электроэнергии, и не вся заменяющая энергия будет приходиться от таких источников с большими выбросами углерода, как размельченный уголь. Если пределы на сжигание с секвестрацией и на возобновляемые источники энергии, получаемые при отводе природных потоков энергии, обсуждаемые ниже в разделах по сжиганию и секвестрации, и по возобновляемым источникам электроэнергии, не будут очень сильными, то тогда экономические модели заменяют атомную энергию другими источниками с низкими выбросами углерода, с увеличением общих расходов мировой экономики²⁶. Однако, следует признать, что произведенные здесь оценки влияния на климат могут также рассматриваться как недооценки, в том, что если пределы на другие источники будут сильными, в 2100 году все еще будут работать станции со сжиганием угля без секвестрации, если только они не будут остановлены до конца срока службы или переоборудованы для захвата и хранения углерода, то это приведет к совершению выброса дополнительных 768 Гт CO₂ после 2100 года (смотрите в Интернете Приложение 1)²⁷.

СЖИГАНИЕ И СЕКВЕСТРАЦИЯ, ВКЛЮЧАЯ БИОМАССУ: 320 ТВт(эл.)-лет в 2100 году, 4800 ГВт(эл.) в 2100 году

В последних отчетах были сделаны выводы о том, что инъекция двуокси углерода под поверхность является хорошо разработанной технологией, хотя и не в том масштабе, который нужен для мощности генерации в диапазоне ГВт(эл.)²⁸⁻³¹. Одиночной работающей на угле электростанции с мощностью 1 ГВт(эл.)-год/год со сроком службы 60 лет потребуются секвестр около 450 Мт CO₂ с использованием хранения под поверхность в соленых водоносных слоях под площадью около 150 км². Потребуются значительные исследования и разработки для того, чтобы определить потенциал различных геологических формаций для удержания CO₂ в таких масштабах без существенной утечки на протяжении сотен лет. Даже после успешных исследований и разработок останутся

вопросы лицензирования, связанные с потенциальной безопасностью и воздействием на окружающую среду таких больших предприятий и существенным ограничением станет заявление "Только не под моим двором".

Общемировой техникой потенциал хранения CO₂ в нефтяных и газовых месторождениях, в не имеющих промышленного значения угольных пластах и в глубоких соленых подземных водоносных слоях был оценен, без включения рассмотрения экономической целесообразности, Межправительственной комиссией по изменению климата (МКИК) на нижнем пределе в 1850 Гт CO₂³². Диапазон опубликованных прогнозов довольно широк, и верхний предел технического потенциала хранения в некоторых случаях на порядок величины больше³³. Сценарий, показанный на рис. 2, потребует 2300 Гт хранения CO₂. Если к этому прибавить требования по хранению, связанные с оставшимся сроком службы станций, существующих в 2100 году (приложение 1 в Интернете), без секвестрации за пределом их срока службы, то это требование возрастет до примерно 3200 Гт CO₂, что на 70 процентов выше нижнего предела оценки технического потенциала МКИК. Эта оценка, однако, предполагает, что все сжигание относится к углю, и что все оно секвестрировано. Сжигание природного газа производит на 50 процентов меньше CO₂ в расчете на 1 кВт-час, и все выбросы углерода не будут секвестрированы, в особенности в ближайшем будущем. Прогнозы относительного вклада угля и природного газа в будущем производстве электроэнергии очень сильно различаются.

Захват и хранение углерода, там, где они применимы, уменьшают суммарную эффективность извлечения электроэнергии из угля примерно на 25 процентов. В настоящее время методы захвата и хранения углерода эффективно собирают около 90% образовавшегося CO₂, так что выбросы CO₂ на 1 кВт-час уменьшаются не на 100%, а примерно на 87% (выбросы CO₂ на 1 кВт-час от возобновляемых источников электроэнергии и от атомной энергетики оцениваются МКИК как намного меньшие³⁴). Мощность в 4800 ГВт(эл.), генерируемая с использованием угля и захвата и хранения углерода, будет выбрасывать 4 Гт CO₂ в год, что превышает общемировые допустимые выбросы от совокупности всех энергетических и промышленных процессов в ограниченных углеродом сценариях. Даже принимая во внимание будущие улучшения эффективности работающих на угле электростанций и технологии захвата и хранения углерода, для достижения приемлемых суммарных выбросов потребуется крупномасштабное производство и сжигание основанного на биомассе топлива (которое приводит к суммарному уменьшению атмосферного CO₂, если энергия, используемая для сбора биомассы достаточно мала).

Кроме того, МКИК сообщает о том, что из-за несоответствия источников CO₂ и потенциальных местоположений секвестрации "к 2050 году, учитывая ожидаемые технические ограничения, около 20 - 40 процентов глобальных выбросов CO₂ от ископаемого топлива могут быть технически пригодными для захвата, включая 30 - 60 процентов от выбросов CO₂ при производстве электроэнергии"³⁵. В этом общем контексте достижение 40 процентов производства электроэнергии от сжигания в 2100 году с очень низким суммарным выбросом CO₂ представляется очень проблемной целью, которую трудно достичь.

ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ОТ ОТВОДА ПРИРОДНЫХ ПОТОКОВ ЭНЕРГИИ: 160 ТВт(эл.)-лет в 2100 году, 3600 ГВт(эл.) в 2100 году

Сегодня основным источником электроэнергии, не выбрасывающим углерода, является гидроэнергетика, на которую в 2007 году приходилось 17 процентов общемирового производства электроэнергии. Хотя гидроэнергетика и обладает потенциалом роста в будущем, она, вероятно, не сможет следовать за общим пятикратным увеличением производства электроэнергии, прогнозируемым на 2100 год. Если она вырастет в два раза до своего реалистичного предела, то в 2100 году крупномасштабная гидроэнергетика будет предоставлять около 6 процентов общемирового производства электроэнергии³⁶. Другие базирующиеся на гидрологических потоках источники, такие, как энергия волн и приливов, не прогнозируются в

качестве основных вкладов. Как показано в табл. 1, по этому предпологается увеличение мощности, отводимой от не гидрологических природных потоков энергии, более, чем в 100 раз.

Низкая теплопроводность скальных пород, большие трудности с очень глубоким бурением в пирогенных и метаморфных скальных породах, и индуцированная сейсмичность рассматриваются как проблемы для получения геотермической энергии с больших глубин, хотя некоторые исследования указывают на большой общий потенциал с возможным производством до 100 ГВт(эл.) в Соединенных Штатах в 2050 году³⁷.

Мы утверждаем здесь, что в 2100 году от возобновляемых источников энергии при отводе от природных потоков энергии может быть получено 30 процентов общемирового производства электроэнергии (3600 ГВт(эл.)), включая, возможно, 1/3 от постоянных источников энергии, таких, как гидроэнергетика и геотермальная энергетика, и 2/3 от переменных источников энергии, таких, как ветер и солнечное излучение.

Доля переменной энергии, которая практически может быть включена в региональную систему электроснабжения, является спорной. Широкие и мощные сети могут усреднить переменное производство по большим площадям, но хранение энергии для сглаживания естественных временных вариаций переменных источников за периоды в дни и недели вызывает сомнения. Даже если усреднить энергию ветра и солнечного излучения по всему региону "ветрового пояса" Великих Равнин Соединенных Штатов, от Техаса до Северной Дакоты, в течение 10 процентов времени полная производимая мощность будет меньше 11 процентов от пиковой мощности, что делает необходимым сокращение спроса и (или) существенное увеличение мощностей генерации³⁸. Исследование в США с целью достижения доли в 20 процентов от внутреннего потребления электроэнергии за счет энергии ветра показало, что это потребует существенного изменения электрической сети США, которое трудно будет реализовать³⁹. Некоторые утверждают, с другой стороны, что с помощью улучшенной технологии можно будет увеличить эту долю до 40 процентов, прежде чем будут достигнуты технические пределы⁴⁰.

Большие доли ветровой энергии, однако, достижимы только в регионах с большими ресурсами ветра. Китай, Европа, Индия, Япония и Корея, представляющие около половины населения мира, обладают примерно 16 процентами ветровых ресурсов на душу населения от аналогичного значения для США⁴¹. Эта величина для наиболее населенных стран, Китая и Индии, равна приблизительно 5 процентам.

Аналогичный набор сомнений относится и к солнечной энергии, которая также является переменной как в пространстве, так и во времени. Широкая и мощная электрическая сеть может оказаться полезной, но у этого подхода имеются серьезные ограничения. Например, проект "Дезертек" предлагать удовлетворить значительную часть потребностей Европы в электроэнергии, используя ветровые и солнечные фермы в Северной Африке⁴². Однако, проекта такого типа представляет значительный риск для европейской безопасности, как подчеркнули недавние события в этом регионе. Вообще говоря, неясно, что страны допустят передачу контроля над значительной частью своих поставок электроэнергии в руки других стран.

Из приведенного выше анализа кажется, что средняя по всему миру доля от переменных источников энергии в 20 процентов, представляющая увеличение такого производства энергии в 100 раз, и средний по всему миру вклад в 30 процентов от возобновляемых источников энергии, отводящих природные потоки энергии, представляют собой цели, требующие очень большого напряжения сил. Поскольку прогнозы в этой области являются весьма противоречивыми, цель, представленную здесь, будет трудно достичь, или превзойти.

АТОМНАЯ ЭНЕРГИЯ: ДЕЛЕНИЕ И СИНТЕЗ ЯДЕР: 150 ТВт(эл.)-лет в 2100 году, 3600 ГВт(эл.) в 2100 году

Приведенное выше обсуждение иллюстрирует проблемы, связанные с производством 70 процентов прогнозируемых общемировых потребностей в электроэнергии

на 2100 год, с низкими выбросами CO₂, в комбинации со сжиганием с захватом и хранением углерода, включая биомассу, и возобновляемых источников энергии, получаемых отводом природных потоков энергии. Тем не менее, в согласии с результатами исследований EMF 22, этот анализ предоставляет поддержку оценке сценария с атомной энергетикой, которая будет производить 30 процентов от прогнозируемых общемировых потребностей в 2100 году, от 14 процентов в 2007 году, в то время как общее производство электроэнергии увеличится в пять раз по сравнению с современным. Здесь обсуждаются ведущие технологии с применением деления ядер, легководные реакторы и реакторы на быстрых нейтронах, основанные на использовании уранового и трансуранового топлива, за которыми следует обсуждение энергии от термоядерного синтеза. Во всех случаях основное внимание уделяется рискам распространения.

Торий, который здесь не обсуждается, но является более распространенным в земной коре по сравнению с ураном, и обладающим некоторыми привлекательными преимуществами по нераспространению и отходам, может представлять собой альтернативное топливо для ядерного деления⁴³. Торий сам по себе не является расщепляющимся материалом, но он может быть преобразован при захвате тепловых нейтронов в уран-233, расщепляющийся изотоп, пригодный как для производства энергии, так и для ядерного оружия. Было показано, что технология для ториевого топливного цикла является трудной, и она до сих пор не была полностью разработана. Поскольку возможные характеристики топливного цикла тория и его риски распространения не были исследованы столь же подробно, как для урана, реакторы деления, основанные на использовании тория, выходят за рамки данного исследования. Читатель может обратиться к предыдущим работам, в которых рассматриваются риски распространения, связанные с различными альтернативными технологиями реакторов деления, в том числе и с ториевым топливом^{44,45}. В целом представленное здесь исследование энергии от деления ядер может рассматриваться как исходные данные, по отношению к которым могут быть оценены альтернативные технологии ядерного деления.

ЛЕГКОВОДНЫЕ РЕАКТОРЫ

Полностью доминирующую современную технологию реакторов деления представляют собой легководные реакторы (ЛВР). В этих системах обычная вода используется как для отвода тепла, образующегося при делении ядер, так и для замедления образующихся при делении нейтронов до тепловых энергий, где они обладают высокой вероятностью инициирования деления ядер и, таким образом, поддержания цепной реакции, вместо того, чтобы поглощаться без деления. Эта технология в основном применяется с использованием однократного топливного цикла, в котором уран сначала добывается из земли и потом обогащается от своей природной концентрации в 0,7 процента урана-235 (встречающегося в природе расщепляющегося изотопа (урана) до примерно 4,5 процентов. Как обсуждается в представленном в Интернете Приложении 1, для производства 1 ГВт(эл.)-год электроэнергии требуется около 200 т природного урана, при содержании урана-235 в обедненных урановых отходах, что является довольно интенсивным уровнем для максимизации использования урана. Если вся атомная энергия по сценарию на рис. 3 будет производиться в ЛВР, то это потребует добычи урана в 33,4 Мт, что хорошо согласуется с оценкой в 35 Мт для аналогичного сценария Фейвесона и др.⁴⁶. Если включить уран, требующийся для завершения эксплуатации ЛВР, использующихся в 2100 году (см. Приложение 1 в Интернете) без строительства новых ЛВР, то требуемый уровень добычи урана возрастет до 59 Мт.

Агентство по ядерной энергии (NEA) Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) вместе с Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ) оценивают общемировые запасы урана в широко цитируемой издающейся раз в два года серии "Красных книг", в издании 2008 года⁴⁷ которой приведены данные 2007 года, а история до 2005 года приводится в издании 2006 года⁴⁸. Эти документы базируются на на-

циональном самостоятельном представлении нерегулярных геологических исследований. Если просуммировать все категории обычных запасов урана, независимо от их цены, включая предполагаемые, необнаруженные запасы (которые стали докладываться только после 1982 года), то общий прогноз для урана в течение последних 25 лет был относительно стабильным, как это показано на рис. 4.

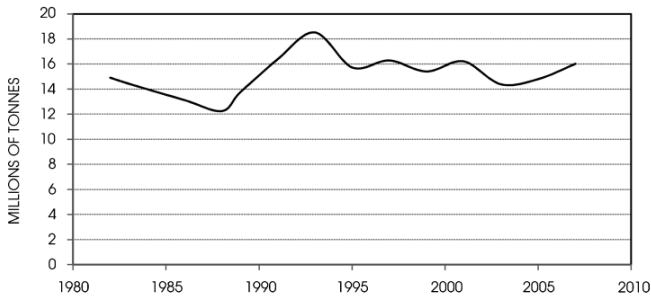


Рис. 4. Общие обнаруженные и необнаруженные запасы урана, сообщенные в Красных книгах МАГАТЭ и Агентства по ядерной энергии с тех пор, как были включены необнаруженные запасы урана. В течение этого периода было добыто 1,1 Мт урана. Источник: OECD 2006, 2008. По горизонтальной оси отложены годы, по вертикальной оси - запасы урана в миллионах тонн.

Эта оценка Агентства по ядерной энергии и МАГАТЭ будет представлять существенное ограничение на использование ЛВР с однократным топливным циклом для того, чтобы удовлетворить требования к атомной энергетике в нашем сценарии. Однако, в литературе имеются значительные разногласия в отношении оценки Агентства по ядерной энергии и МАГАТЭ будущих обычных запасов урана^{49,50}. Это, в частности, происходит из-за того, что цена электроэнергии с ЛВР очень слабо зависит от текущих уровней цены добытого урана. На основании простых моделей и весьма ограниченных геологических данных, в этих анализах предполагается, что 60 Мт урана могут быть доступными по цене, приблизительно в 5 раз превышающей текущие уровни. Это приведет к увеличению цены электроэнергии примерно на 0,01 доллара за кВт-час. Более того, практически неограниченные необычные источники урана, такие, как морская вода, могут в конце концов оказаться доступными по ценам в этом диапазоне, или несколько большим⁵¹. Однако, 59 Мт для полного сценария в 3,7 раза превышает оценки Агентства по ядерной энергии и МАГАТЭ для общемировых запасов, и их может быть, будет трудно поставить. К 2050 году будет использовано только 6,6 Мт, и выделено еще 10 Мт, что примерно согласуется с общей оценкой Агентства по ядерной энергии и МАГАТЭ. Следует признать, однако, что существует значительное различие между странами в отношении запасов урана к потенциальному потреблению. Поскольку многие страны осознают сильную потребность в адекватных внутренних поставках энергии, несмотря на возможность накопления уранового топлива, остаются значительные сомнения в отношении раннего истощения запасов урана.

Вторым фактором, который может ограничить способность ЛВР с однократным топливным циклом поддерживать сценарий на рис. 2, является образование радиоактивных отходов. Если вся указанная атомная энергия будет произведена на ЛВР, то созданные во всем мире ядерные отходы к 2100 году будут соответствовать эквиваленту, примерно в 48 раз превышающему предписанный законом предел, предложенный для хранилища Юкка Маунтин в США. Дополнительный объем, в 38 раз больший этого предела, будет связан с остающимися сроком службы установленных до 2100 года систем ЛВР. Во всем мире еще не было лицензировано геологического хранилища для коммерческих высокоактивных ядерных отходов, и геологическое хранилище Юкка Маунтин было "снято с рассмотрения" в США. Несмотря на обнадеживающий прогресс в Швеции, Финляндии и Франции, перспективы необходимости лицензирования хранилищ во всем мире, по емкости превышающих Юкка Маунтин в 86 раз, остаются приводящими в растерянность.

Подобные вычисления приводят к рассмотрению различных технологий ядерного деления, в особенности тех, в которых используются быстрые (а не тепловые) нейтроны, которые позволяют более эффективно использовать уран и сократить объем долгоживущих ядерных отходов. Второй альтернативой является энергия синтеза, получаемая от слияния легких ядер в ядра гелия, которая не ограничивается запасами урана, и не образует отходов, требующих геологического хранения. Перед обсуждением этих технологий рассмотрим риски распространения, связанные с ЛВР в этом масштабе.

В табл. 2 подытожены некоторые из параметров, относящихся к рискам распространения системы ЛВР, разработанной для предоставления полной мощности атомной энергетики, указанной в нашем сценарии. Перечислены параметры для 2050 и 2100 годов. В табл. 2 "Pu+MA" обозначает плутоний и второстепенные актиниды, такие, как нептуний и америций, которые также могут быть использованы для производства ядерного оружия⁵². Иногда в данном контексте Pu+MA обозначаются как "ТРУ", трансурановые элементы. Второстепенные актиниды обычно составляют менее 10 процентов от всех ТРУ в отработавшем ядерном топливе.

Табл. 2. Относящиеся к распространению параметры систем ЛВР для предоставления профиля производства атомной энергии, указанной на рис. 3.

	2010	2050	2100
Мощность (ГВт(эл.)-год/год)	300	1250	3600
Топливо (т урана-235/год)	300	1250	3600
Образование Pu+MA (т/год)	100	400	1150
Pu+MA в отходах (т)	2600	11200	49000

Риски распространения могут быть подразделены на три категории⁵³:

- Тайное производство оружейных материалов на необъявленных предприятиях.
- Скрытое отвлечение оружейных материалов из находящихся под гарантиями предприятий странами-владельцами.
- Выход стран-владельцев из обязательств по нераспространению и последующее использование находившихся ранее под гарантиями предприятий и (или) оружейных материалов для военных целей.

Существует также риск хищения субнациональными группами оружейных материалов с ядерных предприятий, при сотрудничестве с их работниками, или без него. При анализе риска для систем атомной энергетики этот риск рассматривается отдельно в категории "физической защиты".

В странах, подписавших Договор о нераспространении, и, в частности, его Дополнительный протокол, который позволяет инспекцию необъявленных предприятий, имеется весьма небольшой риск тайного производства оружейных материалов на небольших реакторах деления, поскольку они могут быть обнаружены, например, по их излучению. Также имеется только небольшой риск скрытого отвлечения оружейных материалов с объявленных установок ЛВР, поскольку МАГАТЭ может подсчитать и контролировать топливные стержни с высокой степенью уверенности. Однако, по мере увеличения на порядки величины производства атомной энергии и количества стран, производящих атомную энергию, поддерживать тот же самый абсолютный уровень ошибок учета станет все труднее. Риск хищения ядерных материалов субнациональными группами для производства ядерного оружия является относительно небольшим, поскольку топливо, поступающее на ЛВР, является низкообогащенным ураном (НОУ), который субнациональной группе не так легко преобразовать в высокообогащенный уран (ВОУ), необходимый для производства ядерного оружия, а плутоний и второстепенные актиниды в отработавшем ядерном топливе перемешаны с сильно радиоактивными продуктами деления. Отработавшее топливо рассматривается как "защищающее самого себя" против хищения и последующего использования в ядерных взрывных устройствах субнациональными группами в течение периода по крайней мере в 100 лет. Даже после этого периода

отработавшее топливо является громоздким и радиоактивным, и его можно будет легко учить. При наличии адекватных ресурсов будет возможно обнаруживать дефицит отработавшего ядерного топлива в бассейнах охлаждения, сухих контейнерах, или даже в хранилищах, будь то из-за отвлечения страной-владельцем, или из-за хищения. Следует признать, однако, что текущий бюджет МАГАТЭ составляет 122 миллиона евро в год для верификации 908 предприятий, находящихся под гарантиями, или содержащих находящиеся под гарантиями материалы, очевидно является весьма напряженным, и ограничивает то, что может быть достигнуто. Более того, национальные ресурсы, выделяемые для сдерживания хищения, часто характеризуются как неадекватные для решения проблемы.

Для того, чтобы справиться с изменением климата, атомная энергия должна будет стать намного более распространенной, так что многим новым странам понадобится присоединиться к ядерному "клубу", и несомненно, 61 страна без атомной энергии⁵⁴, включая развивающиеся страны по всему земному шару, такие, как Боливия, Мадагаскар и Йемен, начнут изучать возможность создания атомной энергетики через консультации с МАГАТЭ⁵⁵. Этот представляет опасность значительного увеличения количества стран с доступом к оружейным материалам.

Наибольшие риски для будущих систем ЛВР связаны с 1) тайным обогащением урана с использованием развитых технологий, таких, как центрифуги, 2) выходом из обязательств и использованием ранее находящихся под гарантиями обогатительных предприятий для производства оружейных материалов, и 3) выходом из обязательств и использованием плутония и, возможно, второстепенных актинидов из отработавшего ядерного топлива. Опасения в отношении разработки Ираном центрифуг для центра обогащения урана относятся к рискам 1) и 2), в то время как разработка Северной Кореей ядерных взрывных устройств является примером риска 3).

Принимая 2050 год в качестве примера, в ЛВР будет поставляться 1250 т урана-235 в год в форме НОУ, степень обогащения которого предполагается здесь равной 4,5% (приложение 2 в Интернете). МАГАТЭ⁵⁶ определяет существенное количество (SQ) расщепляющегося материала как "приблизительное количество ядерного материала, для которого не может быть исключена возможность изготовления из него ядерного взрывного устройства. Существенные количества принимают во внимание неизбежные потери в процессах преобразования и изготовления, и их не следует путать с критическими массами". Для высокообогащенного урана, VOU , SQ определяется как количество, содержащее 25 кг урана-235. Для плутония SQ равно 8 кг, практически безотносительно к его изотопному составу⁵⁷. Министерство энергетики США указало, что возможно изготовить ядерное оружие из всего 4 кг плутония оружейного качества (с высокой концентрацией плутония-239 по отношению к другим изотопам).

Топливо ЛВР находится в форме НОУ, а не VOU . Поэтому количество, необходимое для оценки уровня успеха, необходимое для гарантии против тайного производства или выхода из обязательств, фактически является количеством урана-235 в VOU , которое может быть произведено на ожидаемых обогатительных предприятиях. Способность к обогащению измеряется в килограммах единиц разделительной работы (ЕРР)⁵⁸. Для одного SQ VOU требуется 5500 килограммов ЕРР⁵⁹, а для производства 1 ГВт-год на ЛВР требуется 153000 килограммов ЕРР при степени обогащения 4,5 процента и концентрации урана-235 в урановых отходах в 0,25 процента. Общие мировые производственные мощности в 2050 году поэтому должны будут соответствовать производству примерно 34500 SQ VOU за год. Одиночное крупное обогатительное предприятие, которое производит VOU для ЛВР с мощностью 50 ГВт-год/год, 4 процента от ожидаемого мирового рынка в 2050 году, может быть переключено на производство 1380 SQ урана-235 с обогащением 90 процентов в год. Проверить, что коммерческое обогатительное предприятие не производит VOU , относительно просто, но при выходе из обязательств переход на производство VOU может быть быстрым⁶⁰.

Еще более проблематично то, что тайное обогатительное предприятие, использующее технологию центрифуг Р-2, разработанную в Пакистане, с занимаемой

площадью около 550 м² и с потреблением электроэнергии около 100 кВт-эл., может производить 1 SQ VOU , обогащенного до 90 процентов, в год⁶¹, начиная с природного урана, и более 5 SQ в год, если начинать с НОУ. Модернизированные коммерческие технологии центрифуг являются еще более компактными и эффективными. Предприятия, основанные на таких технологиях, будет трудно обнаружить, даже при действующем Дополнительном протоколе. Поэтому широкое распространение этой и других передовых технологий для обогащения урана, и распространение узаконивание доступа к значительным поставкам урана, которые могут сопровождать существенное распространение атомной энергии в многих новых странах, являются серьезным опасением, и они должны контролироваться до возможной степени посредством применения систем "черного ящика" на находящихся под гарантиями многонациональных предприятиях^{62,63}.

Вторым серьезным опасением в технологии ЛВР является присутствие наличие значительных количеств плутония и второстепенных актинидов ($Pu+MA$, или трансурановых элементов) в отработавшем топливе. При выгорании 50 МВт-день/кг, типичном для ЛВР, на 1 ГВт(эл.)-год/год образуется приблизительно 321 кг трансурановых элементов (приложение 2 в Интернете), в том числе 291 кг плутония. 11200 т трансурановых элементов, доступных в отработавшем топливе в 2050 году, соответствуют 1,3 миллиона SQ плутония. Скорость образования в 400 т/год соответствует 46000 SQ плутония за год. Новая ядерная страна, которая производит всего 1 ГВт-эл. атомной энергии в течение десяти лет, может владеть 370 SQ плутония. МАГАТЭ оценило⁶⁴, что время, необходимое стране-владельцу для производства ядерного оружия, начиная с отработавшего ядерного топлива, равно 1 - 3 месяцев, в предположении, что все остальные компоненты готовы.

Бари⁶⁵ на основании своего анализа в контексте Международного форума "Generation IV"⁶⁶, предложил для Глобального партнерства по атомной энергии (GNEP)⁶⁷ инициативу классификации плутония реакторного качества как имеющего "среднюю" сопротивляемость распространению, в то время как плутоний оружейного качества (с высокой концентрацией плутония-239 по отношению к другим изотопам) имеет "низкую" сопротивляемость распространению. Эта оценка базировалась на заявлении Министерства энергетики США: "В случае ... распространяющей страны мы классифицируем барьер [от плутония реакторного качества] как "промежуточный" по значению: такое государство, вероятно, предпочло бы избежать, если это возможно, трудностей, создаваемых изотопным отклонением для проектирования, изготовления и обслуживания ядерного оружия, но оно также, вероятно, будет иметь возможность справиться с этими трудностями так, чтобы достичь уровня характеристик оружия, адекватного для первоначальных целей распространяющей страны".

В противоположность предложению Бари, при контроле МАГАТЭ к плутонию реакторного качества относятся так же, как к плутонию оружейного качества. Создание ядерного оружия с использованием плутония реакторного качества "не отличается по своей природе от того, что включает использование плутония оружейного качества, и отличается только в степени"⁶⁸. Хотя ожидаемая мощность ядерного взрывного устройства первого поколения из плутония реакторного качества является гораздо более переменной, чем для плутония оружейного качества, оно, тем не менее, будет весьма разрушительным, даже в вероятном случае "хлопка" с минимальной мощностью⁶⁹⁻⁷¹. Частично облученное топливо, которое станет доступным в сценарии выхода из обязательств, или из концов топливных стержней, которые меньше подвергались нейтронному облучению, может предоставить плутоний более высокого качества. Более быстрая имплантация, использующая технологии, разработанные после 1945 года, также улучшит характеристики оружия. В 1962 году Соединенные Штаты успешно взорвали ядерное оружие, использующее плутоний реакторного качества, и Министерство энергетики США заявило⁷², что "распространяющие страны, используя конструкции промежуточной сложности, могут производить оружие с гарантированной мощностью взрыва, существенно большей, чем килограммы, возможные для простого ядерного устройства первого поколения", применяя плутоний реакторного ка-

чества.

Очевидно, что за отработавшим топливом следует тщательно следить для того, чтобы обеспечить быстрое обнаружение любого нарушения договорных обязательств. С другой стороны, без военного вторжения практически невозможно запретить суверенной нации в ее собственных восприимчивых высших национальных интересах выйти из ее соглашений по нераспространению и получить доступ к ее собственному существующему отработавшему топливу для производства ядерного оружия. Подготавливаемые к эксплуатации перерабатывающие заводы могут быть спрятаны под землей, а разрушение хранилища отработавшего ядерного топлива бомбардировкой с воздуха может разбросать радиоактивность над гражданским населением, включая население соседних стран. Выход из-под гарантий может оказаться сильным искушением для государства (или режима), которое воспринимает себя как находящееся под реальной угрозой, пусть даже только обычных вооружений. В некоторых случаях атакующая сторона может ответить, снабдив себя ядерным оружием, но даже в этом случае быстрое приобретение ядерного оружия обеими сторонами превратит надвигающееся стратегическое поражение находящейся под угрозой страны (или режима) в туиковую ситуацию, т.е. в существенную восприимчивую выгоду. Анализ мотивации и поведения Северной Кореи⁷³ и Ирана⁷⁴ иллюстрирует притягательность ядерного оружия для государств, воспринимающих себя как находящиеся под серьезной угрозой.

Недавно Объединенные Арабские Эмираты, в части своего предложения по строительству первой атомной электростанции, указало на свое желание возвращать отработавшее ядерное топливо своему поставщику. Соглашения, подобные этому, могут помочь предоставить устойчивость к распространению на так называемом "конечном участке" ядерного топливного цикла, хотя необходимо в охлаждении топлива перед поставкой все еще будет оставаться значительное количество материала на площадке. Более того, следует признать, что Договор о нераспространении интерпретировался подписывающими его сторонами как позволяющий обогащение и переработку все странами, включая страны, не обладающие ядерным оружием, так что потребуются значительные изменения в международных соглашениях для того, чтобы помешать странам приобретать и применять эти технологии. Трудности, с которыми столкнулись инициативы Глобального партнерства по атомной энергии (GNEP)⁷⁵ и "топливного банка" МАГАТЭ⁷⁶ в привлечении значительного количества стран, желающих отказаться от обогащения и переработки для доступа к внешним источникам топлива, в этом отношении вызывает беспокойство. Инициатива Глобального партнерства по атомной энергии (GNEP) должна будет определить страны, имеющие право обогащать и перерабатывать топливо, а другие страны должны будут отказаться от таких прав. Напротив, инициатива МАГАТЭ не определяет таких различий, но предлагает, чтобы вся деятельность по обогащению и переработке исключительно помещалась под международный контроль. Однако, даже это предложение встретило сильное сопротивление со стороны развивающихся стран.

Сопротивление необходимому усилению режима нераспространения частично вытекает из медленного осуществления статьи и разоружении существующего Договора о нераспространении. Однако, большое расширение и распространение атомной энергетики делает процесс разоружения гораздо более трудным. Кооперативный процесс отказа от ядерного оружия в мире, в котором так широко распространены сырьевые материалы для его производства, должен быть очень трудным, поскольку величина и широта требующей контроля системы будет обескураживающей.

Перед тем, как сценарии деления быстрыми нейтронами и синтеза будут рассматриваться в следующих разделах, было бы полезно рассмотреть, в качестве примера, влияние на климат в сценарии с ЛВР, в котором максимум приходится на середину столетия, и все обнаруженные и необнаруженные запасы урана по оценке МАГАТЭ и Агентства по ядерной энергии используются до 2100 года. Замена такого количества атомной энергии на сжигание размельченного угля без захвата и хранения

углерода увеличит к 2100 году концентрацию CO₂ на 44 части на миллион, с предсказываемым весьма долговременным возрастом усредненной по всему миру температуры поверхности на 0,23 - 0,51 °C, допуская все описанные выше оговорки. В частности, может оказаться возможным (а может быть, и нет) за счет увеличения расходов заменить это количество атомной энергии посредством ускоренных программ захвата и хранения углерода и возобновляемых источников энергии, получаемых отводом природных потоков энергии.

Даже при более сильном действующем режиме нераспространения лицам, принимающим решения, требуется балансировать между рисками, связанными с возрастанием температуры, и рисками увеличения распространения, обсужденными ранее, так же как и расходами и неопределенностями ускоренных программ альтернативных источников энергии.

РЕАКТОРЫ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ

Ограничения на поставки урана и (или) на способность хранения отработавшего ядерного топлива воспринимаются как потенциальные побуждения к принятию реакторов ядерного деления, которые работают с быстрым спектром образующихся при делении нейтронов, иногда называемыми как "реакторы на быстрых нейтронах" (РБН). Это обычно требует использования тяжелых металлических охладителей, таких, как натрий или свинец, для ограничения замедления нейтронов при столкновениях⁷⁷. Альтернативно может оказаться полезным прозрачный для нейтронов охладитель, такой, как гелий. В таких реакторах в качестве цели проекта принимается преобразование урана-238 в изотопы плутония и второстепенных актинидов (трансуранных элементов), где сжигаются только трансуранные элементы, а не уран-235. Поэтому им не требуется добываемый уран. Если они сконструированы для такой цели, они могут также первоначально запускаться с обогащенным ураном⁷⁸, а не с трансуранными элементами, и затем переходить к сжиганию трансуранных элементов.

Разработка систем с РБН, базирующихся на трансуранных элементах, и полного связанного с ними топливного цикла с очень сложной радиохимией, являются серьезными техническими проблемами, и степень успеха, который может быть достигнут, не определена. Однако, многие страны продолжают исследование и разработки по системам на быстрых нейтронах, через Международный форум "Generation IV"⁷⁹, через другие международные соглашения, и через национальное развертывание прототипов систем на быстрых нейтронах.

Коэффициент воспроизводства (CR) реактора на быстрых нейтронах определяется скоростью образования трансуранных элементов, деленная на скорость их выгорания. Например, CR = 1 соответствует системе, которая в целом не потребляет и не образует трансуранных элементов. Диапазон вероятных доступных значений коэффициента воспроизводства, возможно, лежит в пределах от 0,5 до 1,5, хотя конкретные пределы все еще изучаются. Реакторы с CR > 1 называются "размножителями" расщепляющегося топлива, а реакторы с CR < 1 называются "сжигателями". Верхний предел коэффициента воспроизводства ограничен экономией нейтронов⁸⁰, поскольку при каждом делении трансуранных элементов образуется около 2,9 нейтронов, и один из этих нейтронов должен быть использован в последующем делении для поддержания цепной реакции. Теоретический верхний предел CR примерно равен 1,9, который может быть достигнут при захвате всех оставшихся нейтронов ураном-238 с образованием плутония-239, неизбежно уменьшается из-за потери нейтронов из активной зоны, или их поглощения при захвате, например, в плутонии-239 и продуктах деления, и в элементах внутренней конструкции реактора. Нижний предел диапазона коэффициента воспроизводства может быть ограничен практическим сроком службы оболочки трансуранового топлива, или проблемами безопасности, которые возникают, например, из-за большого всплеска реактивности во время сжигания с низким коэффициентом воспроизводства, и малой доли запаздывающих нейтронов для трансуранных элементов⁸¹.

Одной из целей Инициативы современного топлив-

ного цикла США является "разработать и сделать доступной технологию топливного цикла, требующуюся для коммерческого развертывания к 2040 году реакторов на быстрых нейтронах, работающих или как только преобразователи трансурановых элементов или как комбинированные размножители топлива и преобразователи"⁸². Соответственно здесь рассматриваются сценарии, в которых коммерческие реакторы на быстрых нейтронах, сжигающие трансурановые элементы, вступят в строй в 2040 году. Другие страны могут руководствоваться другими соображениями, чем Соединенные Штаты, и двигаться более быстро. Например, потребности Китая и Индии в поставках энергии растут быстро и у них ограничены внутренние поставки урана.

В 2040 году в мире будут большие запасы отработавшего ядерного топлива, так что РБН могут быть запущены, когда это отработавшее топливо будет переработано для извлечения плутония и второстепенных актиноидов, и затем из них будет изготовлено трансурановое топливо для реакторов на быстрых нейтронах. Как показано в динамических уравнениях Приложения 3 в Интернете, временная эволюция ввода этих реакторов в действие управляется источником трансурановых элементов, коэффициентом воспроизведения реакторов на быстрых нейтронах, и временем нахождения топлива в реакторе, в охлаждении, и затем в переработке и изготовлении. В настоящем анализе реакторы на быстрых нейтронах запускаются только с трансурановыми элементами, а не с обогащенным ураном.

В этих анализах пренебрегалось различиями между странами в поставках урана и доступе к отработавшему топливу, и запасы урана и отработавшего топлива рассматривались как общемировые запасы. В случае отработавшего топлива это, вероятно, слишком оптимистично, поскольку международный обмен отработавшим топливом, которое потенциально может быть использовано в оружии, возможно, будет ограничен различными способами. С другой стороны, доступ к урану исторически был довольно открытым, и реакторы на быстрых нейтронах, как отмечалось выше, могут запускаться на обогащенном уране. На рис. 5 - 8 рассматриваются реакторы на быстрых нейтронах обоих типов (размножители с $CR > 1$ и сжигатели с $CR < 1$): во-первых, варианты реакторов-размножителей с $CR \leq 1,5$, которые позволяют реакторам на быстрых нейтронах максимально заменить ЛВР к концу столетия (но не раньше), и к той же дате передать все отработавшее топливо ЛВР в систему РБН, и, во-вторых, варианты реакторов-сжигателей с $CR = 0,5$, которые используют реакторы на быстрых нейтронах для сокращения объема трансурановых отходов, поскольку ЛВР будут продолжать работать и после 2100 года. Для каждого из этих классов рассматриваются два времени нахождения отработавшего трансуранового топлива на стадиях охлаждения, переработки и изготовления (τ_F): минимальное время в 2 года, которое может быть достигнуто на перерабатывающих предприятиях, расположенных рядом с реакторами на быстрых нейтронах, и время, оцениваемое в 11 лет, которое может потребоваться для предоставления адекватного охлаждения, позволяющего перевезти отработавшее трансурановое топливо на международные центры переработки. Эти анализы дополняют предыдущую работу⁸³, в которой анализировались только сценарии США, и где использовались те же самые значения для τ_F .

На рис. 5 - 8 показаны результаты для этих вариантов, полученные с использованием уравнений эволюции для запасов и потоков, описанные в Приложениях 2 и 3. В целом, большие времена нахождения топлива в переработке приводят к меньшим темпам роста для реакторов на быстрых нейтронах. Это вытекает из того факта, что в реакторе на быстрых нейтронах обычно находится четырехлетний запас топлива, но дополнительное время нахождения в бассейнах охлаждения, при транспортировке, переработке и изготовлении (τ_F) требует существенного дополнительного выделения трансуранового топлива для непрерывно эксплуатируемой системы (здесь не было сделано дополнительного выделения резервной поставки топлива, возможно, на один год, которое может потребоваться операторам реактора). При $\tau_F = 2$ годам, как предполагалось в варианте А, вся атомная энергетика с ЛВР может быть заменена к 2100 году реакторами на быстрых

нейтронах с коэффициентом воспроизводства $CR = 1,21$. При $CR = 1,5$ для достижения этой цели потребуется $\tau_F \leq 6$ лет. При $\tau_F = 6$ годам с предполагаемым временем для переработки и изготовления только в один год, оставшиеся пять лет для охлаждения и для транспортировки туда и обратно могут оказаться неадекватными для использования международных центров вторичной переработки топлива. В варианте В с $\tau_F = 11$ годам заменить все ЛВР к 2100 году будет невозможно.

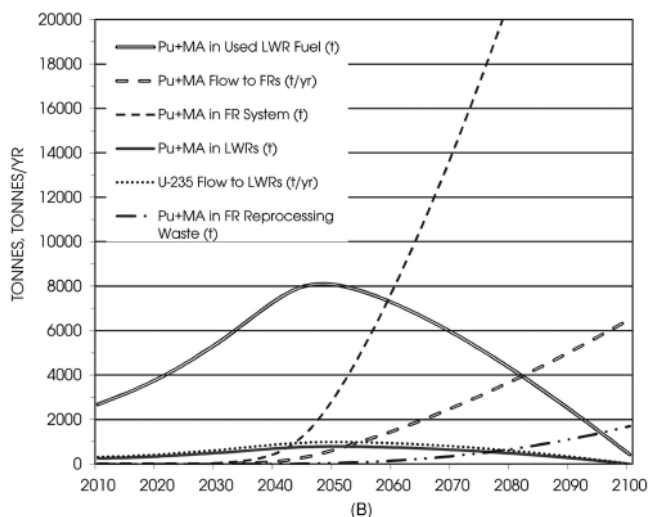
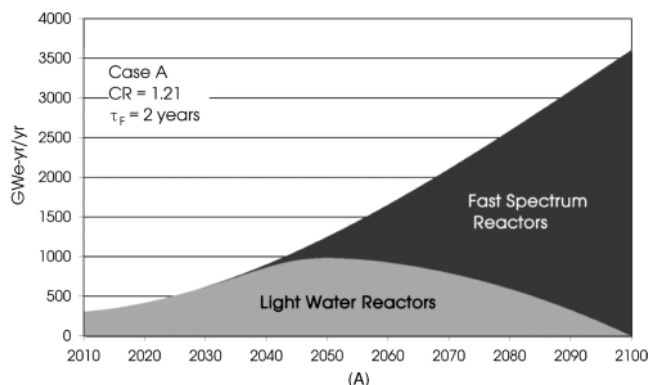


Рис. 5А и 5В. (А) Производство энергии и (В) запасы и потоки Pu + МА и U-235 при $CR = 1,21$ и $\tau_F = 2$ годам. В 2100 году запасы Pu + МА в системе РБН достигнут 38010 тонн. На горизонтальных осях рис. 5А и 5В отложены годы. На вертикальной оси рис. 5А показано производство энергии в ГВт(эл.)-год/год. Надписи на рисунке 5А (сверху вниз): 1 - вариант А; 2 - $\tau_F = 2$ годам; 3 - реакторы на быстрых нейтронах; 4 - легководные реакторы. На вертикальной оси рис. 5В показаны запасы (в тоннах) и потоки (в тоннах за год). Надписи на рисунке 5В (сверху вниз): 1 - Pu + МА в отработавшем топливе ЛВР (т); 2 - поток Pu + МА на РБН (т/год); 3 - Pu + МА в системе РБН (т); 4 - Pu + МА в ЛВР (т); 5 - поток U-235 на ЛВР (т/год); 6 - Pu + МА в переработанных отходах РБН (т).

Кроме того, уменьшение коэффициента воспроизводства приводит к меньшему количеству реакторов на быстрых нейтронах. Частично так происходит потому, что в "сбалансированной" равновесной системе, в которой реакторы на быстрых нейтронах постоянно потребляют трансурановые элементы из ЛВР (Приложение 3 в Интернете) на реакторы на быстрых нейтронах с $CR = 0,5$ будет приходиться всего около 39 процентов общего производства энергии. Однако, верно и то, что мировые запасы отработавшего ядерного топлива ограничивают общее число реакторов с $CR = 0,5$, которые могут быть запущены к 2100 году. Поэтому большее значение τ_F в варианте D ограничивает число реакторов на быстрых нейтронах.

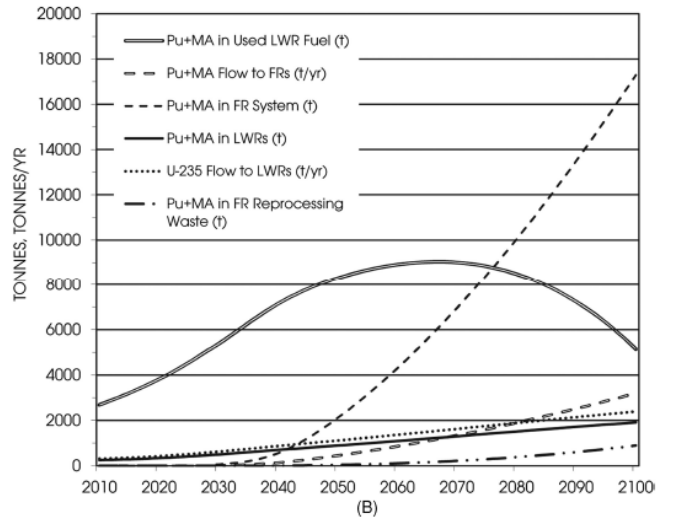
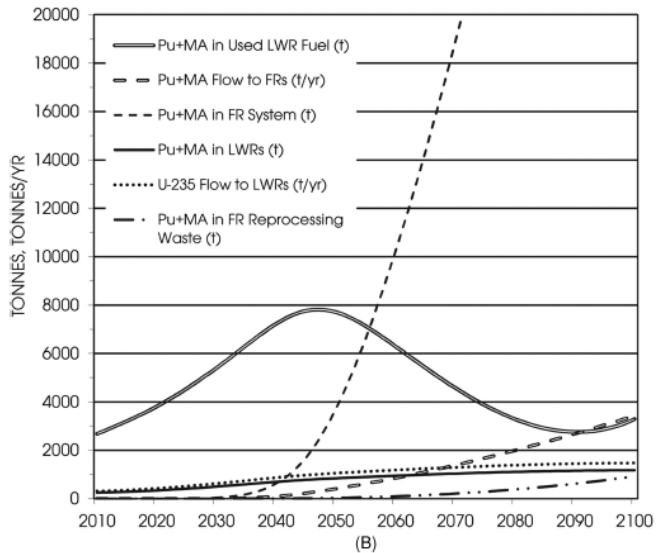
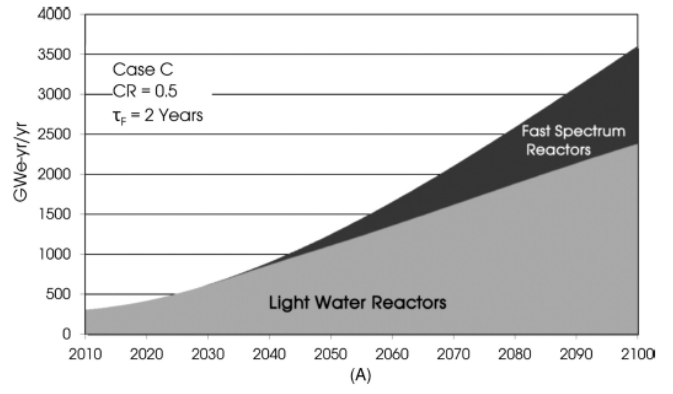
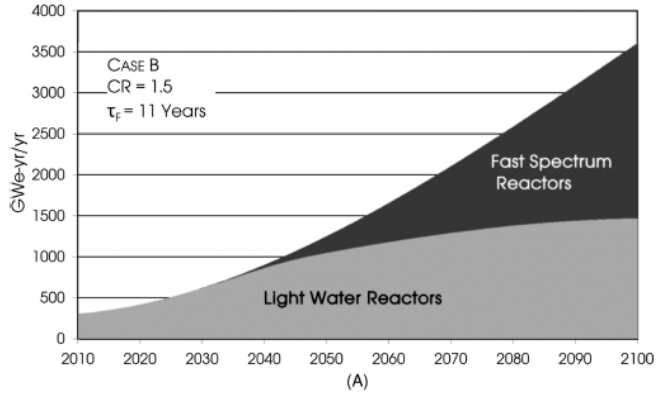


Рис. 6А и 6В. (А) Производство энергии и (В) запасы и потоки Pu + MA и U-235 при CR = 1,5 и $\tau_F = 11$ годам. В 2100 году запасы Pu + MA в системе РБН достигнут 52432 тонн. На горизонтальных осях рис. 6А и 6В отложены годы. На вертикальной оси рис. 6А показано производство энергии в ГВт(эл.)-год/год. Надписи на рисунке 6А (сверху вниз): 1 - вариант В; 2 - $\tau_F = 11$ годам; 3 - реакторы на быстрых нейтронах; 4 - легководные реакторы. На вертикальной оси рис. 6В показаны запасы (в тоннах) и потоки (в тоннах за год). Надписи на рисунке 6В (сверху вниз): 1 - Pu + MA в отработавшем топливе ЛВР (т); 2 - поток Pu + MA на РБН (т/год); 3 - Pu + MA в системе РБН (т); 4 - Pu + MA в ЛВР (т); 5 - поток U-235 на ЛВР (т/год); 6 - Pu + MA в переработанных отходах РБН (т).

Рис. 7А и 7В. (А) Производство энергии и (В) запасы и потоки Pu + MA и U-235 при CR = 0,5 и $\tau_F = 2$ годам. В 2100 году запасы Pu + MA в системе РБН достигнут 17292 тонн. На горизонтальных осях рис. 7А и 7В отложены годы. На вертикальной оси рис. 7А показано производство энергии в ГВт(эл.)-год/год. Надписи на рисунке 7А (сверху вниз): 1 - вариант С; 2 - $\tau_F = 2$ годам; 3 - реакторы на быстрых нейтронах; 4 - легководные реакторы. На вертикальной оси рис. 7В показаны запасы (в тоннах) и потоки (в тоннах за год). Надписи на рисунке 7В (сверху вниз): 1 - Pu + MA в отработавшем топливе ЛВР (т); 2 - поток Pu + MA на РБН (т/год); 3 - Pu + MA в системе РБН (т); 4 - Pu + MA в ЛВР (т); 5 - поток U-235 на ЛВР (т/год); 6 - Pu + MA в переработанных отходах РБН (т).

В табл. 3 представлены некоторые ключевые результаты, относящиеся к обеим задачам реакторов на быстрых нейтронах: уменьшению количества отходов и расширению запасов для деления ядер, а также к рискам распространения. Сначала проанализируем степень успеха в достижении целей, рассматриваемых для реакторах на быстрых нейтронах, расширение ресурсов урана и сокращение отходов.

С точки зрения расширения ресурсов урана, очевидно, что вариант А является успешным, требуя меньше добытого урана, чем общие (обнаруженные и необнаруженные) запасы, оцененные МАГАТЭ и Агентством по ядерной энергии в 16 Мт, в отличие от сценария с одними ЛВР, который требует 59 Мт даже в том случае, если после 2100 года не будут строиться дополнительные ЛВР. Вариант В является успешным в некоторой степени, а варианты С и D, поскольку они не предназначены для замены ЛВР на РБН, не только превышают по требованиям оценку общих запасов МАГАТЭ и Агентства по ядерной энергии, но и занижены по требованиям в табл. 3. Символ "+" указывает, что "выделенные" запасы, связанные с реакторами, существующими в 2100 году, значительно ниже долговременных требований стационарной "сбалансированной" системы.

Отметим, что темпы перехода к реакторам на быстрых нейтронах могут быть ускорены, в особенности в вариантах В и D, которые ограничиваются доступностью трансуранового топлива, если РБН будут сконструированы таким образом, чтобы они могли начать работу с обогащенным урановым топливом, и затем перейти на трансурановое топливо. Если рассматривается РБН, способный производить 1 ГВт(эл.)-год/год с CR = 1 и $\tau_F = 11$ годам, то он начнет поставлять свое собственное топливо только после того, как его загружали топливом в течение 15 лет. Если пренебречь различием между топливом с ураном-235 и трансурановым топливом, это потребует примерно 27 т урана-235, или около 5800 т добытого урана, в предположении 20-процентного обогащения ураном-235 с 0,25 процентами урана в отвалах. Поэтому для запуска таких систем с общей производительностью 1000 ГВт(эл.)-год/год потребуется около 5,8 Мт добытого урана. В предельном случае реакторы на быстрых нейтронах с общей производительностью 3600 ГВт(эл.)-год/год могут быть запущены с использованием 21 Мт добытого урана, что на 30 процентов превышает общую оценку в "Красной книге". С такими запасами реакторы на быстрых нейтронах с CR = 1, сконструированные для запуска с обогащенным ураном, смогут оказаться способными сыграть свою предназначенную роль в конце столетия при отсутствии предшествующего поколения ЛВР. Поскольку ЛВР потребляет около 900 кг урана-235 в год и производит около 325 кг трансурановых элементов, в целом для

перехода к реакторам на быстрых нейтронах в отсутствие крупномасштабного строительства ЛВР потребуются меньше добытого урана. Следует отметить, однако, что общее количество Pu + MA в системе реакторов на быстрых нейтронах с общей производительностью 3600 ГВт(эл.)-год/год с $\tau_F = 11$ годам будет достигать диапазона на 100000 т, примерно вдвое большего, чем указано в табл. 3.

не становится равным нулю, поскольку их отработавшее топливо перед переработкой должно будет охлаждаться в течение примерно 6 лет)⁸⁴.

Табл. 3. Параметры сценариев для реакторов на быстрых нейтронах, относящиеся к расширению запасов и уменьшению отходов, а также к рискам распространения.

	A	B	C	D
CR	1,21	1,5	0,5	0,5
τ_F (лет)	2	11	2	11
Добытый и выделяемый уран (Mt)	12,3	29,5	42,0 +	47,5 +
Pu + MA в отходах (2100 год, т)	2220	4210	6030	6550
Pu + MA в системе РБН (2100 год, т)	38000	53800	17300	24500
Уран-235 в топливе (2100 год, т/год)	0	1470	2390	2770
Pu + MA в топливе (2100 год, т)	6510	3420	3190	2170

Тем не менее, следует соблюдать осторожность, поскольку эта оценка отходов, основанная только на трансураниевых элементах, не является полной. Масса продуктов деления, образующихся на 1 ГВт(эл.)-год/год в ЛВР и РБН примерно одинакова, за исключением ожидаемого умеренного увеличения эффективности при более высоких температурах охладителей реакторов на быстрых нейтронах. Для выигрыша в 4 - 5 раз в отношении теплоемкости хранилищ отходов потребуются отделить цезий и стронций и хранить их в течение примерно 300 лет вне хранилища⁸⁵. Представляется также, что в окислительной окружающей среде, такой, которая доминирует в Юкка Маунтин, в отличие от восстанавливающей окружающей среды, которая теперь рекомендуется МАГАТЭ для геологических хранилищ⁸⁶, подвижность долгоживущих продуктов деления технеций-99 и иод-129 по сравнению с плутонием и второстепенными актинидами может сделать их существенными опасностями по радиологической безопасности⁸⁷.

Далее будут рассматриваться риски распространения вариантов с РБН на рис. 5 - 8. На этих рисунках наиболее сильно выделяется растущая кривая, обозначающая запасы трансураниевых элементов в системе РБН, включая хранилища и предприятия переработки. Поскольку БРН с $CR > 1$ в целом создают трансураниевые элементы, а БРН с $CR < 1$ сжигают их, но медленно, количество трансураниевых элементов в процессе будет сравнимо с количеством, которое будет храниться в сухих контейнерах или будет захоронено в геологических хранилищах в случае только одних ЛВР (см. строку 4 в табл. 2). Поэтому в вариантах с РБН трансураниевые элементы в сухих контейнерах или геологических хранилищах будут заменены на аналогичные количества трансураниевых элементов, которые, однако будут использоваться или перерабатываться, и будут таким образом вызывать намного большие риски и требовать значительно более обширных гарантий. Размер запасов лежит в диапазоне от 2 до 6 миллионов существенных количеств SQ. Для варианта реакторов на быстрых нейтронах с производительностью 3600 ГВт(эл.)-год/год и $\tau_F = 11$ годам, они будут составлять 11 миллионов SQ. Это служит примером того, где величина определенно имеет значение. Риск скрытого отвлечения нескольких SQ странами или субнациональными группами представляется очень большим. Следует признать также, что во всех четырех вариантах принимается продолжающийся рост активных запасов трансураниевых элементов по мере увеличения потребления энергии. Более того, внезапная остановка по любой причине приведет к необходимости утилизации большого количества отходов. Эти результаты можно подытожить в стиле эпиграммы⁸⁸: "... нужно вводить "в игру" трансураниевые элементы, чтобы уменьшить бремя отходов. "Используй их, чтобы избавиться от них" и "не останавливайся!"".

Важно рассматривать риски распространения не только в аспекте запасов, но и в аспекте потоков. Табл. 3 показывает, что вариант А устраняет потребность в обогащении урана, поскольку единственными расщепляющимися видами топлива для реакторов на быстрых нейтронах в этом сценарии являются трансураниевые эле-

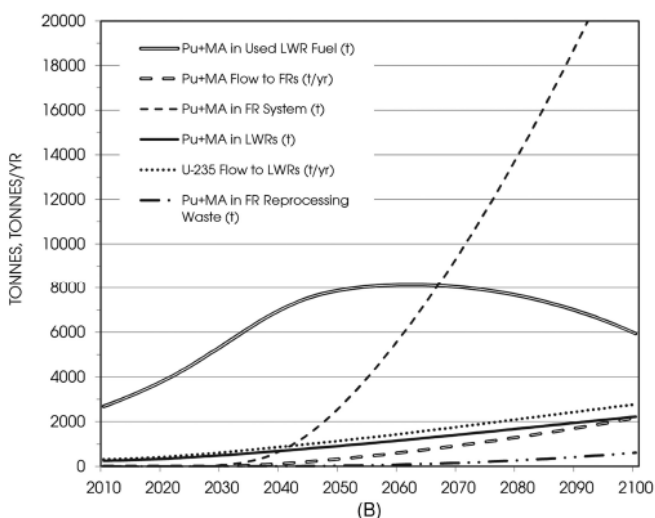
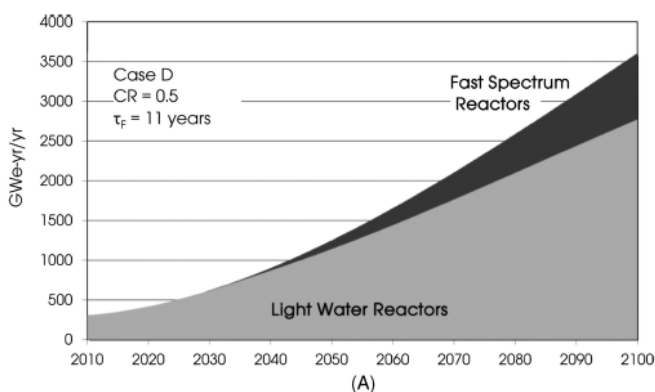


Рис. 8А и 8В. (А) Производство энергии и (В) запасы и потоки Pu + MA и U-235 при CR = 0,5 и $\tau_F = 11$ годам. В 2100 году запасы Pu + MA в системе РБН достигнут 24540 тонн. На горизонтальных осях рис. 8А и 8В отложены годы. На вертикальной оси рис. 8А показано производство энергии в ГВт(эл.)-год/год. Надписи на рисунке 8А (сверху вниз): 1 - вариант D; 2 - $\tau_F = 11$ годам; 3 - реакторы на быстрых нейтронах; 4 - легководные реакторы. На вертикальной оси рис. 8В показаны запасы (в тоннах) и потоки (в тоннах за год). Надписи на рисунке 8В (сверху вниз): 1 - Pu + MA в отработавшем топливе ЛВР (т); 2 - поток Pu + MA на РБН (т/год); 3 - Pu + MA в системе РБН (т); 4 - Pu + MA в ЛВР (т); 5 - поток U-235 на ЛВР (т/год); 6 - Pu + MA в переработанных отходах РБН (т).

С точки зрения отходов трансураниевых элементов все четыре варианта являются успешными. Это по существу вытекает из того факта, обсуждаемого в Приложениях 2 и 3, что на 1 ГВт(эл.)-год/год эксплуатации ЛВР образуется примерно 0,32 т трансураниевых отходов, в то время как 1 ГВт(эл.)-год/год эксплуатации РБН требует загрузки топлива в диапазоне 2 т трансураниевых элементов (извлеченных из отходов ЛВР или создаваемых РБН), но единственные трансураниевые отходы, которые нужно будет утилизировать, составляют 1 процент, или около 0,02 т, которые, как ожидается, будут потеряны на этапах переработки и изготовления, в предположении успешной разработки этих процессов. Это приводит примерно к 16-кратному сокращению трансураниевых отходов на ГВт(эл.)-год/год, произведенный в реакторе на быстрых нейтронах по сравнению с ЛВР. Как только реакторы на быстрых нейтронах перейдут на загрузку трансураниевого топлива из ЛВР, в этой модели ЛВР не будут производить своих собственных отходов (отметим, что количество трансураниевых элементов в ЛВР в 2100 году на рис. 5 - 8

менты из отработавшего ядерного топлива ЛВР и самих реакторов на быстрых нейтронах. Материал, преобразующийся в плутоний, является уран-238 из природного или даже обедненного урана. Это является очень благоприятным результатом. Вариант В оказывает некоторое влияние, и предположительно через длительное время может позволить исключить обогащение урана. Варианты С и D по своей структуре качественно не влияют на этот риск.

Наибольшее опасение в этих вариантах вызывает поток плутония и второстепенных актинидов, указанный в табл. 3. Вариант А, наиболее привлекательный с точки зрения разрешения других проблем, включает поставку топлива на реакторы на быстрых нейтронов в объеме 750 000 SQ плутония в год. Вариант D, с наименьшим объемом поставки топлива, соответствует 250 000 SQ плутония в год. В настоящее время стандартом МАГАТЭ для неопределенности в закрытии баланса материалов на заводе для переработки плутония^{89,90} является 1 процент. И снова величина имеет значение. Даже при усиленном мониторинге, наблюдении и сдерживании для обнаружения необычных операций или отвлечения материалов, неспособность учесть 1 процент от 500 000 SQ, или 5000 SQ в год, может создать нестабильную международную обстановку, в которой страны будут весьма обеспокоены действиями других стран и субнациональных групп, и будут ощущать необходимость предпринимать собственные предупредительные действия.

Смогут ли такие подходы разрешить проблему отвлечения в мире с такими большими запасами и потоками плутония и второстепенных актинидов? Из-за величины этих потоков для предотвращения национального отвлечения или хищения с помощью сотрудников, стандарты учета материалов на перерабатывающих заводах должны быть улучшены по крайней мере на два порядка величины. Это может оказаться невозможным. Фундаментальной проблемой альтернативного варианта интернационализации "конечного этапа" топливного цикла является то, что он требует - по определению - транспортировки как отработавшего, так и переработанного топлива. Каждый год должны будут перевозиться, пересекая международные границы, исключительно большие количества плутония, порядка 500 000 SQ в свежем топливе. Это, очевидно, создает свой собственный набор рисков отвлечения и хищения. Трансурановые элементы в топливе для быстрых реакторов не являются самозащитными⁹¹, и они могут быть быстро химически отделены и использованы для оружия, в отличие от урана-235 в топливе ЛВР, которое требует дальнейшего изотопного обогащения для военного использования.

Смогут ли такие подходы разрешить проблему выхода из обязательств по соглашениям о нераспространении? Это представляется по меньшей мере таким же проблематичным. Примем во внимание, что топливо для запуска реактора на быстрых нейтронах с производительностью 1 ГВт(эл.)-год/год требует приблизительно 8 т плутония, или 1000 SQ. В мире, где страны с ядерным оружием разоружаются до сотен единиц оружия у каждого, побуждение для использования этого топлива для военных целей может быть очень сильным, в особенности для страны или режима, которая ощущает себя под существующей угрозой, пусть даже от обычного оружия. Годовая заправка топливом для реактора на быстрых нейтронах намного больше, чем содержание плутония в ежегодных отходах от ЛВР, приблизительно 2 т (250 SQ) против 0,3 т (37 SQ) на ГВт(эл.)-год/год, и его переработка страной-владельцем будет даже легче и быстрее (1 - 3 недели против 1 - 3 месяцев для облученного топлива ЛВР), поскольку оно не будет обременено высоко радиоактивными продуктами деления⁹².

Риски распространения, связанные с реакторами на быстрых нейтронах, как понимается в настоящее время, представляются намного большими, чем те, которые связаны с ЛВР. Лицам, принимающим решения, потребуется балансировать между ними и уменьшением выбросов CO₂. Если учесть, что эти сценарии с РБН делают различие между общим сценарием на рис. 3 и сценарием с ЛВР, обсуждавшимся в конце раздела по ЛВР, то оцениваемое изменение долгосрочной равновесной глобальной усредненной температуры на поверхности при замене на электростанции на размельченном угле, равняется

0,2 - 0,45 °C, опять же при учете обсуждавшихся выше оговорок.

ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ

Энергия может быть получена от "слияния" тяжелых форм водорода с образованием (синтезом) гелия^{93,94}. Системы для синтеза содержат очень мало топлива, и производят очень мало топлива от распада, когда реакция синтеза заканчивается. Поэтому энергетические системы синтеза не могут подвергаться неконтролируемому росту мощности, что случилось в Чернобыле, и не могут расплавляться, как это произошло на Три-Майл Айленд и в Фукусиме. Не имеется существенных ограничений для поставок топлива, и ядерные отходы от синтеза не требуют геологического захоронения. Эти особенности вносят свой вклад в привлекательность энергетики синтеза.

В лабораторных экспериментах было продемонстрировано получение до 16 МВт в течение периодов порядка 1 секунды, что показало научную осуществимость производства энергии синтеза с использованием магнитных полей для удержания горячего топлива синтеза⁹⁵. На основании этих научных результатов в Кадараше, Франция, строится эксперимент ИТЭР в международной кооперации Китая, Европы, Индии, Японии, России, Южной Кореи и Соединенных Штатов. ИТЭР конструируется для получения сотен мегаватт тепловой энергии от синтеза в течение периодов до 1 часа, что демонстрирует техническую осуществимость энергии синтеза. В Соединенных Штатах скоро вступит в строй Национальная установка зажигания (НИФ), основной задачей которой является исследование физики усовершенствованного ядерного оружия для поддержки надзора за ядерным арсеналом США. У нее также есть задача продемонстрировать научную осуществимость производства энергии синтеза посредством "инерциального удержания", в котором инерция топлива для синтеза в миниатюрных термоядерных взрывах удерживает его так долго, как это нужно для производства энергии, превышающей направленную на мишень энергию лазера.

ИТЭР и НИФ представляют собой установки для исследования синтеза в масштабе электростанций синтеза. Это первые в своем роде установки, и они оказались очень дорогими, дороже, чем это планировалось первоначально. Критики обращают внимание на специфические технические проблемы, такие, как производство тритиевого топлива, или разработка устойчивых к нейтронам материалов⁹⁶ для которых существуют разрабатываемые решения⁹⁷. Однако, существует общепринятое опасение, что электростанции синтеза будут большими и сложными высокотехнологичными предприятиями, и в результате их экономическая практичность на данный момент не может быть гарантирована, несмотря на благоприятные прогнозы^{98,99}. Требуются весьма значительные исследования и разработка для того, чтобы превратить научную осуществимость в техническую осуществимость, позволяющую коммерциализацию к середине столетия^{100,101}. Несмотря на эти проблемы, многие страны из кооперации ИТЭР заявили, что они планируют середину столетия для коммерческого применения энергии синтеза.

На рис. 9 показан сценарий для применения энергии синтеза для коммерческого производства электроэнергии, начиная с середины столетия. Максимальная скорость роста производства энергии синтеза в этом сценарии составляет 0,86 процента в год от мирового рынка электроэнергетики, что меньше, чем скорость роста производства электроэнергии от деления ядер, которая равнялась в 1975 - 1990 годах 1,2 процента в год от рынка электроэнергии того времени. В этом сценарии для ЛВР было добыто 15,8 Мт урана, равное полным запасам по прогнозу МАГАТЭ и Агентства по ядерной энергии.

Синтез обладает значительными преимуществами по нераспространению по отношению к делению ядер¹⁰². Хотя энергичные нейтроны от синтеза могут быть использованы для трансмутации урана-238 в плутоний-239, или тория-232 в уран-233, это очень легко обнаружить или даже предотвратить. Системы синтеза будут достаточно легко обнаруживаемыми из-за своего размера, использования энергии и выбросов, так что тайное использование небольшой установки синтеза для производства оружей-

ных материалов не будет реальной угрозой. Более того, при нормальной работе на электростанции синтеза не будет урана, тория, плутония или продуктов деления поблизости от производящего нейтроны топлива. Их обнаружение на очень малых уровнях является простым, так что скрытое производство и отвлечение этих материалов на объявленную и находящейся под гарантиями установке не будет серьезным риском.

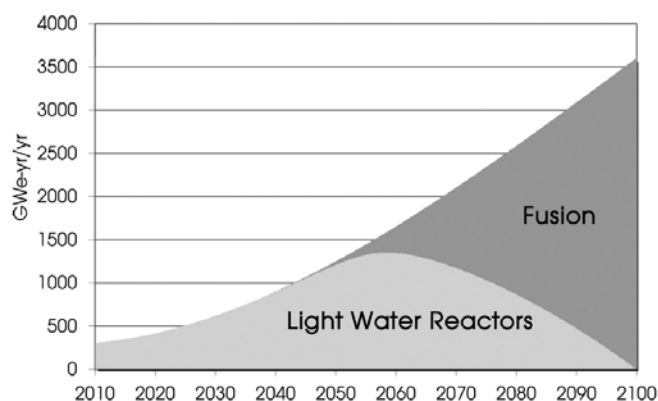


Рис. 9. Производство атомной энергии на легководных реакторах с переходом к синтезу. По горизонтальной оси отложены годы, по вертикальной оси - производство электроэнергии в ГВт(эл.)-год/год. Надписи на рисунке (сверху вниз): 1 - синтез; 2 - легководные реакторы.

Сценарий выхода из обязательств для синтеза качественно отличен от деления. Во время выхода из обязательств оператор электростанции синтеза не будет иметь никаких расщепляющихся материалов. Его угроза состоит в начале производства таких материалов. Это следует сравнить с ситуацией реакторов деления на быстрых нейтронах, в которой на станции производительностью в 1 ГВт(эл.)-год/год в любое время будет находиться около 2 т (250 SQ) плутония для ежегодной заправки топливом. Более того, будет просто предотвратить производство расщепляющегося материала на электростанции синтеза, которая была выведена из режима гарантий, например, разрушением башни охлаждения, системы снабжения электроэнергией, или криогенной установки, ни одна из которых не несет угрозы радиоактивного загрязнения. Это представляет сильный контраст со сценарием выхода из обязательств для деления, где оружейный материал уже присутствует в стране-владельце, и только воздушная бомбардировка со значительным риском распространения радиоактивности или вторжение сможет предотвратить его использование.

Энергетические системы синтеза создают и впоследствии потребляют значительное количество самого тяжелого изотопа водорода, трития, который недоступен в природе. Если тритий будет скрыто отвлекаться из системы синтеза, то он может быть использован продвинутой распространяющей страной для увеличения мощности взрывных устройств деления, включая первичные компоненты термоядерного оружия. Тайное производство трития с использованием синтеза не является реалистичным опасением, но в системах синтеза могут находиться запасы трития в несколько килограммов, которые станут доступными в сценарии выхода из обязательств. Однако тритий сам по себе не предоставляет доступа к возможности обладания ядерным оружием, что объясняет, почему тритий не контролируется по Договору о нераспространении. Некоторые, однако, выступают за такой контроль¹⁰³ для сокращения производства трития в странах с ядерным оружием и для ограничения доступа к тритию в продвинутых распространяющих странах.

Планы производства трития для поддержания запасов трития в США показывают, что одиночный реактор деления коммерческого масштаба может производить достаточно трития (около 1,5 кг в год) для того, чтобы бесконечно долго поддерживать арсенал США¹⁰⁴. Продвинутой распространяющей страной может поэтому построить и поддерживать большой арсенал оружия, около 10 процентов от арсенала США в терминах запасов трития, используя один реактор деления весьма скромных

размеров. Тот же самый реактор может использоваться для производства плутония для оружия. Разработка оружия с ускорением тритием требует ядерных испытаний¹⁰⁵, и поэтому выхода из Договора по нераспространению до создания арсенала. Поэтому производство трития для снабжения ускоренного оружия, например, как части региональной гонки вооружений, не потребует скрытого отвлечения от объявленной установки для синтеза. Маловероятно, чтобы такое наращивание было ограничено доступом к тритию. При таких обстоятельствах преимущество скрытого доступа к тритию от энергетических систем синтеза, или через сценарий выхода из обязательств по синтезу, вероятно, будет скромным.

Научный базис для синтеза инерциального удержания перекрывается с базисом для усовершенствованного ядерного оружия, так что исследования и разработки, и последующее развертывание энергетических систем синтеза, основанных на такой технологии, может представлять риск распространения чувствительной информации распространяющим странам с продвинутыми возможностями. Такие риски следует исследовать прямо и прозрачно, так же как и средства для минимизации распространения такой информации¹⁰⁶.

В итоге, риски распространения для энергетических систем синтеза являются качественно меньшими, чем те, которые связаны с обсуждавшимися здесь энергетическими системами деления. Однако, поддержание этого низкого уровня риска требует реализации международных гарантий. Следует рассмотреть расширение этих гарантий для включения учета трития на системах как деления, так и синтеза.

ГИБРИДНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СИНТЕЗА И ДЕЛЕНИЯ

В сценарии на рис. 9 без дальнейшей переработки отработавшего ядерного топлива ЛВР во всем мире останутся 27 000 т трансурановых элементов и связанных продуктов деления, что потребует геологических хранилищ с емкостью, приблизительно в 27 раз превышающей предлагаемый статутный предел Юкка Маунтин.

Для трансмутации, эффективно для сжигания трансурановых элементов предлагалось использовать для разгона подкритических реакторов деления нейтронные источники от ускорителей. Системы деления также могут производить нейтроны, в принципе с гораздо меньшей затратой энергии, чем у ускорителей, так что были приняты исследования для изучения этого варианта¹⁰⁷. Здесь рассматривается одна из наиболее разработанных концепций¹⁰⁸, базирующаяся на подкритическом реакторе на быстрых нейтронах, разгоняемом нейтронами синтеза и сжигающим оставшиеся трансурановые элементы от ЛВР (см. Приложение 4 в Интернете). На рис. 10 показаны запасы и потоки трансурановых элементов, связанные с этой концепцией, в приложении к сценарию на рис. 9. Для простоты предполагалось, что постоянная доля всех номинальных систем синтеза будет гибридными сжигателями синтеза и деления для трансурановых элементов. Для того, чтобы к концу столетия ввести в процесс все трансурановые элементы отработавшего топлива ЛВР во всем мире, потребуется, чтобы эта доля составляла 9,9 процента.

Этот сценарий разделяет основные риски распространения сценариев с реакторами на быстрых нейтронах: большие запасы и потоки плутония и второстепенных актинидов. Преимуществом этого варианта является то, что сжигаются трансурановые элементы из первоначального набора ЛВР, и не производится никаких дополнительных трансурановых элементов. После 2100 года как запасы, так и потоки трансурановых элементов уменьшаются в 2 раза каждые 30,6 лет, вместо того, чтобы расти с расширением атомной энергетики. Также в этом сценарии только 1 из 10 электростанций будет сжигать трансурановые элементы, так что они предположительно будут менее распространены, чем реакторы на быстрых нейтронах с CR = 0,5, которые составляют примерно 39 процентов от стационарной системы, в которой они сжигают отходы от ЛВР. Если будет разработана технология для того, чтобы выбрать сценарий на рис. 10 в качестве варианта, потребуется решение для того, чтобы определить, является ли такой вариант более

безопасным, с точки зрения распространения, чем размещение отработавшего ядерного топлива ЛВР в геологических хранилищах.

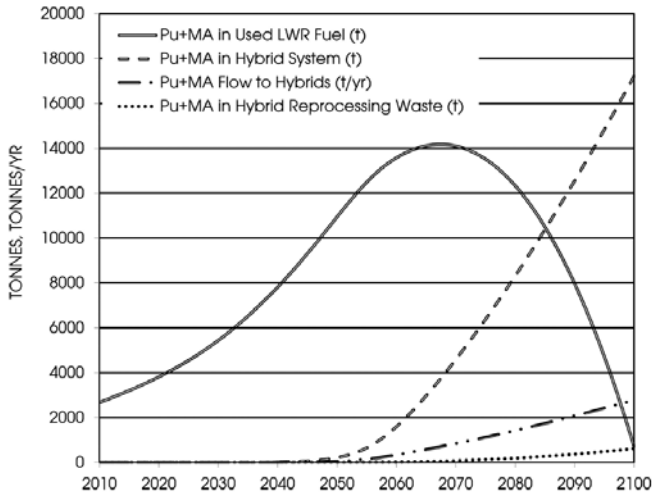


Рис. 10. Запасы и потоки Pu + МА в гибридном случае деления и синтеза. На горизонтальной оси рис. 10 отложены годы. На вертикальной оси рис. 10 показаны запасы (в тоннах) и потоки (в тоннах за год). Надписи на рисунке 10 (сверху вниз): 1 - Pu + МА в отработавшем топливе ЛВР (т); 2 - Pu + МА в гибридной системе (т); 3 - поток Pu + МА в гибридную систему (т/год); 4 - Pu + МА в гибридных переработанных отходах (т).

В принципе, гибриды синтеза и деления могут играть приблизительно ту же самую роль, что реакторы на быстрых нейтронах в сценариях с $CR = 0,5$, показанных на рис. 7 и 8, с меньшей долей мощности от реакторов-сжигателей, 22% вместо 39% (Приложение 4 в Интернете), но без качественного преимущества по распространению.

ВЫВОДЫ

Атомная энергия может потребоваться для предоставления приблизительно 30 процентов от мирового производства электроэнергии, 3600 ГВт(эл.)/год/год, хотя в этой оценке имеются значительные неопределенности. Этот уровень мощности может быть достигнут в комбинации легководных реакторов, реакторов на быстрых нейтронах, и, потенциально, синтеза. Однако, величина предприятия является большой, соответствующей 12-кратному увеличению производства атомной электроэнергии по сравнению с 2010 годом. Очень большой масштаб и связанное с ним расширение диапазона стран, использующих атомную энергию, приносят с собой серьезные риски распространения.

Если профиль атомной энергетики, показанный на рис. 2, будет заменен станциями на размельченном угле без захвата и хранения углерода, то дополнительная равновесная усредненная по всему миру температура поверхности поднимется на 0,43 - 0,92 °C. Альтернативно, если потенциальные пределы других источников электроэнергии с низкими выбросами углерода, обсуждающиеся здесь, окажутся мягкими, то будет возможно заменить атомную энергию, потенциально ранее или позднее, на другие источники с низкими выбросами углерода, хотя, вероятно, по более высокой для мировой экономики цене.

Когда будет делаться выбор о будущей мировой энергетической экономике, то лицам, принимающим решения, потребуется сбалансировать риски распространения от атомной энергии с ее уменьшением выбросов CO_2 . Легководные реакторы несут значительные риски, связанные со скрытым обогащением и выходом объявленных обогатительных предприятий из-под гарантий, так же как и выходом из-под гарантий предприятий по хранению отработавшего ядерного топлива. Предлагались институциональные мероприятия для управления этими рисками, но их будет трудно осуществить. Реакторы де-

ления на быстрых нейтронах несут существенно больший риск из-за исключительно больших наземных запасов и потоков пригодного для оружия материала и трудности высокоточного учета на перерабатывающих предприятиях. Активно используемые наземные запасы сравнимы по величине с теми, которые находятся на хранении в варианте с одним ЛВР. Это приводит к сомнениям как насчет скрытого отвлечения, так и по выходу из обязательств. Эти риски представляются более сопротивляющимися управлению. Например, использование международных центров переработки, с необходимостью несет с собой большую транспортировку через границы пригодного для оружия материала. Для того, чтобы играть роль в сокращении обсуждаемых здесь выбросов углерода в атмосферу, объем заправки реакторов на быстрых нейтронах в 2100 году будет достаточен для изготовления примерно 500 000 ядерных боеприпасов в год. Риск доступности расщепляющихся материалов от синтеза связан только с эксплуатацией после выхода из обязательств, которые могут быть предотвращены, и поэтому представляется наиболее управляемым.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. R. H. Williams and H. A. Feiveson, "Diversion-Resistance Criteria for Future Nuclear Power," *Energy Policy* July/August (1990): 543.
2. H. Feiveson, Nuclear Proliferation and Diversion, *Elsevier Encyclopedia of Energy 4* (Amsterdam: Elsevier, Acad. Press, 2004).
3. E. Schneider and W. C. Sailor, "Nuclear Fission," *Science & Global Security* 14 (2006): 183.
4. H. Feiveson, A. Glaser, M. Miller, and L. Scheinman, "Can Future Nuclear Power Be Made Proliferation Resistant?" CISSM Working Paper, Center for International and Security Studies at Maryland, University of Maryland (July 2008).
5. R. H. Socolow and A. Glaser, "Balancing Risks: Nuclear Energy & Climate Change," *Daedalus*, Fall (2009).
6. A. Feiveson, Civilian Nuclear Power in a Nuclear-Weapon-Free World, in B. M. Blechman and A. K. Bollfrass, *Elements of a Nuclear Disarmament Treaty* (Washington, D.C.: Henry L. Stimson Center, 2010).
7. J. Edmonds, T. Wilson, M. Wise, and J. Weynant, "Electrification of the Economy and CO_2 Emissions Mitigation," *Environmental Economics and Policy Studies* 7 (2006): 175.
8. L. Clarke, J. Edmonds, V. Krey, R. Richels, S. Rose, and M. Tavoni, "International Climate Policy Architectures: Overview of the EMF 22 International Scenarios," *Energy Economics* 31 (2009): S64.
9. Представляется, что в одной модели была неправильная калибровка, и в результате производство электроэнергии в 2000 году было занижено более, чем в три раза, и она не была учтена (доступ 7 декабря 2009 года).
10. J. B. Blanford, R. G. Richels, and T. E. Rutherford, "Feasible Climate Targets: The Roles of Economic Growth, Coalition Development and Expectations," *Energy Economics* 31 (2009): S82.
11. K. Calvin, J. Edmonds, B. Bond-Lamberty, L. Clarke, S. H. Kim, P. Kyle, S. J. Smith, A. Thomson, and M. Wise, "Limiting Climate Change to 450 ppm CO_2 Equivalent in the 21st Century," *Energy Economics* 31 (2009): S107.
12. K. Calvin, P. Patel, A. Fawcett, L. Clarke, K. Fisher-Vanden, J. Edmonds, S. H. Kim, R. Sands, and M. Wise, "The Distribution and Magnitude of Emissions Mitigation Costs in Climate Stabilization under Less Than Perfect International Cooperation: SGM Results," *Energy Economics* 31 (2009): S187.
13. A. Gurney, H. Ahammad, and M. Ford, "The Economics of Greenhouse Gas Mitigation: Insights from Illustrative Global Abatement Modelling," *Energy Economics* 31 (2009): S174.
14. V. Krey and K. Riahi, "Implications of Delayed Participation and Technology Failure for the Feasibility, Costs, and Likelihood of Staying Below Temperature Targets—Greenhouse Gas Mitigation Scenarios for the 21st Century," *Energy Economics* 31 (2009): S94.
15. R. Loulou, M. Labriet, and A. Kanudia, "Deterministics and Stochastic Analysis of Alternative Climate Targets under

- Differentiated Cooperation Regimes," *Energy Economics* 31 (2009): S131.
16. P. Russ and T. van Ierland, "Insights on Different Participation Schemes to Meet Climate Goals," *Energy Economics* 31 (2009): S163.
17. J. van Vliet, M. G. J. den Elzen, and D. P. van Vuuren, "Meeting Radiative Forcing Targets under Delayed Participation," *Energy Economics* 31 (2009): S152.
18. S. H. Kim and J. Edmonds, "The Challenges and Potential of Nuclear Energy for Addressing Climate Change," Pacific Northwest National Laboratory, PNNL-17037 (2007).
19. S. H. Kim and J. Edmonds, "The Potential of Nuclear Energy for Addressing Climate Change," GNEP-SYSA-PMO-MI-DV-2008-000179 (2008).
20. Модель MiniCam теперь переименована в GCAM, <http://www.globalchange.umd.edu/models/minicam/>.
21. Электроэнергетический эквивалент ядерного производства водорода включается в эту общую величину в очень немногих моделях. Даже в этих случаях вклад невелик по сравнению с производством электроэнергии на атомных станциях; частное сообщение, L. E. Clarke, 2010.
22. Intergovernmental Panel on Climate Change, World Meteorological Organization, and United Nations Environment Programme, "IPCC special report on carbon dioxide capture and storage final draft," WMO; United Nations Environment Programme, <http://www.ipcc.ch/activity/srccs/index.htm>.
23. Отметим, что "Мт" в этой статье обозначает миллионы метрических тонн, что не следует путать с "MT," которое часто используется в американской литературе по ядерному делению для обозначения метрических тонн. Здесь "Гт" обозначает миллиарды (10^9) метрических тонн.
24. Используя модель трех резервуаров в электронной таблице RICE-99, http://www.econ.yale.edu/%7EEnordhaus/homepage/dice_section_V.html (доступ 25 января 2010 года).
25. Intergovernmental Panel on Climate Change, *Fourth Assessment Report: Climate Change 2007: Synthesis Report: Summary for Policymakers* (2007).
26. См. ссылку [24].
27. L. Clarke, P. Kyle, and M. Wise et al., "CO₂ Emissions Mitigation and Technological Advance: An Analysis of Advanced Technology Scenarios (Scenarios Updated January 2009)," Pacific Northwest National Laboratory, PNNL-18075 (2008).
28. Приложение в Интернете можно найти по адресу <http://www.princeton.edu/srccs/publications/srccs/archive>.
29. См. ссылку [21].
30. Massachusetts Institute of Technology, "The Future of Coal," (2007).
31. R. H. Socolow, "Can We Bury Global Warming?" *Scientific American* July (2005): 33–40.
32. См. ссылку [21].
33. См. ссылку [30].
34. Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate Change 2007 Mitigation of Climate Change: Working Group III Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC* (Cambridge: Cambridge University Press, 2007).
35. См. ссылку [21].
36. См. ссылку [24].
37. Massachusetts Institute of Technology, "The Future of Geothermal Energy," (2006).
38. J. Traube, L. Hansen, B. Palmintier, and J. Levine, "Spatial and Temporal Interactions of Wind and Solar in the Next Generation Utility," Presented at WINDPOWER 2008 Conference and Exhibition, Houston, Texas (3 June 2008).
39. U.S. Department of Energy, "20% Wind Energy by 2030: Increasing Wind Energy's Contribution to U.S. Electricity Supply," DOE/GO-102008-3567 (July 2008).
40. A. Reeves and F. Beck, "Wind Energy for Electric Power," Renewable Energy Policy Project (July 2003).
41. См. ссылку [26].
42. DESERTEC Foundation, <http://www.desertec.org>.
43. International Atomic Energy Agency, 2005b. Thorium Fuel cycle—Potential Benefits and Challenges, IAEA-TECDOC-1450 (May 2005).
44. См. ссылку [2].
45. См. ссылку [4].
46. Там же.
47. OECD Nuclear Energy Agency, and International Atomic Energy Agency, *Uranium 2007: Resources, Production and Demand* (Paris: Nuclear Energy Agency, 2008).
48. OECD Nuclear Energy Agency, and International Atomic Energy Agency, *Forty Years of Uranium Resources, Production and Demand in Perspective: "The Red Book Retrospective"* (Paris: OECD, 2006).
49. K. S. Deffeyes and L. D. MacGregor, "World Uranium Resources," *Scientific American* January (1980): 66.
50. E. A. Schneider and W. C. Sailor, "Long-Term Uranium Supply Estimates," *Nuclear Technology* 162 (2008): 379.
51. N. Seko, A. Katakai, S. Hasegawa, M. Tamada, N. Kasai, H. Takeda, T. Sugo, and K. Saito, "Aquaculture of Uranium in Seawater by a Fabric-adsorbent Submerged System," *Nuclear Technology* 144 (2003): 274.
52. D. Albright and L. Barbour, "Separated Neptunium 237 and Americium," in *The Challenges of Fissile Material Control*, D. Albright and K. O'Neill, eds., Institute of Science and International Security Reports (1999).
53. Gen IV International Forum, The Proliferation Resistance and Physical Protection Evaluation Methodology Expert Group of the Generation IV International Forum, "Methodology for Proliferation Resistance and Physical Protection, Generation IV Nuclear Energy Systems," GIF/PRPPWF/2006/005 (2006).
54. Перечень 61 страны: Албания, Алжир, Австралия, Азербайджан, Бангладеш, Беларусь, Чили, Эквадор, Египет, Эстония, Грузия, Гана, страны Персидского залива, Индонезия, Иран, Ирландия, Израиль, Италия, Иордания, Казахстан, Латвия, Ливия, Малайзия, Монголия, Марокко, Намибия, Новая Зеландия, Нигерия, Норвегия, Филиппины, Польша, Португалия, Сирия, Таиланд, Тунис, Турция, Уганда, Венесуэла, Вьетнам и Йемен.
55. International Atomic Energy Agency, "International Status and Prospects of Nuclear Power, Report by the Director General," GOV/INF/2010/12-GC(54)/INF/5 (2 September 2010).
56. International Atomic Energy Agency, *IAEA Safeguards Glossary*, International Nuclear Verification Series, No. 3, 2001 Edition (Vienna: IAEA, 2002) 19.
57. Плутоний "реакторного качества", который образуется в ЛВР в виде смеси изотопов плутония, рассматривается МАГАТЭ как являющийся пригодным для производства ядерных взрывных устройств. Из этого исключены только смеси, содержащие более 80 процентов плутония-238, и поскольку плутоний в основном образуется и преобразуется нейтронным захватом, начиная с урана-238, в ядерном топливном цикле присутствует лишь малое количество плутония-238.
58. M. Benedict, T. Pigford, and H. W. Levi, *Nuclear Chemical Engineering* (New York: McGraw-Hill, 1981) 667.
59. V. Gilinsky, M. Miller, and H. Hubbard, "A Fresh Examination of the Proliferation Dangers of Light Water Reactors," The Nonproliferation Policy Education Center (2004).
60. A. Glaser, "Characteristics of Gas Centrifuges for Uranium Enrichment and Their Relevance for Nuclear Weapon Proliferation," *Science & Global Security* 16 (2008): 1.
61. См. ссылку [59].
62. См. ссылку [5].
63. A. Glaser, "The Civilian Nuclear Fuel Cycle in a Nuclear-Weapon-Free World: Challenges and Opportunities," in B. M. Blechman, and A. K. Bollfrass, *Elements of a Nuclear Disarmament Treaty* (Washington, D.C.: Henry L. Stimson Center, 2010).
64. См. ссылку [56], p. 43.
65. R. Bari, "Framework for Proliferation Resistance and Physical Protection for Nonproliferation Impact Assessments," Brookhaven National Laboratory Formal Report, BNL-80083 (March 2008).
66. См. ссылку [53].
67. National Nuclear Security Administration, Office of Nonproliferation and International Security, "Draft Nonproliferation Impact Assessment for the Global Nuclear Energy Partnership Programmatic Alternatives," (December 2008).
68. J. C. Mark, "Explosive Properties of Reactor-Grade Plutonium," *Science & Global Security* 4 (1993): 111.
69. См. ссылку [67].
70. R. L. Garwin, "Reactor-Grade Plutonium Can be Used to Make Powerful and Reliable Nuclear Weapons: Separated Plutonium in the Fuel Cycle Must be Protected as if it Were

- Nuclear Weapons." The Garwin Archive, Federation of American Scientists (26 August 1998).
71. См. ссылку [59].
72. U.S. Department of Energy, *Final Nonproliferation and Arms Control Assessment of Weapons-usable Fissile Material Storage and Excess Plutonium Disposition Alternatives* (Washington, DC: U.S. Dept. of Energy, Office of Arms Control and Nonproliferation, 1987).
73. L. V. Sigal and J. Wit, "North Korea's Perspectives on the Global Elimination of Nuclear Weapons," in B. Blechman, *Unblocking the Road to Zero* (Washington, D.C.: Henry L. Stimson Center, 2009).
74. A. Ehteshami, "Iranian Perspectives on the Global Elimination of Nuclear Weapons," in B. Blechman, *Unblocking the Road to Zero*, (Washington, D.C.: Henry L. Stimson Center, 2009).
75. U.S. Department of Energy, Office of Nuclear Energy, Office of Fuel Cycle Management, "Global Nuclear Energy Partnership Strategic Plan," GNEP-167312 (December 2006) <http://www.westgov.org/wieb/meetings/hlwsprg2007/briefing/GNEPspan.pdf>.
76. International Atomic Energy Agency, "Multilateral Approaches to the Nuclear Fuel Cycle: Expert Group Report Submitted to the Director General of the International Atomic Energy Agency," INFCIRC 640 (22 February 2005).
77. Максимальная потеря энергии ΔE_n в упругом столкновении нейтрона с ядром в охладителе определяется уравнением $\Delta E_n/E_n = 4A/(A+1)^2$, где A - атомный номер ядра мишени. Для $A \gg 1$ эта величина становится малой. Водород в воде является весьма эффективным в уменьшении энергии нейтрона.
78. Massachusetts Institute of Technology, "The Future of the Nuclear Fuel Cycle, Summary Report," (2010).
79. Generation IV International Forum, (2009), <http://www.gen-4.org>.
80. S. M. Piet, B. W. Dixon, J. J. Jacobson, G. E. Matthern, and D. E. Shropshire, "Lessons Learned from Dynamic Simulations of Advanced Fuel Cycles," Proceedings of Global 2009, The Nuclear Fuel Cycle: Sustainable Options and Industrial Perspectives, Paris, France (6–11 September 2009).
81. E. A. Hoffman, W. S. Yang, and R. N. Hill, "Preliminary Core Design Studies for the Advanced Burner Reactor over a Wide Range of Conversion Ratios," Argonne National Laboratory, ANL-AFCI-177 (29 September 2006).
82. U.S. Department of Energy, Office of Nuclear Energy, Science, and Technology, "Report to Congress—Advanced Fuel Cycle Initiative: Objectives, Approach, and Technology Summary" (May 2005).
83. B. Dixon, B. Halsey, S. Kim, G. Matthern, S. Piet, and D. Shropshire, "Dynamic Systems Analysis Report for Nuclear Fuel Recycle," Idaho National Laboratory, AFCISYSA-AI-SS-RT-2009-000053 (December 2008).
84. См. ссылку [80].
85. R. A. Wigeland, T. H. Bauer, T. H. Fanning, and E. E. Morris, "Separations and Transmutation Criteria to Improve Utilization of a Geologic Repository," *Nuclear Technology* 154 (2006): 95.
86. International Atomic Energy Agency, *Scientific and Technical Basis for Geological Disposal of Radioactive Wastes* (Vienna: International Atomic Energy Agency, 2003), 6.
87. S. Piet, T. Bjornard, B. Dixon, D. Gombert, C. Laws, and G. Matthern, "Which Elements Should be Recycled for a Comprehensive Fuel Cycle?" Proceedings of Global 2007 Advanced Nuclear Fuel Cycle and Systems, Boise, Idaho (9–13 September 2007).
88. См. ссылку [80].
89. См. ссылку [86].
90. International Panel on Fissile Materials, *Global Fissile Material Report 2009*, Princeton, N.J. (2009).
91. J. Kang and F. von Hippel "Limited Proliferation-Resistance Benefits from Recycling Unseparated Transuranics and Lanthanides from Light-Water Reactor Spent Fuel," *Science & Global Security* 13 (2005): 169.
92. См. ссылку [56], p. 43.
93. W. J. Nutall, "Fusion as an Energy Source: Challenges and Opportunities." Institute of Physics Report, (September 2008).
94. F. von Hippel and R. J. Goldston, *Nuclear Energy, Fusion in Global Energy Assessment*, International Institute for Applied Systems Analysis, in press.
95. R. J. Hawryluk, "Review of DT Experiments Relevant to Burning Plasma Issues," *Journal of Plasma Fusion Research SERIES 5* (2002): 12.
96. M. Moyer, "Fusion's False Dawn," *Scientific American* March (2010): 52.
97. R. Hazeltine, M. Porkolab, S. Prager, and R. Stambaugh, "Letter to the Editor," *Scientific American* July (2010).
98. D. Maisonnier, I. Cook, P. Sardain, L. Boccaccini, E. Bogusch, K. Brodin, L. Di Pace, R. Forrest, G. Luciano, S. Hermsmeyer, C. Nardi, P. Norajitra, A. Pizzuto, N. Taylor, and D. Ward, "The European Power Plant Conceptual Study," *Fusion Engineering and Design* 75–79 (2005): 1173.
99. F. Najmabadi and the ARIES Team, "The ARIES-AT Advanced Tokamak, Advanced Technology Fusion Power Plant," *Fusion Engineering and Design* 80 (2006): 3.
100. Fusion Energy Sciences Advisory Committee, "A Plan for the Development of Fusion Energy, Final Report to FESAC" (March 2003).
101. U.S. Burning Plasma Organization, "Research Needs for Magnetic Fusion Energy Sciences, Report of the Research Needs Workshop (ReNeW)," Bethesda, Maryland (8–12 June 2009).
102. R. J. Goldston, A. Glaser, and A. F. Ross, "Proliferation Risks of Fusion Energy: Clandestine Production, Covert Production, and Breakout," 9th IAEA Technical Meeting on Fusion Power Plant Safety, Vienna, Austria (15–17 July 2009).
103. M. B. Kalinowski and L. C. Colschen, "International Control of Tritium to Prevent Horizontal Proliferation and to Foster Nuclear Disarmament," *Science and Global Security* 5 (1995): 131.
104. R. E. Rowberg, Congressional Research Service Report for Congress, "The Department of Energy's Tritium Production Program," RL30425 (8 November 2001).
105. U.S. Energy Department, "The National Ignition Facility (NIF) and the Issue of Nonproliferation" U.S. Energy Department Office of Arms Control and Nonproliferation, DOE/NN-96007377 (19 December 1995), <http://www.osti.gov/news/docs/nif/front.htm>.
106. R. J. Goldston and A. Glaser, "Inertial Confinement Fusion Energy R&D and Nuclear Proliferation: The Need for Direct and Transparent Review," *Bulletin of the Atomic Scientists*, 87 (2011):59.
107. J. Freidberg and P. Finck, "Research Needs for Fusion-Fission Hybrids, Report of the Research Needs Workshop (ReNeW)," (30 January 2010), <http://web.mit.edu/fusion-fission/>.
108. W. M. Stacey, "Georgia Tech Studies of Sub-Critical Advanced Burner Reactors with a D-T Fusion Tokamak Neutron Source for the Transmutation of Spent Nuclear Fuel," *Journal of Fusion Energy* 28 (2009): 328.