

ЯДЕРНОЕ ДЕЛЕНИЕ

Эрик Шнайдер и Уильям К. Сэйлор

Приводится оценка потенциальной роли ядерного деления для удовлетворения возрастающих потребностей будущей энергетики при уменьшении выбросов парниковых газов и контроле над ядерным распространением. Использован прогноз Всемирного энергетического совета по поводу будущего мира, живущего по законам сохранения окружающей среды, где предсказывается развертывание к 2100 году ядерной энергетики с мощностью около 3 ТВт(э) наряду с сокращением глобальных выбросов CO₂ до одной трети от текущего уровня. Мы моделируем три сценария, основанных на этих предположениях и полагающихся на развивающиеся и перспективные системы реакторов. Сценарии различаются только выбором одного из трех топливных циклов: однократный, преобразование и воспроизводство. Мы показываем, что стоимость ядерной энергетики, скорее всего, останется минимальной при использовании однократного топливного цикла, который, как мы утверждаем, приводит также к минимуму риска распространения. Остальные два топливных цикла обладают преимуществом уменьшения производства отходов и увеличения использования урановых ресурсов. Но эти преимущества используются только за цену, которая кажется неприемлемой, если стоимость ядерных хранилищ заметно не вырастет или если затраты на сооружение перспективных реакторов для преобразования или воспроизводства можно будет заметно сократить ниже уровня затрат на создание новых установок с современной технологией. Обсуждается важность учетных ставок при выделении ресурсов для продвинутых ядерных технологий. Подчеркивается связь между выбором топливного цикла и международным режимом нераспространения.

Э.Шнайдер работает в Техасском университете (Остин), Остин, Техас, США.

У. К. Сэйлор – сотрудник Лос Аламосской национальной лаборатории, Лос Аламос, Нью Мехико, США.

Авторы признательны за полезные комментарии шести рецензентам, в том числе Ричарду Гарвину и Халу Фейвесону, а также четырем остальным, пожелавшим остаться анонимными. Эта работа опубликована в материалах Лос Аламоса: LA-UR-03-8526.

Статья получена редакцией 31 августа 2005 года и принята к опубликованию 20 апреля 2006 года.

Почтовый адрес для корреспонденций: Erich Schneider, The University of Texas at Austin, 1 University Station C2200, Austin, TX 78712, USA. E-mail: eschneider@mail.utexas.edu .

ВВЕДЕНИЕ

Ядерные боеприпасы террористов или специальные ядерные материалы могут перевозиться в грузовых контейнерах, и их обнаружение является предметом серьезного беспокойства. Если специальным ядерным материалом будет плутоний, то его компонента ²⁴⁰Pu является значительным источником нейтронов спонтанного деления, в зависимости от количества плутония и его изотопного состава. Эти нейтроны спонтанного деления могут быть обнаружимыми.

Если Рамочная конвенция по изменению климата (РКИК)¹ при ООН завершится в конечном итоге удачно, это должно будет привести к международному, свободному от углерода режиму, где появляется возможность перехода к источникам снабжения энергией, которые

¹ Более подробную информацию о РКИК можно найти по адресу www.unfccc.org.

не выделяют CO₂^{2,3,4} Среди стран-участниц РКИК две обладают наименьшими выбросами оксида углерода в пересчете на единицу валового национального продукта – это Япония и Франция, которые также имеют самую большую привязанность к ядерной энергии. В то время как «развитый» мир сейчас является самым крупным источником выбросов CO₂, имеет самый высокий экономический рост и поэтому самые крупные потребности в энергии, в новом столетии, как ожидается, это произойдет в развивающихся странах (например, в Индии и Китае). Международное поощрение роста свободной от углерода энергии в этих странах поведет за собой субсидирование для сведения к минимуму воздействия затрат на самые бедные страны.

Деление ядер можно будет использовать (теоретически), чтобы избежать всех увеличений атмосферного CO₂ в течение текущего столетия^{5,6,7,8,9,10,11,12,13}.

Впрочем, в рамках существующего режима, основанного на Договоре о нераспространении и на его условиях о гарантиях, ядерная энергия может расширяться в некоторых странах и не расширяться в остальных. Например, США, Франция и Япония смогут использовать ядерную энергию для сокращения своих выбросов углерода. Такая система может работать в интересах стран, у которых уже имеется продвинутая ядерная инфраструктура, но ее распространение ограничено. Рост ядерной энергии окажется столь незначительным, что практически во всем мире сохранится полностью проблема сокращения углеродных выбросов.

Ядерная энергия сможет сыграть значительную роль в сокращении выбросов парниковых газов только при включении ее в будущие соглашения РКИК, которое можно организовать так, чтобы усилить РКИК, режим нераспространения и международные стандарты ядерной безопасности.

Со стороны развивающегося мира РКИК имеет много недостатков¹⁴. Но субсидирование ядерной энергии может стать побуждающим стимулом для развивающихся стран, чтобы присоединиться к такому режиму, если у них есть интерес к ядерной энергии (таким случаем может стать Индия). Но наступит всеобщее разочарование ядерной энергией в случае инцидента, причиной которого может быть плохое управление в сочетании с выбором неудачной

² M. Hoffert et al., “Advanced Technology Paths to Global Climate Stability: Energy for a Greenhouse Planet.” *Science*, 298(November 1, 2002): 981-987.

³ D. Bodansky, *Nuclear Energy: Principles, Practices and Prospects*, 2nd ed. (Springer-Verlag, New York, 2004).

⁴ S. Fetter, “Climate Change and the Transformation of World Energy Supply.” Center for International Security and Cooperation, Stanford University, 1999.

⁵ J. Deutch and E. Moniz et al., “The Future of Nuclear Power.” Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 2003, web.mit.edu/nuclearpower.

⁶ A. M. Weinberg, “Some Necessary Conditions for the Rebirth of Nuclear Energy.” *Nuclear News*, American Nuclear Society (November 2000), 47.

⁷ W. C. Sailor, D. Budansky, C. Brown, S. Fetter, and B. van der Zwaan, “A Nuclear Solution in Climate Change?” *Science*, May 19, 2000.

⁸ R. L. Garwin and G. Charpak, *Megawatts and Megatons: A Turning Point in The Nuclear Age?* (Knopf, New York, 2001).

⁹ R. Rhodes and D. Beller, “The Need for Nuclear Power.” *Foreign Affairs* (January-February 2000), www.foreignaffairs.org.

¹⁰ Peter W. Beck, “Nuclear Energy in the Twenty-First Century.” *Annual Review of Energy and the Environment* 24 (1989).

¹¹ J. J. C. Brugging and B. B. C. van der Zwaan, The Role of Nuclear Energy in Establishing Sustainable Energy Paths.” *Int. J. Global Energy Issues* 18 (2/3/4) (2002);151-180.

¹² S. M. Cohn, “Global Warming and Nuclear Power,” Chapter 13 of “*Too Cheap to Meter: An Economic and Philosophical Analysis of the Nuclear Dream*” (State University of New York Press, 1997), 289-305.

¹³ R. A. Krarowski and R. Wilson, “What Nuclear Energy Can Accomplish to Reduce CO₂ Emissions,” Chapter 8 of R. G. Watts, ed., *Innovative Energy Systems and CO₂ Stabilization* (Cambridge University Press, 2002).

¹⁴ D. G. Victor, *The Collapse of the Kyoto Protocol and the Struggle to Slow Global Warming* (Princeton University Press, Princeton, NJ, 2001). Основное внимание уделено экономике и составлению договоров.

конструкции независимо от того, где произошла эта катастрофа. Обвинение страны, где произошла авария, не станет выходом из положения. Стандарты безопасности должны быть всеобщими.

Многие полагают, что ядерное распространение находится в прямой связи с ростом ядерной энергии. Недавние ядерные кризисы затронули Северную Корею¹⁵, Иран¹⁶ и способствующий распространению «круг», который возглавляет пакистанец А. К. Хан¹⁷. Наивысшую тревогу вызывает приобретение террористами ядерной взрывчатки – это «наибольшая катастрофа, которую еще можно предотвратить»¹⁸. Из-за таких обоснованных тревог многие считают ядерную энергетику неприемлемой в качестве технологии для ослабления будущих углеродных выбросов.

Впрочем, до сих пор значительная часть увеличения ядерной энергетики не привела к оружию, а большинство путей приобретения оружия не связано с ядерной энергетикой. Альтернативный и более реалистичный процесс мышления¹⁹ заключается в согласии с утверждением, что будущее распространение ядерных технологий по всему миру является неизбежным следствием всеобщего представления о возможности использования ядерного деления для оружия и для энергетики. Поэтому попытки остановить рост ядерной энергетики совсем не обязательно приведут к какому-либо замедлению ядерного распространения. Если выбрать другой путь, то основной проблемой может оказаться уменьшение потребности в оружии, что ограничивает доступность ядерных материалов для враждебных действующих лиц и увеличивает побуждения всех действующих лиц к выполнению международных норм²⁰.

Мирная ядерная энергия в течение десятков лет применялась Соединенными Штатами и другими странами в качестве приманки для укрепления международных норм. Например, в декабре 2003 года отказ Ливии от ядерного и химического оружия стал результатом нескольких лет переговоров в связи с желанием ливийского президента Каддафи избавиться от наложенных на его страну санкций и его страхом перед американским обезоруживающим военным ударом. Каддафи позднее заявил, что он хотел от США и других западных стран вознаграждения за свое решение в виде предоставления Ливии ядерных технологий для мирного применения²¹. Этот тип отрицательной связи между ядерной энергетикой и ядерным оружием должен стать долгосрочной целью для включения ядерной энергетики в РКК.

Возрождение роста ядерной энергии казалось маловероятным до недавнего времени, так как было мало экономических побуждений для применения ядерной энергии с целью уменьшения углеродных выбросов, и отсутствовала общественная поддержка ядерной энергии во многих более богатых странах. Недавно появились указания на изменение тенденций в обеих ситуациях, по крайней мере, в США²². Мы предсказываем, что наша гипотеза о возрождении потребностей в ядерной энергетике для обеих ситуаций будет продолжать заметно улучшаться по мере прогресса договоров по ядерному нераспространению и по окружающей среде.

Недавно созданное в США Глобальное товарищество по ядерной энергии (ГТЯЭ) направлено на создание примеров для роста ядерной энергии в США и во всем мире. Эта программа установила набор целей, содержащий семь пунктов, которые сообща дают конкретное представление о будущем для ядерной энергии. Одна из целей опирается на пер-

¹⁵ R. S. Norris, "North Korea's Nuclear Program, 2003." *Bulletin of Atomic Scientists* 59 (2) (March-April 2003) : 74-77.

¹⁶ D. Albright and C. Hinderstein, "Iran: Furor Over Fuel." *Bulletin of Atomic Scientists* (May/June 2003): 12-15.

¹⁷ C. Brown and C. F. Chyba, "Proliferation Rings: New Challenges to the Nuclear Nonproliferation Regime." *International Security* 29 (Fall 2004): 5-49.

¹⁸ G. Allison, *Nuclear Terrorism: The Ultimate Preventable Catastrophe*, Times Books, 2004.

¹⁹ W. C. Sailor, "How to Think About Proliferation and Nuclear Power." *Forum on Physics & Society* (Spring 2001): <http://www.aps.org/units/fps>.

²⁰ S. A. Erickson, "Economic and Technological Trends Affecting Nuclear Nonproliferation." *The Nonproliferation Review* 8, (2) (2001): 40-54.

²¹ Craig Smith, *New York Times*, December 17, 2004.

²² P. Guinnessy, "Stronger Future for Nuclear Power." *Physics Today* (February 2006): 19.

спективные технологии, которые сейчас находятся на начальных этапах разработки. Например, ЕТЯЭ призывает к «разработке и развертыванию новых технологий ядерной переработки ...и к конструированию перспективных перерабатывающих реакторов, которые будут производить энергию из переработанного ядерного топлива»²³. Планы ГТЯЭ направлены также на поддержку ядерной энергетики, устойчивой к распространению, в развивающихся странах на основе программ обслуживания топлива и усилий по программе НИОКР, направленной на маломасштабные реакторы. Это предложение подтолкнуло наши усилия по сравнению и различию будущих ядерных систем, основанных на эволюционирующих технологиях, в связи с представлениями ГТЯЭ о быстром развертывании продвинутых, но не проверенных реакторов и установок топливного цикла.

Основной вопрос в том, сможет ли ядерная энергия в своем эволюционном или революционном облике оказаться способной к экономическому состязанию в тех областях возможностей, которые появятся в будущем. Поэтому мы пытаемся оценить цену электричества от ядерной энергии в единицах цент/кВт-час и возможности ее уменьшения при изменениях циклов ядерного топлива. Справедливый подход заключается в использовании данных по существующим ценам, взятых в Организации по экономическому сотрудничеству и развитию (ОЭСР), и графиков потребностей в электроэнергии, уже имеющих во Всемирном энергетическом совете (ВЭС) и Международном институте прикладного системного анализа (МИПСА)²⁴.

ВЭС и МИПСА²⁵ представляют несколько основанных на сценариях прогнозов объединенных потребностей в энергии и потребностей со стороны производственных технологий. Из шести сценариев три демонстрируют примерно эквивалентные ядерные доли потребления первичной энергии²⁶. Но они предполагают сильно меняющиеся энергетические и экономические условия, а также варианты технологии цикла ядерного топлива. В сценарии А3 с быстрым ростом предполагается, что как экономический рост, так и технический прогресс достаточно сильны при всех региональных и технологических разделениях на группы. Особенно сильные преимущества постулируются в этом случае для ядерных и возобновляемых технологий. Сценарий В предполагает более умеренный прогресс с устойчивыми разделениями по регионам. Потребности в росте энергии и в техническом прогрессе выражены слабее, чем в сценарии А3, что привело авторов к мысли назвать его «перепачканным». Наконец, сценарий С2 с экологическим подтекстом обращает основное внимание на эффективность энергетики, на передачу технологии и ресурсов, а также на политику контроля над углеродом, при которой выбросы углерода уменьшаются до 2 Гт/год к 2100 году (это в три раза ниже нынешнего уровня). По отношению к ядерной энергетике этот случай предполагает, что ядерные технологии следующего поколения получают общественную поддержку, а небольшие, автономные, модульные установки облегчат выход на рынок в развивающемся мире.

Мы основываем наши расчеты на темпах роста ядерной энергетики для сценария с экологическим подтекстом. Наше исследование углубляет результаты ВЭС/МИПСА путем использования упрощенного варианта моделирования ядерной энергии и топливного цикла²⁷, где создаются реакторы и подсчитываются цены и ядерные материалы, связанные с их операциями. Мы рассмотрели сочетания трех технологий, которые способны удовлетворить функциональным требованиям, представленным в работах ВЭС/МИПСА. Речь идет об однократном топливном цикле, реакторах-преобразователях на быстрых нейтронах и реакторах для воспроизводства плутония, соответственно. Результаты моделирования позволяют раз-

²³ U.S. Department of Energy, "Department of Energy Announces New Nuclear Initiative." Press Release, February 6, 2006, <http://www.gnep.energy.gov/gnepPRs/gnepPR020606.html>.

²⁴ N. Nakicenovic, et al., eds., *Global Energy Perspectives*, IIASA/WEC Report (Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 1998).

²⁵ Доклад IIASA/WEC качественно обсуждает ядерные (и другие) варианты технологии получения энергии, которые могли бы удовлетворять предсказываемым требованиям. Количественные сравнения этих вариантов остались за пределами доклада.

²⁶ Для сценариев А3, В и С2 ядерные доли составляют в 2050 году 11.4, 13.8 и 12.1 % , а к 2100 году они составят 22.4, 23.8 и 18.8 %.

²⁷ E. A. Schneider and C. G. Bathke, "NFCSSim: A Nuclear Fuel Cycle Simulation Tool and Criticality Engine." *Nucl. Tech.* 151 (2005) : 35.

работать более точное понимание разветвлений вариантов, которые предсказываются рядом оптимизирующих методик²⁸ и Национальной системой моделирования энергии²⁹, используемой Министерством энергетики США. Представленные в нашей статье результаты носят не предсказательный, а скорее описательный характер в виде набора правдоподобных сценариев.

КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬ ЯДЕРНОЙ ЭКОНОМИКИ

«Цена не станет препятствием для использования электричества от атомной энергии. Единственное, официальное заявление о цене принадлежит пока что Р. С. Толману – научному советнику американских участников международного комитета по контролю над атомной энергией. Эта цена примерно на 30% выше, чем на угольных станциях в тех районах, где угля достаточно». Эта цитата взята из журнала «Бизнес Уик» (8 марта 1947 года)³⁰.

Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ) недавно подсчитало, что цена электричества, получаемого от новых усовершенствованных легководных реакторов (ЛВР), составит 4.9 цент/кВт-час. Операционные затраты и расходы на поддержание работ, как предсказывается, составят 0.5 цент/кВт-час (меньше, чем показывает опыт), а расходы на топливо – 0.8 цент/кВт-час. Оценки уменьшения содержания углерода равны 57 долларов за тонну углерода, образовавшегося из угля в виде CO₂³¹.

При более строгом рассмотрении ОЭСР³² затраты на строительство и операции разделяются. Как правило, капитальные затраты на сооружение выше, чем операционные расходы. Но в каждой из этих категорий затрат существует широкий диапазон, где реальная цена зависит от страны и конструкции предприятия. Изменения в затратах на рабочую силу и на регулирование меняются в пределах 1500-2500 долларов/кВт(э) при строительстве предприятия, не считая процентов по ссудам. При строительстве в течение пяти лет и учетной ставке 10% диапазон полных капитальных затрат составит от 2000 до 3100 долларов/кВт(э). Это трансформируется в капитальные затраты в течение работы предприятия в диапазоне 2.8-5.1 цент/кВт-час. Расходы на операции, уход и топливо ОЭСР суммирует и определяет как «операционные расходы», которые сильно различаются от страны к стране и от предприятия к предприятию.

Если собрать вместе все категории затрат, то кажется, что в зависимости от страны прогнозируемая цена ядерной энергетики колеблется от оптимистичной величины 4.0 цент/кВт-час до пессимистичного значения 8.7 цент/кВт-час. Оценка 1947 года (6.4 цент/кВт-час) попадает как раз в середину приведенного диапазона.

Больше всего внимания при исследованиях и разработках ядерных энергетических реакторов уделяется снижению строительных и операционных затрат. Многие из реакторов, которые могут быть развернуты, скажем, через 20 лет, будут стоить на 30% меньше, чем те, которые рассматриваются сейчас. Но более значительная экономия может считаться нереалистичной из-за технологии на этой стадии созревания.

КАЧЕСТВЕННОЕ ОПИСАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА

Здесь рассматриваются три сценария топливного цикла: непосредственное захоронение отработанного топлива в геологической среде («однократный топливный цикл»), преобразование и воспроизводство.

Однократный цикл – это открытый топливный цикл, использующий сгорание урана. В

²⁸ S. Messner and M. Strubegger, "User's Guide for MESSAGE III." International Institute for Applied Systems Analysis Report WP-95-69, Laxenburg, Austria, 1995.

²⁹ US DOE, "The National Energy Modeling System: An Overview." DOE Technical Report DOE/EIA-0581, March 2003.

³⁰ "What is the Atom's Industrial Future?" *Business Week* (March 8, 1947): 21-22, as cited in *The American Atom*. R. C. Williams and P. I. Cantelion, eds., (University of Pennsylvania Press, 1984): 97.

³¹ H. H. Rogner, "Kyoto's Flexible Mechanisms & Nuclear Power: Rethinking the Options." IAEA Bulletin, 42/2/2000, <http://www.iaea.org/worldatom>.

³² OECD/IEA, "Nuclear Power in the OECD." Paris, France, 2001.

нем используется постройка изменившихся или современных вариантов ЛВР. Отходы, состоящие из отработанного топлива, которое выгружается из этих установок, будут со временем помещены в стабильную геологическую среду. Можно будет построить дополнительные подготовленные хранилища типа Юкка-Маунтин, или станут доступными альтернативные методы размещения, например, глубокие шахты.

Разделение и преобразование (для простоты назовем эти процессы «преобразованием») – это процесс обработки отходов, в котором отдельные долгоживущие нуклиды выделяются из отходов с высоким уровнем радиоактивности и преобразуются при дополнительном облучении. Это (теоретически) преобразует долгоживущие радионуклиды в короткоживущие или стабильные ядра. Преобразование было объектом многих исследований, но до сих пор оно не введено в практику.

Если добавить преобразование к современному однократному топливному циклу, то появятся три этапа метода прямого устранения отходов. Сначала отработанное топливо разбивается на куски, измельчается и растворяется с разделением потоков отдельных радиоактивных элементов. Из этих потоков (например, один поток для плутония, один для нептуния, один для технеция-99 и т.д.) формируются топливные элементы, которые можно облучать в специальном реакторе. Наконец, этот специальный реактор работает в течение определенного промежутка времени для выгорания или преобразования отобранных элементов в менее тревожные изотопы с точки зрения перспективы удаления отходов.

Ощущаемая выгода состоит в том, что преобразование упрощает заключительное удаление, уменьшая количество, объем и стоимость хранилищ. Устранение ядер нептуния-237 сделает более предсказуемым поведение хранилища в период между сотней тысяч лет и миллионом лет³³. Кроме того, образцы иода-129, углерода-14 и технеция-99 можно перевести в специальные формы для отходов, например, в сплавы, которые окажутся нерастворимыми в воде. Эти вещества, особенно технеций-99, оказываются важными с точки зрения прогнозируемых изъятий из хранилищ в промежутке от 1000 до 100000 лет. Вариантом могут также стать специальные преобразующие установки для таких изотопов³⁴. Единственными другими долгоживущими, радиоактивными изотопами, которые пойдут в хранилище, окажутся никель-59 и цирконий-93 и ряд других изотопов, не растворимых в воде.

В случае геологического хранилища максимальная вместимость для безопасных операций определяется зависящей от времени скоростью выделения тепла при распаде помещенных в хранилище отходов. Если все трансурановые элементы (ТУЭ; главным образом, это нептуний, плутоний, америций, кюрий) удалены из отходов, уменьшение долгосрочной тепловой нагрузки, испытываемой хранилищем, позволит ему выдержать нагрев от отходов, в несколько раз превышающий ГВт-т (т – время работы в годах), по сравнению с прямым хранением отработанного топлива. По оценкам, вместимость можно будет увеличить в 2.7-4 раз³⁵, если уменьшить требования по безопасности к долгосрочному хранению³⁶. Если будет переработан *только* плутоний в обычных реакторах с водяным охлаждением, вместимость не увеличится из-за роста содержания изотопов ТУЭ, образующих много тепла. В действительности, даже упомянутый выше четырехкратный выигрыш нельзя получить при использовании только обычных реакторов. Некоторые выделяющее тепло изотопы (например, америций-241) обладают отрицательным воздействием на цепную реакцию в реакторах с водяным охлаждением и могут быть преобразованы только в ограниченном количестве. Поэтому переработка и преобразование в реакторах с водяным охлаждением тех типов, которые применяются сейчас, не могут увеличить вместимость хранилища более, чем вдвое³⁷.

³³ US DOE, "Viability Assessment of a Repository at Yucca Mountain, Volume 3: Total System Performance Assessment." DOE/RW-0508, December 1998.

³⁴ W. C. Sailor, C. A. Beard, F. Venneri, and J. W. Davidson, Comparison Of Accelerator-Based With Reactor-Based Nuclear Waste Transmutation Schemes, *Progress in Nuclear Energy*, 28 (1994): 359.

³⁵ M. Bunn, S. Fetter, J. P. Holdren, and B. Van der Zwaan, "The Economics of Reprocessing vs. Direct Disposal of Spent Nuclear Fuel." *Nucl. Tech.* 150 (2005).

³⁶ П. Ф. Питерсон, «Проблемы обнаружения незаявленных проходческих работ на геологических хранилищах после их закрытия», *Наука и всеобщая безопасность*, 8, вып.1, 1999.

³⁷ A. M. Yacout, R. N. Hill, L. Van Den Durpel, P. Fink, E. A. Schneider, C. G. Bathke, and S. Her-ring, "Dynamic Analysis of the AFCI Scenarios" in *Proc. of The Physics of Advanced Fuel Cycles*

Концепция реакторов, не страдающих от такого ограничения, существует. Например, это реакторы, охлаждаемые натрием, свинцом и гелием при высокой температуре. Такие реакторы разрабатываются как часть инициативы четвертого поколения Министерства энергетики США³⁸. Эти реакторы могут в конечном итоге преобразовать все ТУЭ и все продукты деления, хотя это потребует непрерывную и длительную переработку ядерного топлива. Когда ТУЭ убираются из отходов и устраняют тепловую нагрузку, на вместимость хранилища оказывают отрицательное влияние продукты деления стронций-90 и цезий-137. Чтобы добиться еще большей выгоды, следует установить режим принудительной вентиляции хранилища не время порядка столетий³⁹ или же обязательно удалить из хранилища эти продукты деления. Если отделить эти изотопы, вместимость хранилища еще больше вырастет. А тепловыделение от остальных изотопов окажется в 40-80 раз меньше по сравнению с не прошедшим переработку отработанным топливом. Предельная цель стратегии преобразования заключается в удалении ограничения от выделяемого отходами тепла на вместимость хранилища. Но этого преимущества нельзя добиться целиком, пока цезий-137 и стронций-90 не будут изолированы в другой среде на некоторое время. Более того, чтобы добиться крупного сокращения, упомянутого выше, переработка отработанного топлива реактора на быстрых нейтронах должна достигнуть эффективности отделения трансуранов не ниже 99.99%⁴⁰.

Надо будет преодолеть несколько технических препятствий до того, как преобразование или другие полностью замкнутые топливные циклы смогут заработать, как планировалось. Используя текущие технологии, многие побочные продукты переработки можно упаковать как отходы, которые надо также передать в хранилище; следовательно, объем отходов уменьшится примерно вдвое. Поэтому следует разработать ряд новых процессов химического разделения и вывести их на промышленный уровень до того, как преобразование станет достаточно выгодным^{41,42}. Только тогда станет возможным добиться уменьшения затрат на удаление отходов и на удовлетворение требований к хранилищам. Кроме того, преобразование, похоже, увеличит количество отходов с низкой активностью, производимых на единицу электрической энергии⁴³.

Хотя для такого варианта потребуются значительные капитальные вложения, основное преимущество заключается в том, что он сможет свести к минимуму массу и объем материалов, которых следует изолировать от окружающей среды, на единицу произведенной электроэнергии. Значительного преимущества можно будет добиться, если конечные затраты на удаление отходов окажутся значительно выше, чем прогнозируется сейчас.

Третий вариант – воспроизводство, похож на преобразование. Некоторое число реакторов, работающих на быстрых нейтронах, сконструировано для преобразования урана-238 или тория-232 в плутоний-239 или уран-233, соответственно. После переработки и перезарядки можно применять новое топливо для многих других реакторов без необходимости в добыче урана. Три концепции реакторов на быстрых нейтронах, которые подходят для воспроизводства плутония, финансируются в рамках инициативы четвертого поколения. В будущем, жидкометаллические реакторы (ЖМР) или другие, продвинутые технологии деления,

and Nuclear Systems, PHYSOR 2004, Chicago, IL, April 2004.

³⁸ "A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems (GIF-002-001)," U.S. DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and Generation IV International Forum, December 2002, <http://www.nuclear.gov/>.

³⁹ P. F. Peterson and F.N. von Hippel, "The Pros and Cons of Nuclear Fuel Recycling," *Science* (December 7, 2001): 2093-2094 (in Letters).

⁴⁰ R. A. Wiegand, 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): 95-106.

⁴¹ T. S. Rudistill, M. C. Thompson, M. A. Norato, G. F. Kessinger, R. A. Pierce, and J. D. Johnson, "Demonstration of the UREX Solvent Extraction Process with Dresden Reactor Fuel." WSRC-MS-2003-00089, Rev.1, Westinghouse Savannah River Company, Aiken, SC 29808, <http://sti.srs.gov/fulltext/ms2003089r1/ms2003089r1.html>.

⁴² G. F. Kessinger and M. C. Thompson, "Chop-Leach Dissolution of Commercial Reactors Fuel." *AIP Conf. Proc.* 673 (1), 288, 1 July 2003.

⁴³ T. H. Pigford, "Actinide Burning and Waste Disposal." an invited review for the M.I.T International Conference on the Next Generation of Nuclear Power Technology," October 5, 1990, UC Berkeley Dept. of Nuclear Engineering, UCB-NE-4176.

где перезагрузка делящихся материалов происходит внутри, могут быть доведены до такого уровня, когда их можно будет развертывать достаточно широко. Системы, которые заменят ЖМР, смогут, например, применять однократный топливный цикл со сроками работы активной зоны, равными продолжительности существования реактора (такая система может быть полностью изолирована от внешней среды). Существуют также другие концепции воспроизводства и преобразования^{44,45,46,47}.

КОЛИЧЕСТВЕННОЕ ИЗУЧЕНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА

Целью этого раздела является моделирование эволюции ядерной энергии при трех различных стратегиях топливного цикла: однократный цикл, преобразование на быстрых нейтронах и воспроизводство плутония. Последние две основаны на одной из концепций реакторов четвертого поколения, и любой из упомянутых в предыдущем разделе реакторов способен выполнить такую работу. Моделирование переводит в количественный вид компромиссы, присущие указанным стратегиям. Один такой компромисс заключается в положительной корреляции между количеством ТУЭ, требующим хранения или удаления (отрицательное влияние на окружающую среду и хранилища), и величиной ТУЭ, которые подлежат перевозке, разделению, переработке в топливо или же становятся более уязвимыми по отношению к удалению или иной деятельности, связанной с распространением, по сравнению с вариантом помещения ТУЭ в отработанное топливо. Другой компромисс – это широко ожидаемый штраф (по крайней мере, в ближайшем будущем), вытекающий из развертывания варианта «замкнутого» топливного цикла. Для данной стратегии наше моделирование может создавать реакторы, чтобы удовлетворять зависящим от времени требованиям. Но она не способна определять эти требования. Поэтому, как указано во введении, мы применяем графики требований, разработанные ВЭС и МИСПА.

Используя разработанные ВЭС и МИСПА функции требований для трех наших сценариев (однократный цикл, преобразование и воспроизводство), мы полагаемся на литературу в качестве руководства для выбора доступных данных по реакторным технологиям, а также по зависящей от времени структуре парка реакторов. Наша модель рассчитывает параметры баланса материалов, например, запасы отработанного ядерного топлива (тонны исходного тяжелого металла, ИТМ), а также запасы с плутония и других актинидов. Мы подсчитываем зависящий от времени баланс материалов, приведенный на рисунках, пользуясь простым набором правил. Правила принимают вид переходных функций производительности для каждого типа рассматриваемых установок. Например, для ЛВР с топливом из оксида урана (УОКС) мы предполагаем, что каждый кг уранового топлива производит 60 Мвт-дней тепловой энергии за четыре года нахождения в реакторе. После разгрузки отработанное топливо имеет следующий состав: 0.9249 кг урана, 0.0119 кг плутония, 0.0016 кг малочисленных актинидов (МА) и 0.0616 кг продуктов деления (ПД).

Это правило, характерное для ЛВР- УОКС в парке реакторов. Аналогичные правила существуют для других типов реакторов, которые мы рассматриваем: в некоторых случаях исходное топливо содержит плутоний и/или МА. Для завершения этой картины требуется некоторая дополнительная информация, например, степень обогащения урана, сроки задержки процесса (например, изготовление топлива, переработка), эффективность преобразования

⁴⁴ “The ALMR: A Decade of LMR Progress and Promise.” Washington DC, November 11-15, 1990/ American Nuclear Society Press, La Grange Park, IL.

⁴⁵ D. E. Beller, W. C. Sailor, and F. Venneri, A Closed ThUOx Fuel Cycle for LWRs with ADTT (ATW) Backend for the 21st Century, LA-UR-98-4126, Presented at OECD Nuclear Energy Agency Workshop. The Backend of the Fuel Cycle in a 1000 GWe Nuclear Scenario, Palais des Papes, Avignon, France, October 6-7, 1998.

⁴⁶ А. Гальперин, П. Райхерт и А. Радковский, «Ториевое топливо для легководных реакторов: уменьшение возможности ядерного топливного цикла способствовать распространению ядерного оружия», *Наука и всеобщая безопасность*, 6, вып. 3 (1997).

⁴⁷ M. Carelli, “The Secure, Transportable Autonomous Light Water Reactor – STAR-LW.” US Department of Energy Nuclear Energy Research Initiative Proposal 99-0027, Westinghouse Corp., University of California Berkeley, Massachusetts Institute of Technology and Polytechnical Institute of Milan.

тепловой энергии в электрическую на предприятии. Тем не менее, моделирование просто подводит итоги за каждый год, добавляя отработанное топливо, которое содержит уран, плутоний, МА и ПД, к полному запасу отработанного топлива или уменьшая полный запас, если потребуется, для переработки. Существует ограничение на темпы создания некоторых типов реакторов, где в качестве топлива применяются плутоний и МА, выгруженные из других реакторов. Если функция потребности в электрической энергии настаивает на создании нового реактора, модель не построит реактор такого типа, если в какой-то момент времени в пределах определенных сроков запас топлива, содержащего плутоний вместе с МА и доступного для переработки, окажется ниже нуля. Вместо этого будет создан реактор на урановом топливе.

Дополнительные детали по нашей модели, включая общее правило для всех типов реакторов, можно найти в Приложении.

На Рис.1 показано развитие во времени двух основных показателей цикла ядерного топлива - запаса отработанного ядерного топлива и массы актинидов, в предположении принятых нами темпов развития производства ядерной энергетики для однократного топливного цикла. Начальные условия для сценариев определяются текущей реальностью. Запасы отработанного ядерного топлива во всем мире к 2000 году составляли 154000 т⁴⁸. На то же время всемирный запас плутония равнялся 1270 т⁴⁹. Парк реакторов на 2000 год отражает текущую реальность и включает в себя несколько ЛВР на топливе из смеси оксидов урана и плутония (СОКС). Рост с 2000 по 2010 годы связывается с сооружением ЛВР. Предполагается, что после этого на рынок поступят ЛВР и реакторы с охлаждением высокотемпературным газом (ВТГР), причем доля ВТГР соответствует потребностям растущей водородной экономики⁵⁰. Считается, что все новые сооружаемые установки рассчитаны на 50 лет работы. Системные запасы ядерного топлива делятся на две категории. Отработанное топливо, находящееся на длительном хранении, - это топливо, которое было разгружено из реакторов достаточно давно, и оно рассматривается, как безопасное для переработки или для удаления в хранилище. Оставшееся топливо обрабатывается для сгорания в реакторах или для помещения в хранилище на короткий срок, чтобы переждать распад опасных короткоживущих, радиоактивных изотопов.

На Рис.1 (справа) рассчитаны запасы ТУЭ. Произведено такое же разделение между материалами, которые не используются, но готовы к удалению или переработке, и материалами, которые активно используются. Приведены кривые для плутония (они интересны с точки зрения содержащейся остаточной энергии, а также возможности для хищения лицами, стремящимися к распространению ядерного оружия) и для малочисленных актинидов (МА). МА - прежде всего, нептуний, америций и кюрий, вызывают значительную радиационную опасность, как обсуждалось выше в главе «Качественное изучение эволюции топливного цикла». В любом сценарии, содержащем возрастание ядерной энергетики, содержание этих материалов в топливном цикле растет со временем. Впрочем, в 2100 году большие количества таких материалов потребует удаления, о чем свидетельствует неудержимый рост запасов, находящихся на длительном хранении.

Основанная на преобразовании стратегия, аналогичная той, которая исследуется в Инициативе перспективного топливного цикла, иллюстрируется на Рис.2. Реакторы, сжигающие уран, продолжают поставлять основную часть энергии, но, кроме того, строятся в небольшом количестве реакторы, ориентированные на сжигание актинидов, не использованных в установках со сжиганием урана. На Рис.2 эти актиниды проходят через ЛВР, работающие на СОКС-топливе, где они частично потребляются перед тем, как направляются в реактор на быстрых нейтронах для окончательного преобразования. Такой «сжигающий» реактор обладает коэффициентом конверсии (КК), равном 0.25. Эта цифра означает, что на каж-

⁴⁸ J. Lee, K. Fukuda, P. Burel, and M. Bell, "Long Term Issues Associated with Spent Nuclear Power Fuel Management Options," in *Proc. 7th Information Exchange Meeting on Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation*, Jeju, Korea, October 14-16, 2002.

⁴⁹ D. Albright and M. Gorowitz, "Tracking Civil Plutonium Inventories: End of 1999." In *ISIS Plutonium Watch* (October 2000).

⁵⁰ L. Van Den Durpel, D. Wade, H. Khalil, and A. Yacout, "Dynamic Analysis of Nuclear Energy Systems Strategies for Electricity and Hydrogen Production in the USA," in *Proc. GLOBAL 2003*, New Orleans, LA, November 16-20, 2003.

дый атом плутония или МА, образованный в результате ядерных реакций внутри активной зоны реактора, потребляется четыре атома такого же материала в результате деления⁵¹.

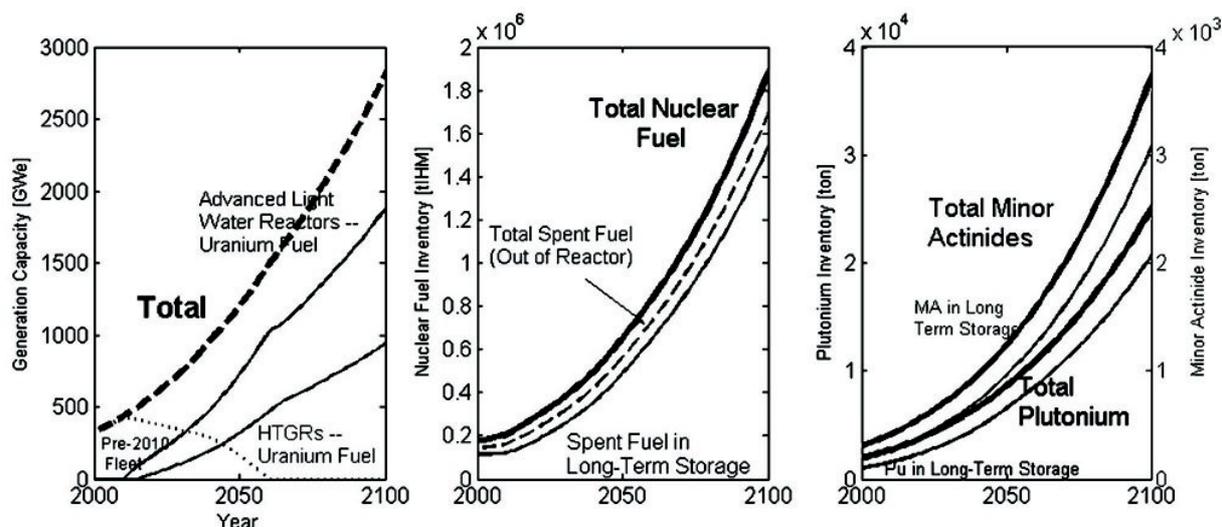


Рис. 1. Урановое ядерное будущее при однократном прогоне. Считается, что перспективные ЛВР наиболее конкурентоспособны для производства электрической энергии, а ВТГР – для производства водорода. Возрастают запасы плутония и горячих, радиоактивных малочисленных актинидов (их содержание указано из-за воздействия на удаление в хранилища). Запасы в категории долгосрочного хранения соответствуют материалам, которые уже достаточно остыли после выгрузки из реактора. Эти крупные запасы требуют специального хранения и/или удаления в хранилища.

По оси X на всех графиках отложены сроки. По оси Y на первом графике отложена мощность производимой электроэнергии (ГВт), на втором графике – запасы отработанного топлива (т ИТМ), на третьем (слева) – запасы плутония (т), (справа) – запасы малочисленных актинидов (т).

Надписи на рисунках (сверху вниз): **Левый** – Продвинутый ЛВР на урановом топливе; Всего; Парк до 2010 года; ВТГР на урановом топливе. **В центре** - Все ядерное топливо; Все отработанное топливо (выгруженное из реактора); Отработанное топливо на длительном хранении. **Правый** - Все другие актиниды; ДА на длительном хранении; Весь плутоний; Плутоний на длительном хранении.

Такая конструкция была использована американской Инициативой по продвинутому ядерному циклу при рассмотрении сценариев⁵². Смесь развернутых реакторов ориентируется на минимизацию хранения извлеченных из реакторов материалов (это соответствует

⁵¹ Эта конструкция реактора с небольшим коэффициентом преобразования выявила ряд противоречий. Анализ, проведенный разработчиками из Аргоннской национальной лаборатории (E. E. Morris and M. A. Smith, "Development of Low Conversion Rate Fast Reactors for Transmutation," Report ANL-AAA- 057, 2002), указал, что он прошел основные критерии пассивной безопасности. Другие критерии (например, National Research Council, Committee on Separations Technology and Transmutation Systems, " Nuclear Wastes: Technologies for Separations and Transmutations." NAS Press, 1996) бросают сомнения на практическую изменчивость конструкции (например, применение активной зоны в виде сжатого «блинчика» для увеличения потерь нейтронов), необходимых для компенсации низкого содержания урана в топливе. Если принять устройство с КП=0.5-0.6, как предложено в исследовании Национальной академии наук (1996 год), доля РБН в парке реакторов (как показано на Рис.2) слегка возрастет. Наше заключение относительно эффективности сценария преобразования качественно останется неизменным.

⁵² Смотрите [37].

тому, что было сообщено на основе более детальных исследований^{53,54}). На правом графике показано, что такая стратегия способна уменьшить количество ТУЭ, требующих удаления, практически до нуля.

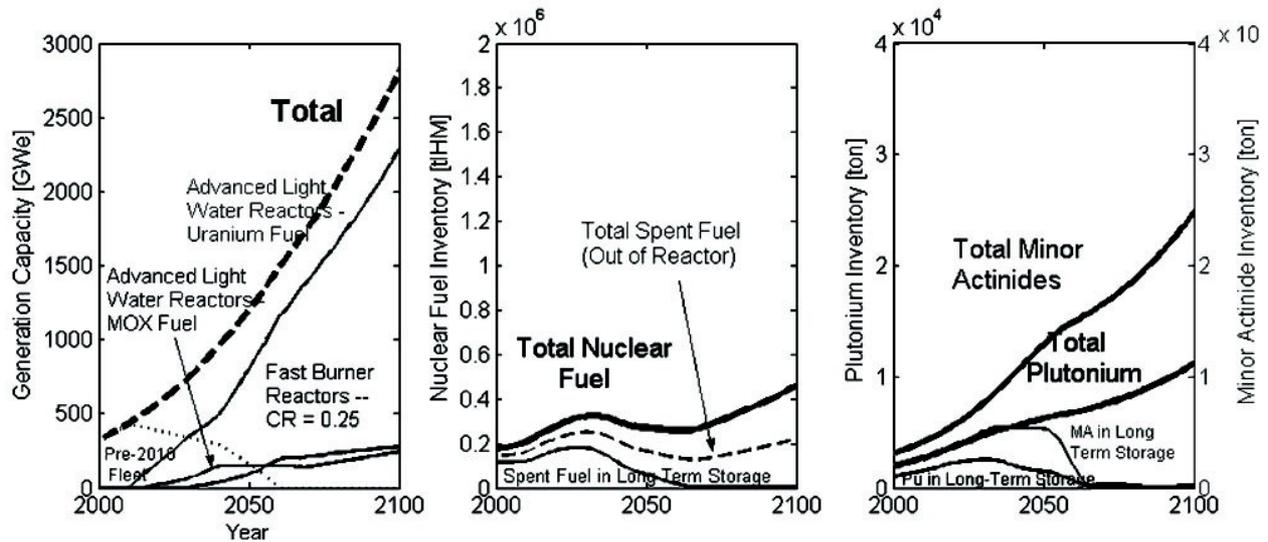


Рис.2: Ядерное будущее на основе преобразования. После ЛВР-СОКС следуют сжигающие реакторы на быстрых нейтронах, целью которых становится быстрое уменьшение до нуля требований к долгосрочному хранению. ЛВР на урановом топливе продолжают поставлять основную часть требуемой энергии. Системные запасы ТУЭ значительно уменьшаются по сравнению с одноразовым циклом. Однако при растущей ядерной экономике масса ТУЭ, циркулирующих через топливный цикл, всегда будет возрастать в далекой перспективе. Обозначения на координатных осях те же, что на Рис.1.

Надписи на рисунках (сверху вниз): Левый – Всего; Продвинутое ЛВР на урановом топливе; Продвинутое ЛВР-СОКС; Сжигающие реакторы на быстрых нейтронах при КК=0.25; Парк до 2010 года. В центре – Все отработанное топливо, извлеченное из реактора; Все отработанное топливо; Отработанное топливо на длительном хранении.

Справа – Полное количество МА; Полное количество плутония; МА на длительном хранении; Плутоний на длительном хранении.

В сценарии, проиллюстрированном на Рис.3, предполагается, что реакторы на быстрых нейтронах становятся экономически более привлекательными, чем текущие конструкции водных реакторов⁵⁵. Следовательно, вместо нескольких таких установок, развернутых для обращения с отходами, надо будет в конечном итоге заменить весь парк реакторов⁵⁶. В этом случае развертываемыми реакторами на быстрых нейтронах должны стать скорее воспроизводящие (нежели сжигающие) реакторы с коэффициентом воспроизводства (КВ) более единицы, которые создают больше топлива, чем потребляют. Приведенные на Рис.3 установки с КВ=1.2 воссоздают достаточно топлива, чтобы удваивать парк реакторов на быстрых нейтронах через каждые 35 лет. Доля ядерной энергетики, обеспечиваемая воспроизводящими реакторами, соответствует «номинальным» прогнозам⁵⁷. Стратегия устраняет также крупномасштабную потребность в удалении ТУЭ. Но запасы плутония во всей системе оказываются

⁵³ E. A. Schneider, C. G. Bathke, S. DeMuth, and M. R. James, "Transient Simulation of Light Water Reactor Recycle Strategies in the United States." *In Proc. GLOBAL 2003*, New Orleans, LA, November 16-20, 2003.

⁵⁴ E. A. Schneider, C. G. Bathke, and K. Pasamehmetoglu, "The Role of Accelerator Driven Systems in Sustainable Nuclear Future." *In Proc. Intl. Workshop on P&T and ADS Development, In Wor 2003*, Mol, Belgium, October 3-5, 2003.

⁵⁵ OECD Nuclear Energy Agency, "The Economics, and the Nuclear Fuel Cycle," OECD Technical Report, 1994.

⁵⁶ Ясно, что требование к этому сценарию заключается в эволюции техники, экономики и общественного мнения по направлению принятия воспроизводящего топливного цикла.

ся примерно втрое выше к 2100 году, чем в сценарии преобразования.

В представленном сценарии значение КВ не меняется со временем. Но ожидается, что парк реакторов окажется «настраиваемым» путем изменения конфигурации топлива для ожидаемых требований к плутонию. При насыщении требований воспроизводство уменьшится. Равновесное состояние достигается при КВ=1. При значении КВ менее единицы реакторный парк фактически можно отправлять в отставку, оставив за ним только остаточное сжигание образцов ТУЭ. Напротив, быстрый вывод из строя парка реакторов сразу же поднимет вопрос об удалении тысяч тонн ТУЭ, что окажется дорогим и проблематичным.

Многочисленные исследования показали, что с учетом текущих и предсказуемых на ближайшее будущее данных по затратам для разных технологий стратегия «однократного цикла» лишь для одного урана с дальнейшим помещением отходов в хранилища оказывается наилучшей с экономической точки зрения. Это приводит к вопросу, что должно произойти с обсуждавшейся выше стратегией реакторов на быстрых нейтронах, чтобы она стала конкурентоспособной в сравнении со стратегией однократного топливного цикла.

Начиная с оценки цен в настоящее время и на ближайшее будущее, можно определить изменения рыночных условий или технического прогресса, которые делают эти стратегии привлекательными при сравнении с вариантом однократного топливного цикла. Значения цены единицы производства, схема финансирования, амортизация капитальных затрат на реактор и другие аспекты нашего расчета цен вытекают из методологии, применявшейся Организацией экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) в исследованиях 1994 и 2002 годов⁵⁸, а также в исследованиях Массачусетского технологического института (МТИ)⁵⁹. Эти исследования обращали внимание на цену электроэнергии, поставляемой эволюционирующими и продвинутыми реакторами. Дальнейшие детали методологии наших оценок цены можно отыскать в Приложении. Значения цены за четыре важнейшие единицы производства выбраны в качестве критичных решающих переменных. Это фиксированные цены, связанные с установками на быстрых нейтронах, цена урановых ресурсов, цены переработки и удаления. Справочные данные ОЭСР для этих технологий таковы (в долларах 2000 года): стоимость постройки реактора на быстрых нейтронах – 2100 долларов за кВт(э), стоимость руды – 30 долларов за кг урана, стоимость переработки отработанного топлива ЛВР – 800 долларов за кг исходного тяжелого металла (ИТМ)⁵⁹, а стоимость удаления в хранилища – 500 долларов за кг ИТМ⁶⁰.

В исследовании ОЭСР, а также в представленных нами результатах стоимость электричества (СЭ) меняется в зависимости от стратегии топливного цикла, но обычно она лежит в диапазоне 3.5 – 5.5 цент/кВт-час(э). Это оптимистичный диапазон по сравнению с современными значениями СЭ 4-8 цент/кВт-час(э) или даже с прогнозами МТИ⁵⁹. Он отражает оптимистические прогнозы в отношении сроков строительства предприятий (четыре года), уменьшения барьеров для получения ссуды (8-10%) и льгот за быстрое строительство реактора.

На Рис.4 показана чувствительность стоимости электроэнергии (СЭ) к затратам на строительство РБН и на урановые ресурсы. На этом рисунке определены участки ценовой плоскости, где каждый из трех вариантов предлагает альтернативы с наименьшими затратами. Штрихованные линии – это кривые с постоянной стоимостью, которые меняют свой наклон, переходя от сценария к сценарию, поскольку каждый вариант по-своему влияет на стоимость единицы производства. Например, вариант однократного топливного цикла не зави-

⁵⁷ Electric Power Research Institute, “A Review of the Economic Potential of Plutonium in Spent Nuclear Fuel.” EPRI Report TR-106072, 1996.

⁵⁸ OECD Nuclear Energy Agency, “Accelerator Driven Systems (ADS) and Fast Reactors (FR) in Advanced Nuclear Fuel Systems.” OECD/NEA Technical Report NEA3109-ADS, 2002.

⁵⁹ Стоимость переработки других типов топлива меняется. Затраты на переработку топлива из смеси оксидов составляют 2000 долларов за кг, а пирометаллургическая технология разделения, применяемая для возвращения металлического топлива из РБН стоит 2700 долларов за кг.

⁶⁰ Чтобы сохранить массу в качестве базовой единицы для всех показателей стоимости, мы преобразовали величину ОЭСР 210000 долларов за кубометр отработанного топлива, используя значение плотности отработанного топлива ЛВР. После дисконтирования и нормировки на единицу произведенной энергии величина 500 долларов/кг соответствует 0.1 цент/кВт при выгорании топлива ЛВР в размере 50 МВт-день/кг.

сит от капитальных затрат на строительство РБН, и поэтому линии с постоянной стоимостью для этого варианта оказываются вертикальными. С другой стороны, все реакторы при экономике воспроизводства принадлежат к одному типу – РБН. Парк таких реакторов ориентируется только на уже существующий запас обедненного урана, который заменяет уран, преобразованный в плутоний. Поэтому сценарий воспроизводства зависит только от затрат на РБН, но не от цены естественного урана, и линии с постоянной стоимостью оказываются горизонтальными. Преобразование оказывается промежуточным случаем, где большинство энергетических реакторов составляют ЛВР с топливом из обогащенного урана, но присутствуют также и РБН. Жирные линии – это геометрическое место точек, разделяющих участки, в которых один из вариантов оказывается самым дешевым.

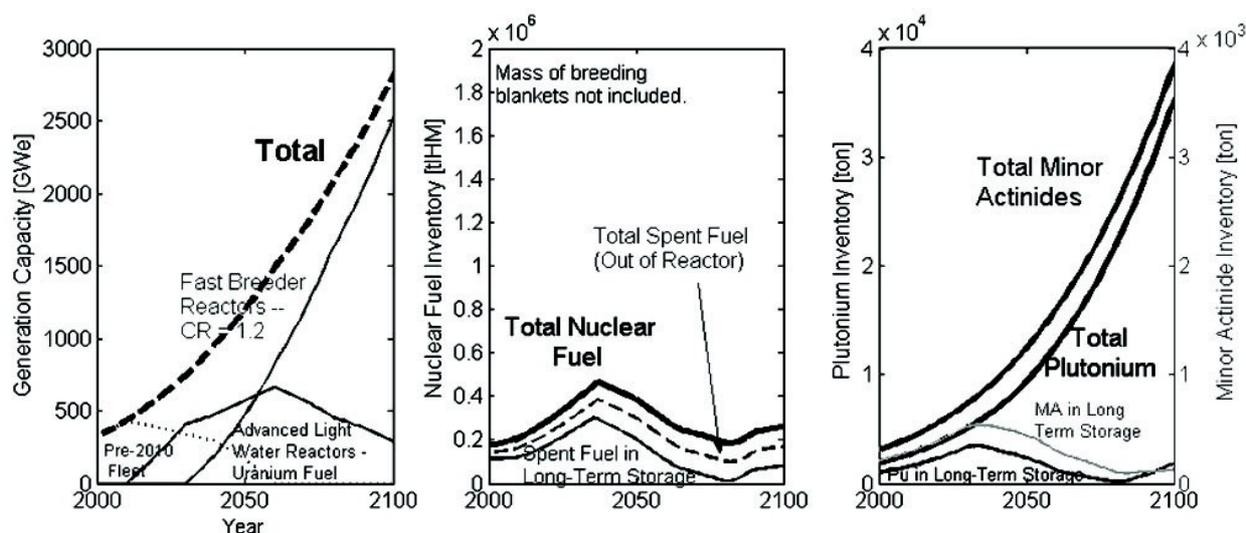


Рис.3: Ядерное будущее с реакторами – воспроизводителями. Реакторы-воспроизводители на быстрых нейтронах фактически удовлетворяют требованиям к 2100 году. Считается, что они требуют исходного запаса плутония для начала работы. Следовательно, размеры запаса влияют на темпы развертывания РВБН.

Обозначения на координатных осях те же, что на Рис.1.

Надписи на рисунках (сверху вниз): Слева – Всего; Реакторы на быстрых нейтронах с $КК=1.2$; Продвинутое ЛВР на урановом топливе; Парк реакторов до 2010 года. В центре – Масса зон воспроизводства не включена; Все отработанное топливо, выгруженное из реакторов; Все ядерное топливо; Отработанное топливо на длительном хранении. Справа – Все малочисленные актиниды; Весь плутоний; МА на длительном хранении; Плутоний на длительном хранении.

В настоящее время в прогнозах ОЭСР и МТР затраты на строительство РБН предполагаются на 25% выше, чем затраты на сооружение ЛВР. Эти затраты должны быть значительно уменьшены до величин, которые на 10% меньше, чем расходы на ЛВР, до того, как преобразование или воспроизводство станут тем вариантом, которые скорее всего заинтересует рынок. Это связано с тем, что другие затраты, связанные с топливным циклом, который ориентирован на переработку, выше затрат на прямое удаление.

Относительную нечувствительность СЭ к ценам на ресурсы можно заметить на Рис.4.

Даже маловероятное десятикратное увеличение цены урановой руды увеличит СЭ только на 20% : от 3.91 до 4.66 цент/кВт-час. При этом однократный топливный цикл все еще остается наиболее привлекательным вариантом. Действительно, такое повышение в длительной перспективе окажет даже меньшее воздействие на СЭ, поскольку содержание урана-235 в отходах процесса обогащения может быть отрегулировано. По мере того, как рынок средств обогащения приспособливается к повышенным требованиям, энергетические компании смогут частично компенсировать повышенную цену за руду путем уменьшения обогащения отходов и получения большего количества продукта за единицу закупленной руды. В этом исследовании предполагается фиксированное обогащение отходов 0.30%, и мы не пытались оптимизировать этот пример.

Если изменяется стоимость удаления отработанного ядерного топлива (ОЯТ), а не цена урановых ресурсов, то Рис.5 приведет нас к такому же выводу. Если сохранять остальные цены постоянными, только четырехкратное возрастание затрат на удаление сделает преобразование более дешевым, чем однократный топливный цикл.

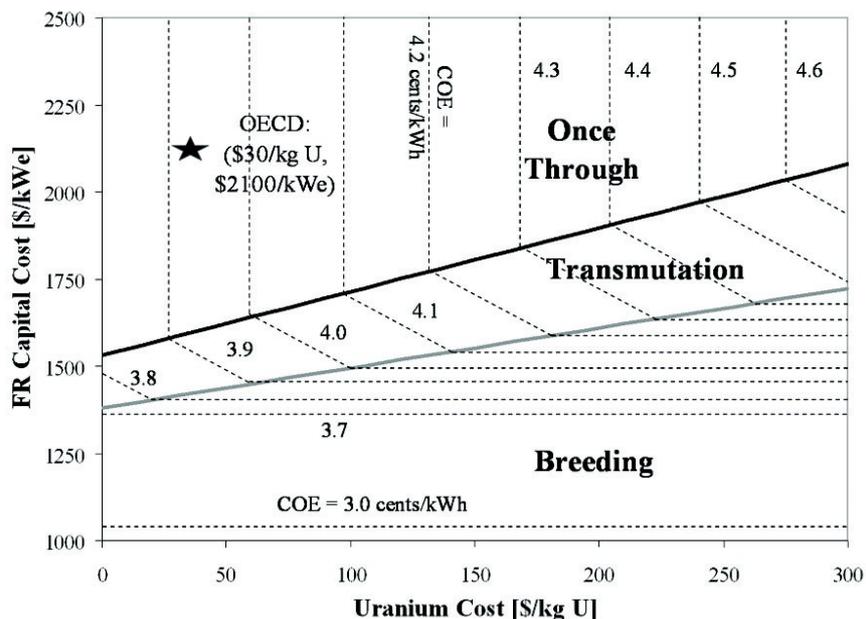


Рис.4: Стоимость электроэнергии (СЭ) в зависимости от затрат на строительство РБН и от цены урана. Преобразование и воспроизводство, использующие все более растущую часть продвинутой технологии производства электроэнергии, становятся конкурентоспособными только в том случае, если затраты на строительство их технологий уменьшатся на 25%. При сохранении всех остальных констант цены на уран должны повыситься на 1000%, чтобы перспективные топливные циклы стали конкурентоспособными.

По оси X отложены цены на уран (в долларах за кг), а по оси Y – капитальные затраты на строительство РБН [в долларах на кВт(э)].

Подписи на рисунке (слева направо и сверху вниз): СЭ = 4.2 цент/кВт-час; Звездочкой отмечен вариант ОЭСР с «координатами» 30 долларов за кг урана и 2100 долларов за кВт(э); Однократный топливный цикл; Преобразование; Воспроизводство; СЭ = 3.0 цент/кВт-час.

Приведенная в докладе ОЭСР цена удаления ОЯТ может иметь высокую степень неопределенности, поскольку крупномасштабное геологическое захоронение ОЯТ еще не достигнуто. Действительно, собственные оценки адекватности расходов Министерством энергетики показали, что для Юкка Маунтин они выросли (в ценах 2000 года) с 34.4 миллиардов долларов в 1980 году до 60.1 миллиардов долларов в 2001 году⁶¹. Независимые оценки, проведенные штатом Невада в 1998 году, определили затраты в 57.6 миллиардов долларов⁶².

Другой фактор, влияющий на затраты по удалению, связан со временем, которое требуется для хранения ОЯТ перед удалением. Желательно иметь некоторое время для хранения в наземных установках, чтобы охладить ОЯТ. Оценки затрат предполагают, что этот срок составляет 12 лет для ОЯТ от ЛВР. Дополнительное хранения ОЯТ в разбросанных наземных установках (особенно если это заранее не запланировано) повлияет на конечные оценки.

Исходная точка из доклада ОЭСР на Рис.6 (она обозначена звездочкой) предполагает своевременное удаление ОЯТ, что согласуется с увеличением цены на 0.01 цента за кВт-час. Тем не менее, недавний опыт подтвердил, что предварительные неопределенности не

⁶¹ DOE Office of Civilian Radioactive Waste Management, "Analysis of the Total System Life Cycle Cost of the Civilian Radioactive Waste Management Program." DOE/RW-0533, 2001.

⁶² Planning Information Corporation, Thompson Professional Group, Decision Research Institute. "An Independent Cost Assessment of the Nation's Nuclear Waste Program." <http://www.state.nv.us/nucwaste/trans/pic2/2piccovr.html> .

столь велики, чтобы направить энергетические компании или правительство на путь преобразования или воспроизводства. Рис.6 демонстрирует также, что уменьшение средств на переработку само по себе недостаточно для ориентирования ядерной экономики на преобразующее или воспроизводящее будущее. Оценка ОЭСР для стоимости контрактов по переработке ОЯТ от оксида урана (800 долларов за кг) основана на опыте реактора La Hague. Эта оценка также страдает неопределенностью. ОЭСР полагалась на недавние опыты по распространению методики расчетов на французский реактор La Hague и английский реактор Thorp, где затраты на строительство выросли до 8200 и 6400 долларов на кг за год производства, соответственно⁶³, а также сослалась на опубликованные контрактные цены за обслуживание, как соответствующие ее ожиданиям⁶⁴.

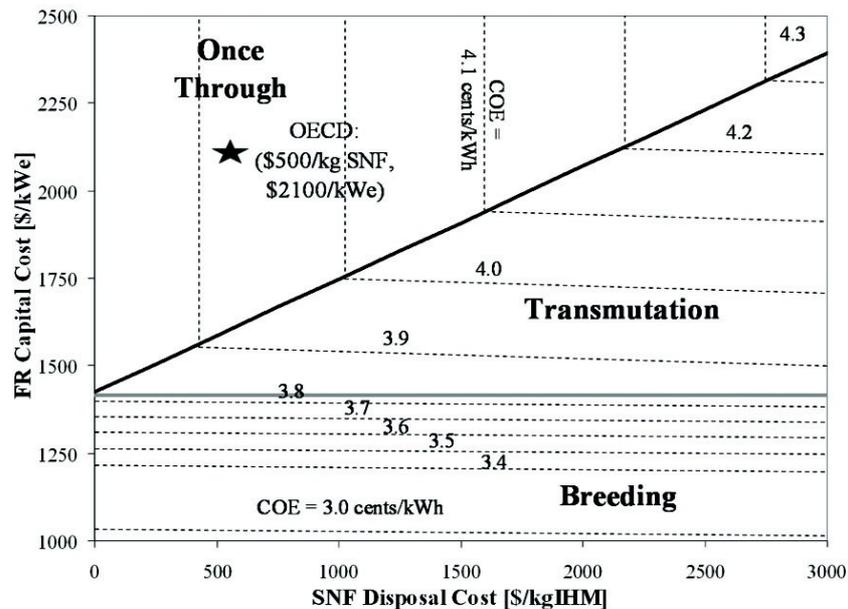


Рис.5: Стоимость электроэнергии как функция капитальных затрат на строительство РБН и затрат на удаление ОЯТ. Четырехкратное возрастание цены удаления отходов, к которому продвинутые топливные циклы менее чувствительны, чем однократной топливный цикл (ОТЦ), приведет к изменению экономики ОТЦ на экономику преобразования. Более вероятное изменение может произойти при незначительном сокращении капитальных расходов на строительство РБН, сопровождаемом небольшим увеличением затрат на удаление. Все надписи на рисунке такие же, что на Рис.4 за исключением того, что теперь по оси X отложена цена удаления ОЯТ (в долларах за кг ИТМ). Эта же цена теперь приведена для исходной точки, отмеченной звездочкой (500 долларов за кг ОЯТ).

В приведенном ниже перечне суммируются возможные действия, способствующие принятию рынком перспективных (преобразование и воспроизводство) топливных циклов в качестве замены однократному циклу. Последовательность изложения выбрана в соответствии с ожидаемым уменьшением вероятности такого события.

1. Капитальные затраты на РНБ уменьшаются на 20-30% в результате накопления опыта и экономии. Это может быть подстегнуто развертыванием поддерживаемой прави-

⁶³ National Research Council, Committee on Separation Technology and Transmutation Systems, "Nuclear Wastes: Technologies for Separation and Transmutation." NAS Press, 1996.

⁶⁴ Существуют доказательства, что оценки ОЭСР могут быть слишком оптимистичными. Например, прогноз по стоимости сооружения другой крупной установки для переработки в Роккашо (Япония) в середине 90-х годов составлял 7300 долларов/кг (смотрите [63]). Но в действительности запланированные сроки строительства (восемь лет) почти удвоились, так что завод оказался готовым к работе только в начале 2006 года. Затраты на строительство утроились по сравнению с ранними оценками: всего 20.8 миллиардов долларов или 25000 долларов за кг/год.

тельством программы преобразования или энергичным выполнением концепции четвертого поколения.

2. Затраты на развертывание хранилищ окажутся выше исходных значений, представленных ранее, в четыре раза. С учетом того, что широкомасштабное удаление обработанного топлива еще не было продемонстрировано, такую возможность нельзя отбросить.
3. Затраты на обращение с топливом (переработка и изготовление топлива) для замкнутых циклов значительно улучшаются по сравнению с исходными значениями. Улучшения, требуемые этими исходными значениями, очень велики для данной созревшей технологии.
4. Стоимость урановой руды возрастает, грубо говоря, на порядок величины до примерно 300 долларов за кг, что сравнимо с оценкой расходов по извлечению урана из морской воды⁶⁵. Вероятность достижения такой цены кажется слишком отдаленной^{66,67}.

Комбинация этих факторов окажется более вероятной, чем проявление любого одного в единственном числе. С учетом того, что обсуждавшиеся ранее изменения топливного цикла всегда оказывались крупномасштабными, сокращение капитальных затрат на РБН до уровней, соответствующих ЛВР, похоже, окажется обязательным. Условия, по которым преобразование станет оптимальным выбором, всегда оказываются промежуточными между однократным топливным циклом и воспроизведением. Поэтому правдоподобно ожидать, что этот топливный цикл, использующий многие из тех же установок, что и экономика воспроизводства, но в меньшем масштабе, первым выйдет на рынок. Такая гипотеза предполагает скорее эволюционное, а не радикальное изменение в технологии, а с учетом зрелости нашего понимания реакторов деления она, возможно, окажется хорошей.

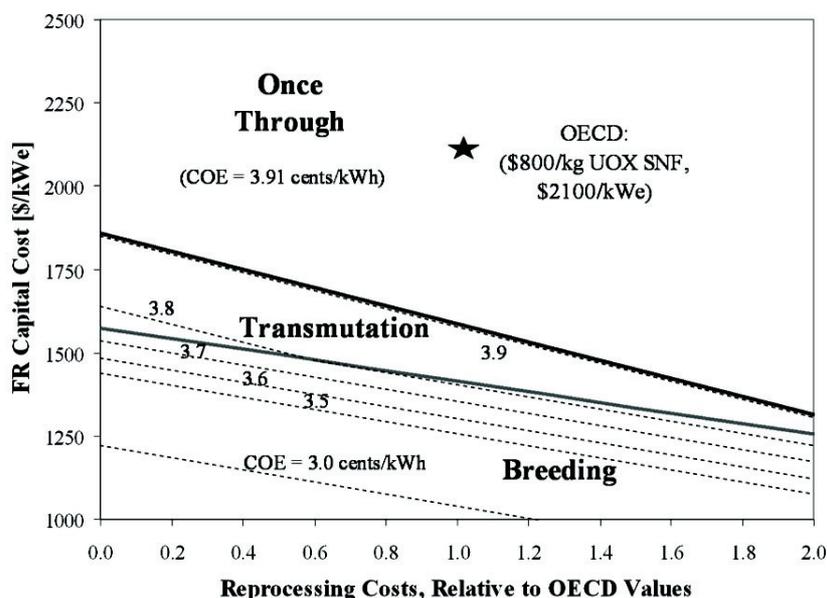


Рис.6: Стоимость электроэнергии как функция капитальных затрат на РБН и затрат на переработку. Затраты на переработку топлива от ЛВР или РБН изменяются по отношению к исходным значениям ОЭСР. Переработка дает слишком малый вклад в СЭ, чтобы продвигаться к границе между ядерной экономикой ОТЦ и ядерной экономикой, основанной на переработке.

По оси X отложены затраты на переработку в относительных единицах к исходному значе-

⁶⁵ Смотрите [8], 210.

⁶⁶ E. A. Schneider, "A Survey of Uranium Supply Curve Estimates." *Trans. Ann. Nucl. Soc.* 92 (June 2005).

⁶⁷ W. C. Sailor and E. A. Schneider, "Long Term Uranium Supply Issues and Estimates" LA UR-05-8879, to be submitted to *Nuclear News* 2006.

нию ОЭСР. Это значение составляет 800 долларов за кг ОЯТ и отмечено звездочкой. Остальные обозначения те же, что на Рис.4 и 5.

Другие, менее количественные факторы будут влиять на способность к развертыванию таких «продвинутых» технологий. Для характеристики стратегий, принимаемых государствами и так же мыслящими надгосударственными группировками, использовался социологический анализ⁶⁸. Иерархические формации, которые характеризуются высокой степенью восприятия формального центрального управления и согласием с технической элитой, более вероятно будут отдавать предпочтение таким топливным циклам, которые в значительной степени опираются на перспективные технологии. Примерами таких формаций служат Франция, Япония и, возможно, развивающиеся азиатские экономики. Очень вероятно, что конкретные страны или региональные группировки могут пойти по путям, указанным в каждом из трех сценариев, которые были рассмотрены ранее вместе с указанием уже доказуемо достигнутого состояния дел. Одним из переменных параметров в экономических расчетах, который повлияет на развитие технологии, является норма учетной ставки.

Норма учетной ставки

Качество исследований и разработок, приводящих к развертыванию жизнеспособных с экономической точки зрения топливных циклов, будет зависеть от нормы учетной ставки. Решения, влияющие на удаление отходов, часто цитировались в соответствии с политикой глобального потепления, будучи внедренными в нее по своей природе, и поэтому подчинены анализу рентабельности с использованием социальных норм учетной ставки. Смит⁶⁹ рекомендует использование ставки свободного риска прибыли, а Нордхауз⁷⁰ выбрал значение 6% годовых и Клайн⁷¹ принимал значения в диапазоне 1.5–5%. Кроме того, Эрроу⁷² цитировал цифры в диапазоне 3-4%, в то время как Административно-финансовое управление Конгресса США обычно применяет ставку в 7% независимо от характера вопросов.

Итак, анализ рентабельности предлагает указания, которые скрашены в какой-то степени произвольным выбором ставки учетного процента. В настоящее время такой анализ используется Японским институтом разработки ядерного цикла (ЯЯЦ)⁷³ для руководства разработкой политики НИОКР, направленных на крупномасштабное развертывание установок с быстрыми нейтронами. В этом исследовании рассматривается японская ядерная экономика, которая в конечном итоге будет состоять из воспроизводящих реакторов на быстрых нейтронах (ВРБН) с полной производительностью 70 ГВт(э). Выгоды от развертывания ВРБН, состоящие в основном в снижении СЭ и ослаблении требований к импорту ресурсов, сравниваются с затратами на НИОКР, которые связаны с доведением этого проекта до осуществления. Речь идет о 50 миллиардов йен/год (500 миллионов долларов/год) на период 2000-2030 годов⁷⁴. Анализ выяснил, что «...некоторая выгода будет получена от вложений НИР для

⁶⁸ G. I. Rochlin, "Nuclear Power Options: A Cross-Cultural Perspectives." *Ann. Rev. Energy and Environment* 19, 1994, 153.

⁶⁹ V. K. Smith, "Substitution and Social Discount Rates." in *Discounting and Intergenerational Equity*, P. Portney and J. Weyant, eds. (Resources for the Future, Washington, DC, 1999).

⁷⁰ W. D. Nordhaus, "An Optimal Transition Path for Controlling Greenhouse Gases." *Science*, 1315-1319, (1992) 258.

⁷¹ W. R. Cline, *The Economics of Global Warming* (Institute for International Economics, Washington, DC, 1992).

⁷² R. Arrow, "Intergenerational Equity and the Rate of Discount in Long-Term Social Investment." IEA World Congress, December 1995.

⁷³ H. Shiotani, N. Yasumatsu, Y. Shimoda, and K. Ono, "Development of the Cost Benefit Analysis Methodology for FR Cycle Research and Development." JNC Technical Report.

⁷⁴ Это можно сравнить с оценками затрат на НИОКР для системы четвертого поколения, где этапы доказательства жизнеспособности и проверки эксплуатационных качеств стоят около миллиарда долларов плюс еще «несколько миллиардов» на постройку демонстрационного предприятия. В США такое финансирование предоставляют федеральные агентства: в 1999 году на исследовательские и прикладные НИОКР было выделено 4.332 миллиардов долларов. Из этого количества 131.4 миллионов долларов пошло на ядерную энергетику – НИОКР

цикла РБН». Но было обнаружено, что остается значительная неопределенность, связанная с будущими выгодами от такой системы. По крайней мере, надо рассматривать другое соображение: норма учетной ставки, использованная в этой работе, должна стать субъектом анализа на чувствительность.

В анализе используется норма учетной ставки 2%. На этом уровне современное значение (все дальнейшие цифры даются в долларах 2000 года) фиксированных выгод, начинающихся в 2030 году и продолжающихся безгранично, потребует 11.2 миллиардов долларов при расходовании 500 миллионов долларов в год за период с 2000 года по 2030 год, чтобы оказаться оправданным. Это соответствует годовому бюджету 397 миллионов долларов, начиная с 2030 года. ЯЯЦ прогнозирует гораздо более высокий доход, превышающий миллиард долларов в год. Но если выбрать норму учетной ставки 7%, а не 2%, можно будет получить совершенно иное заключение относительно рентабельности исследований. При норме учетной ставки 7% доход в 397 миллионов долларов, начинающийся в 2030 году, будет стоить только 798 миллионов долларов, если пересчитать к 2000 году. Получение такой выгоды, в свою очередь, оправдывает расходование только 64 миллионов долларов в год за период с 2000 года по 2030 год. Такие разные нормы учетной ставки (причем обе тщательно оправданы в литературе) проявляются в расходах на НИОКР, которые различаются в восемь раз. Можно представить трудности при выделении ограниченных ресурсов на НИОКР в такой обстановке. Здесь наилучшим средством для анализа окажется многовариантная модель, уравнивающая риски и признающая, что усилия по НИОКР часто служат для разделения между моделями.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ В СЦЕНАРИЯХ РОСТА

Здесь обсуждаются три типа угроз распространения, связанных с ядерной энергетикой и кратко изложенных на примере случаев из недавней истории. Они таковы – национальная хитрость, национальный прорыв и приобретение материалов для ядерной взрывчатки крупной группировкой внутри какой-нибудь страны. Ниже рассматриваются некоторые средства для уменьшения таких угроз.

Хитрости проявляются, когда страна предпринимает амбициозную программу производства ядерных материалов, служащих для мирных целей, но секретно планирует использовать инфраструктуру для оружия. Производство плутония в Индии, Израиле и Северной Корее служит примером такого жульничества. Среди этих стран только Индия обладает серьезной мирной ядерной программой в дополнение к своей военной программе.

Прорыв может произойти, когда страна переводит часть своей гражданской ядерной инфраструктуры в военную инфраструктуру во время кризиса или после политических перемен. Страны, обладающие непроверенными вариантами для таких действий, можно назвать «ядерными трезвенниками». Существует, по крайней мере, десяток таких стран, и они отмечены тем, что никогда не создали ядерное оружие⁷⁵. Это наблюдение, как кажется, противоречит наихудшим опасениям первых защитников контроля над вооружениями, что распространение будет ограничено только технической доступностью. В действительности же период наибольшего роста ядерной энергетике по всему миру (в конце 70-х годов и в течение 80-х годов) отмечен замедлением распространения ядерного оружия⁷⁶. Трезвенники просто обнаружили, что проще и дешевле не делать ядерного оружия. Некоторые страны могли зависеть от союза с ядерными державами, что оказалось основным сдерживанием ядерных угроз. Отсюда следует парадоксальный вывод, что *должны* быть отдельные ядерные страны, чтобы контролировать распространение. Продолжающее существование клуба трезвен-

по делению и термоядерным проблемам, а также расходы на исследования Ядерной регулятивной комиссии США по вопросам безопасности и надежности. Сюда не включены деньги, номинально выделенные на исследования по ядерной энергетике, но фактически потраченные на проекты очистки и выходы из строя. US Energy Information Administration, "Federal Energy Market Interventions 1999: Primary Energy." 2000.

⁷⁵ A. E. Levite, "Never Say Never Again: Nuclear Reversal Revisited." In *New Global Dangers, Changing Dimensions Security*, M. E. Brown, O. R. Cote, Jr., S. M. Lynn-Jones, and S. E. Miller., eds., M.I.T. Press, 2004.

⁷⁶ S. M. Meyer, *The Dynamics of Nuclear Proliferation*, University of Chicago Press, London, 1984.

ников будет также зависеть от продолжения и усиления международного режима контроля над вооружениями⁷⁷. Существует немного технических барьеров для прорыва у трезвенников – реальные барьеры носят экономически и политический характер. Ключом для ослабления побуждений к прорыву служит уменьшение ожидаемой ядерной угрозы со стороны других стран.

Всеобщее международное или региональное соглашение может помочь смягчению напряжения. В случае Японии и Южной Кореи угроза накладывается бедной ресурсами, развивающейся страной Северной Кореей (КНДР), которая нуждается в увеличении поставок энергии. В 1994 году две эти страны согласились оплатить сооружения ядерной электростанции в КНДР в качестве исключительной меры для успокоения руководства КНДР и продолжения процесса улучшения отношений между тремя странами и США. При ядерном расширении, как изложено в нашей статье, развивающимся странам будут поставляться энергетические реакторы в рамках, аналогичных Согласованной рамочной договоренности с КНДР. Принимающая сторона должна будет заморозить свои действия и в конечном итоге отказаться следовать по ядерному пути, не находящемуся под гарантиями МАГАТЭ, чтобы получить энергетические реакторы. Всеобъемлющие и полномасштабные гарантии МАГАТЭ должны быть введены в действие. Такие соглашения удалят также любые возможности скрытых действий с целью разработки программы реакторов двойного назначения; соглашения должны быть подготовлены так, чтобы уменьшить потенциалы жульничества и прорыва. В то время, как однократный топливный цикл (наиболее практичный в настоящее время) может оказаться подходящим для такого соглашения, ряд технологий, участвующих в преобразовании и воспроизводстве, кажутся более проблематичными.

Технические решения, полученные ядерной энергетикой текущего поколения, могут побудить террористов или представителей конфликтных региональных групп к приобретению ядерного оружия.

Построение ядерных циклов таким образом, чтобы сделать затруднительной кражу террористами или криминальными организациями, не зависит от любой ожидаемой угрозы централизованного перевода делящихся материалов на оружейные цели. Только по одной этой причине неодобрение производства любого разделенного делящегося материала, пригодного для оружия, должно быть установлено во всем мире в качестве атрибута ядерного расширения. Следует предоставить высокий приоритет универсальному укреплению мер стойкой физической безопасности в странах над своими ядерными материалами. Но мир не может полагаться только на институциональные меры, например, на вооруженную охрану, для защиты делящихся материалов, потому что проблема социальных беспорядков имеет тенденцию к возникновению в любой части света в то или иное время. Например, хотя Япония и Франция являются одними из наиболее стабильных стран в мире, некоторые районы в этих странах находились в состоянии хаоса в течение нескольких лет последнего столетия. Неодобрение создания крупных запасов материалов, имеющих оружейное применение, в любой стране является страховкой от такого хаоса⁷⁸.

РЕЖИМ

Мохаммед Эль Барадей – директор МАГАТЭ, призвал к более строгому соблюдению «Дополнительного протокола», позволяющего проводить инспекции с повышенной степенью ознакомления с чувствительной информацией. Он предложил, чтобы не было условий для выхода из Договора о нераспространении и чтобы был заключен международный договор о контроле над экспортом ядерной технологии⁷⁹. Кроме того, он сделал несколько предложений по поводу новых рамок для нераспространения: разделенный плутоний и ВОУ (высокообогащенный уран) можно производить только под многосторонним контролем; существую-

⁷⁷ R. J. Einhorn, "Will the Abstainers Reconsider?" and R. M. Campbell, "Reconsidering a Nuclear Future: Why Countries Might Cross over to the Other Side." In *The Nuclear Tipping Point: Why States Reconsider Their Nuclear Choices*, K. M. Campbell, R. J. Einhorn, and M. B. Reiss. Eds., (Brooking Institute Press, 2004).

⁷⁸ W. C. Sailor, *The Case Against Reprocessing*, Forum for Applied Research and Public Policy, 1999, 112.

⁷⁹ M. ElBaradei, "Saving Ourselves from Self-Destruction," *New York Times*, February 12, 2004.

щие установки, работающие на ВОУ, будут в максимально возможных объемах переводиться на НОУ (уран с низким уровнем обогащения); все новые ядерные установки должны быть устойчивы к распространению; многосторонние установки для хранения и удаления отработанного топлива должны создаваться по соглашениям; должен быть заключен новый Договор по сокращению делящихся материалов.

Установки для преобразования и воспроизводства, использующие современные технологии, могут существовать в рамках предложений директора МАГАТЭ только под международным контролем. Причина того, что таким установкам отказано в национальном контроле, не связана с тем, что они обязательно несут в себе риск распространения в конкретной стране, например, во Франции, которая даже может оказаться ядерной державой. Основная причина запрещения национальных установок в том, чтобы охарактеризовать их в качестве потенциальной части оружейной инфраструктуры, и поэтому рассматривать такие страны (например, КНДР), сооружающие одну из подобных установок, как нарушителей. Международный охват, по-видимому, приведет к большей однородности мер по защите делящихся материалов, к предотвращению доступности делящихся материалов для криминальных групп в нестабильных странах. Режим такого типа, какой предложен Эль Барадеем, легче представить при всеобщем одобрении однократного топливного цикла. Хотя указанный режим требует более ограниченного набора установок топливного цикла, им согласно плану Эль Барадея, скорее всего, также придется находиться под международным контролем или обладать техническими барьерами для предотвращения переделок с целью изготовления ВОУ. Недавний иранский опыт предупредил мир, что он может быть вынужден следить за такими национальными установками. Будущие установки для лазерного разделения можно будет прятать еще более легко.

Предложения Эль Барадея, взятые только сами по себе, не являются путем вперед. Но Дейч и др.⁸⁰ недавно предложили инициативу, обеспечивающую гарантии и побуждения странам, согласным с этим предложением. Оно называется «Инициативой гарантийного обслуживания ядерного топлива» (ИГОЯТ) и направлено на те страны-«пользователи», которые не имеют средств обогащения, переработки или других установок ядерного цикла, но развертывают или желают развертывать реакторы. «Пользователи» будут иметь на время работы реактора гарантированный доступ к ядерному топливу и им обеспечивается гарантированное удаление отработанного топлива. Такие услуги будут предоставляться по рыночным ценам несколькими специально отобранными «странами топливного цикла». В свою очередь, пользователи будут гарантировать, что не будут добиваться установок по обогащению или других технологий топливного цикла. Очевидно, что большинство стран-пользователей, будучи небольшими потребителями ядерной энергии, убедятся в следующем: разработка и развертывание собственных установок топливного цикла окажутся дороже, чем получение того же от стран топливного цикла, обладающих хорошо развитой крупномасштабной инфраструктурой.

Из нашего экономического анализа вариантов топливного цикла следует, что программу ИГОЯТ следует начинать только с открытым топливным циклом. Страны топливного цикла будут поставлять топливо в виде НОУ и получать обратно только отработанное топливо. Если не произойдут крупные экономические перемены, нехватка установок у поставщика, поддерживающих топливный цикл, который основан на переработке топлива, не повредит росту ядерной энергетики.

ИГОЯТ будет критиковаться по тем же причинам, что и Договор о нераспространении, скорее за его дискриминационный характер, чем за отсутствие различия между участниками⁸¹. Договор о нераспространении специально выделяет пять стран в качестве законных владельцев ядерного оружия. Поэтому Индия, скорее всего, никогда не подпишет Договор о нераспространении и по тем же причинам не вступит в ИГОЯТ без серьезных изменений международных режимов контроля над вооружениями и безопасности⁸². Киотский протокол

⁸⁰ J. Deutch, E. Moniz, and A. Kantner, "Making the World Safe for Nuclear Energy. Survival (Winter 2004).

⁸¹ R. H. Williams and H. A. Feiveson, "How to Expand Nuclear Power Without Proliferation." *Bulletin of Atomic Scientists* 46(3): (1990) 40-45.

⁸² Истинно не дискриминационный ядерный режим, вероятно, потребует в первую очередь полного удаления ядерного оружия. Некоторые («безопасные») ядерные функции можно бу-

также выглядит как дискриминационный, поскольку развитые страны могут лучше приспособиться к введению дорогих технологий альтернативной энергии для уменьшения выбросов углерода, а развивающиеся страны не могут. Руководители развивающихся стран ощущают необходимость в расширении использования ископаемого топлива для экономического роста и создания лучших условий жизни своим народам. По этой причине Индия вряд ли подпишет Киотский протокол или любое другое соглашение в рамках РКИК, которое появится в ближайшие годы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Появившийся недавно прогноз, предсказывавший стоимость электроэнергии в размере 6.4 цент/кВт-час, оказался удивительно точным, хотя и наблюдались отклонения масштаба ± 2 цента или хуже. Плюс или минус вытекают из структурных различий конкретных стран в отношении стоимости рабочей силы и бюрократических усложнений.

Утверждается, что сейчас существуют свободные от углерода источники энергии с минимальными загрязнениями воздуха или требованиями к использованию земли, которые можно расширять для будущих нужд. Наши сценарии, которые соответствуют сценариям энергетического роста ВЭС/МИПСА, предсказывают, что стоимость ядерного электричества, вероятно, значительно не изменится при будущем выборе топливного цикла или при росте потребности. Можно ожидать медленного и постепенного набора опыта, чтобы только слегка сократить в будущем затраты на ядерную энергетику. Только радикально новый тип реактора, значительно более дешевый, чем имеющиеся в настоящее время электростанции на ЛВР, сможет значительно улучшить конкурентоспособность ядерной энергии среди технологичной энергетики, свободной от углерода.

Представленные в этой статье детальные расчеты показывают, что топливные циклы с преобразованием или воспроизводством вряд ли станут экономически предпочтительнее однократного топливного цикла. Короче говоря, наиболее осуществимая перспектива для преобразования или воспроизводства стать конкурентом однократного топливного цикла заключается в том, чтобы капитальные затраты на РБН стали на 20-30 % меньше значений, предсказываемых сейчас экспертами, то есть, чтобы РБН стали дешевле ЛВР. Это произойдет только после значительных правительственных вложений в НИОКР, но без гарантий, что вложения окупятся. Более того, схемы учетных ставок, применяемые в ряде стран для оправдания бюджетов НИОКР, кажутся, до некоторой степени, произвольными и могут способствовать неоправданным расходам.

Другой прорыв в компромиссе топливных циклов, который более неправдоподобен, возникнет, если затраты на пространство в хранилищах окажутся более крупными, нежели предполагается сейчас. Это будет иметь неблагоприятные последствия, так как сделает ядерную энергетику во всех случаях менее привлекательной, чем неядерные альтернативы. Другие потенциальные будущие разработки, способные повлиять на компромисс, например, заметное понижение стоимости переработки или значительное повышение цен на урановую руду, представляются очень маловероятными.

Рассмотренное в статье развитие ядерной энергетики могло бы произойти в обстановке сильно окрепших институциональных рамок. Однократный топливный цикл представляется непосредственно наиболее совместимым с такими рамками. Кое-кто может поспорить, что уровень международного сотрудничества, необходимый для управления ядерным распространением, слишком высок, чтобы позволить расширение ядерной энергетики. Но отказ от ядерной энергии в США или в Евросоюзе не остановит распространение и, по-видимому, даже не замедлит его. Вместо этого у нас есть возможность разработать новый интегрированный глобальный режим управления углеродом. Мирная ядерная энергия станет стимулом для этого режима.

дет позволить отдельным странам, но не другим («опасным»), как уже предлагалось в 1946 году планом Ачесона-Лилиенталя. Международное агентство должно было контролировать все действия, которые считались опасными с точки зрения распространения. Все энергетические реакторы, существующие сегодня, по плану 1946 года рассматривались как «опасные», но такой план, конечно, никогда не был осуществлен.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Методология определения баланса затрат и материалов и результаты

Мы применяли для оценок сценариев модель VEGAS, основанную на программе MATLAB™. VEGAS просматривает изменяющийся во времени парк реакторов и оценивает баланс материалов и экономику на квазиравновесной основе в течение каждого года на весь срок прогноза. Баланс материалов установки конкретизирован: прослеживаются потоки урана, плутония, малочисленных актинидов и продуктов деления.

VEGAS создает реакторный парк на основе порождаемых извне требований к ядерной энергии. Если установка прекращает работу или повышенные требования делают необходимыми дополнительные мощности, VEGAS выбирает их из набора имеющихся технологий на основе доступности материалов и помещает в производственную линию. Например, если имеются в распоряжение ЛВР с топливом на УОКС или СОКС, а также ВРБН, использующий в качестве топлива ОЯТ от ЛВР-СОКС, то VEGAS поначалу попытается создать установку на быстрых нейтронах. Если окажется, что недостает ОЯТ от ЛВР-СОКС для обеспечения РБН на полный срок деятельности, такая заявка отвергается и создается ЛВР. Этот реактор пользуется СОКС-топливом, если имеется достаточно ОЯТ от УОКС-топлива, причем в сценарий заносится уведомление о том, в какой степени активная зона ЛВР заполнена СОКС-топливом. Если в конкретном году нет запасов ОЯТ от УОКС для переработки, ЛВР полностью работает на УОКС-топливе. Такая методология обеспечивает уверенность в том, что в рамках некоторых ограничений (например, производительность установки для переработки или подготовки топлива) развертывание установок для преобразования оптимизировано.

Для отдельной конкретной установки расход материалов подсчитывается из простого баланса масс. Если полная тепловая мощность равна P (Мвт), выгорание топлива к моменту выгрузки составляет V (МВт.день/кг), а коэффициент использования реактора равен α (доля дней в году, когда реактор производит энергию), то масса M загруженного и выгруженного материала в течение данного года, составляет в среднем $M = 365\alpha P/V$. Состав этого материала определяется массами составляющих компонентов при загрузке и разгрузке. Массовые доли, приведенные в Табл.А1, взяты из открытой литературы^{52,58,83}. Такой подход по своей природе является сильно обобщенным: он объединяет плутоний и малочисленные актиниды от всех источников в одну глыбу материала. Изотопный состав плутония, извлеченного из ЛВР, очень отличается от плутония, полученного от сжигающего РБН. Хотя это различие принималось во внимание при выводе балансов материалов для каждого типа реактора, количественная информация о содержании изотопов не сохранена в нашей модели. Этот подход считается скорее общепринятым, чем наоборот, и применялся в программах, разработанных Министерством энергетики США для систем ядерной энергетики⁸⁴.

Экономические оценки приводились с использованием усредненной методологии, представленной в докладе ОЭСР (1994) по экономике циклов ядерного топлива⁵⁵.

Когда такая методология становилась неполной при обращении к капитальным расходам, мы переходили к докладу МТИ⁵ 2003 года. Капитальные затраты на строительство реактора списываются за время работы установки, а фиксированные операционные расходы и затраты на обслуживание оцениваются пропорционально капитальным затратам, что моделируется увеличением фиксированного роста оценок капитальных затрат на 4%. Для топливного цикла начальные затраты дисконтируются до того времени, когда начинается выработка электроэнергии. Фиксированный рост цен, использованный для оценки затрат на реактор и начало топливного цикла, составил 11 %. Расходы на завершающих этапах топливного цикла оплачиваются из фонда погашения с предполагаемой в этом исследовании нормой рентабельности, находящейся на уровне свободы от риска и составляющей 2 %. В Табл.2А подведены итоги затрат на важнейшие этапы цикла, а также приведены сроки запаздывания

⁸³ E. E. Morris and M. A. Smith, "Development of Low Conversion Ratio Fast Reactors for Transmutation." Argonne National Laboratory Report ANL-AAA-057, 2002.

⁸⁴ L. Van Den Durpel, A. M. Yacout and D. Wade, "Development of Integrated Systems Dynamics Model for the Sustainability Assessment of Nuclear Energy." In Proc. GLOBAL, 205, Kyoto, Japan, 2005.

и опережения, использованные при оценке затрат. Отрицательные значения сроков в таблице указывают на то, что сроки приведены до момента загрузки топлива, в положительные – до момента после выгрузки. Для процессов в конце цикла, где происходит переработка, задержка зависит от времени T, когда происходит переработка.

Табл. А1. Баланс материалов и операционные параметры для различных типов реакторов.

	ОЯТ от ЛВР	ЛВР-УОКС	ЛВР-СОКС	ВТГР-УОКС	РБН (КК 0.25)	РБН (КВ 1.2) ¹
1)	-	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
2)	33	60	60	130	180	123
3)	-	0.36	0.36	0.48	0.42	0.42
4)	-	6	6	3	4	4
5)	-	5	5	4	3	3
6)	-	10.0	0.9	36.2	0	0
7)	-	6.2	0	28.5	0	0
8)	1.0000	1.0000	0.8780	1.0000	0.4250	4.0000
9)	0	0	0.1140	0	0.5190	0.2290
10)	0	0	0.0080	0	0.0560	0.0150
11)	0.9560	0.9247	0.8509	0.8440	0.3860	3.9150
12)	0.0090	0.0119	0.0762	0.0230	0.3670	0.2740
13)	0.0008	0.0016	0.0122	0.0050	0.0430	0.0150

1) Коэффициент использования времени работы реактора;

2) Выгорание в единицах МВт-день/кг;

3) Тепловая эффективность² в единицах МВт(э)/МВт(т);

4) Время нахождения топлива в реакторе в годах;

5) Минимальное время охлаждения отработанного топлива в годах;

6) Количество естественного урана в единицах кг/кгИТМ (исходный тяжелый металл);

7) Количество единиц разделения SWU на кг ИТМ;

8) Количество урана при загрузке в единицах кг/кгИТМ;

9) Количество плутония при загрузке в тех же единицах;

10) Количество малочисленных актинидов (МА) при загрузке³ в тех же единицах;

11) Количество урана при разгрузке в тех же единицах;

12) Количество плутония при разгрузке в тех же единицах;

13) Количество МА при разгрузке⁴ в тех же единицах.

Примечания:

¹ Для воспроизводящего реактора на быстрых нейтронах поток массы на входе и выходе включает в себя массы активной зоны (одна часть) и зон воспроизводства (три части).

² Потери электрической мощности в сети принимаются равными 2 % для всех установок.

³ В состав МА при загрузке входит нептуний, сохранившийся от реакторов с топливом из смеси оксидов урана и плутония. Для РБН с КК=0.25 для учета изменений состава поступающего топлива состав МА может отличаться от приведенной величины, но содержание плутония не меняется.

⁴ Содержание плутония и МА при разгрузке приводится с учетом периодов полураспада.

Приведенные в Табл. А2 данные выражены в долларах 2000 года; они взяты из наиболее поздних доступных публикаций⁵⁸. Даже на таком сильно обобщенном уровне литературе нет четкого согласия по технологическим затратам по стоимости установок, особенно по тому, что связано с РБН. Изменения в балансе материалов и в методологии оценок приводят к небольшим различиям в стоимости электроэнергии (СЭ) между данной работой и докладом ОЭСР (2002), где предсказывалась СЭ 3.80 цент/кВт-час, а в нашей работе эта величина равна 3.93 цент/кВт-час.

Табл. А2. Затраты и характерные сроки.

Позиция	Сроки (годы)	ЛВР-УОКС	ЛВР-СОКС	ВТГР	РБН
Капитальные затраты (\$/кВтэ)	-4 ¹	1700	1700	1700	2100
Естественный уран (\$/кг)	-2.5	30			
Обогащение (\$/SWU)	-2	90			
Изготовление топлива (\$/кгИТМ)	-1	250	1100	260	3000
Перевозка топлива (\$/кгИТМ)	Примечание ²	50			
Хранение/охлаждение ОЯТ (\$/кгИТМ)	2	100			
Переработка (\$/кгИТМ)	T*	800	2000	800	4000
Удаление ОЯТ (\$/кгИТМ)	12	500	н/д	500	н/д
Остекловывание ОВА ³ (\$/кгО-ВА)	T*	580			
Удаление ОВА (\$/кгОВА)	T* + 2	1000			
Примечания:					
¹ Дается в годах до начала производства электроэнергии.					
² Транспортные расходы берутся в течение полугода до загрузки топлива и затем в течение всего срока до переработки или удаления.					
³ ОВА – отходы с высокой активностью.					
н/д – нет данных					