

АТОМНАЯ ЭНЕРГИЯ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ: ПЕРЕСМОТРЕННАЯ СТРАТЕГИЯ ЯПОНИИ

Лоуренс М. Лидски, Марвин М. Миллер

РЕЗЮМЕ

Во время периода быстрого роста ядерной энергетики общие предположения, относящиеся к запасам урана и техническим возможностям, привели большинство индустриальных стран к примечательно похожим стратегиям развития ядерной энергетики. Более 40 лет назад эти общие предположения легли в основу выбора легководного ядерного реактора (ЛВР) как энергетического реактора ближайшего будущего, за которым должен был последовать, так быстро, как возможно, ядерный реактор-размножитель на быстрых нейтронах (РРБН). РРБН, в котором при той же мощности расходуется гораздо меньше урана, чем в ЛВР, представлял собой основную часть стратегии, поскольку запасы урана считались скудными. Эта стратегия, основанная на ЛВР, производящих начальное топливо для РРБН, неявно включает в себя переработку отработанного топлива, повторное использование плутония, и утилизация выделенных отходов в геологических хранилищах. Страны с ограниченными местными энергетическими ресурсами, и, прежде всего, Франция и Япония, проявили особую приверженность к этой стратегии.

С течением времени, стало ясно, что у технологии, связанной с этой стратегией, имеются серьезные проблемы. Более важным, однако, стало постепенное понимание того, что уран представляет собой широко распространенный ресурс, с большими и недорогими земными запасами, и с практически неистощимыми морскими запасами, доступными по ценам, которые оказывают минимальное влияние на отпускную цену атомной электроэнергии.

Основным оправданием выбора технологии ЛВР/БРБН была предсказанная резкая нехватка урана в ближайшем будущем (т.е., до 1990 года). Этот выбор, однако, не был сделан из-за того, что стало известно, что другие конструкции ядерных реакторов и другие топливные циклы обладают значительными преимуществами в отношении безопасности, экономичности, устойчивости к распространению ядерного оружия, и энергетической безопасности. ЛВР дорог, обязательно сложен из-за своей зависимости от стратегии «глубокой обороны» для минимизации риска серьезных аварий, и сравнительно строг по отношению к ошибкам. Разработка конкретной конструкции РРБН, которая была выбрана для того, чтобы справиться с предсказанной краткосрочной нехваткой, РРБН, охлаждаемого жидким металлом (натрием) (ЖМРРБН), встретила с многочисленными неожиданными техническими проблемами и оказалась неспособной удовлетворить многим из первоначальных целей проекта. Переработка и повторное использование топлива, необходимая для топливного цикла ЛВР/РРБН, сложна и неэкономична по сравнению с одноразовым топливным циклом ЛВР, создает многочисленные потоки отходов, и существенно увеличивает риск несанкционированного использования топливного цикла для приобретения ядерного оружия¹.

¹ Связь между ядерной энергетикой и ядерным оружием включает как использование мирной программы в качестве прикрытия собирания ресурсов для отдельной, тайной оружейной программы, так и захват применимых для оружия материалов, таких, как плутоний, странами-изгоями и субнациональными группами.

Эта статья первоначально была представлена как статья на рабочем совещании PARES: Энергетическая безопасность в Японии, Токио, Япония, 13 июля 1998 года.

Письменную корреспонденцию направлять по адресу: Marvin M. Miller, E-38-600, Massachusetts Institute of Technology, 292 Main St., Cambridge, MA 02139. Адрес электронной почты: marvmill@mit.edu

Профессор Лидски скончался 1 марта 2002 года.

М. Миллер работает в центре международных исследований и департаменте ядерной технологии Массачусетского технологического института, Кембридж, Массачусетс.

В результате учета этих факторов, Соединенные Штаты и другие страны, которые сделали крупные вложения в разработку и размещение атомной энергии, оставили путь ЛВР/РРБН для энергетической безопасности, и возвратились к ЛВР как к будущему источнику энергии. Япония отказалась следовать по этому пути из-за ее почти полной зависимости от импортируемого топлива. Даже если бы не было проблемы энергетической безопасности, значительные капиталовложения Японии в атомную энергетику выступали бы против внезапного изменения ее долгосрочных планов опираться на атомную энергетику в значительной части своих потребностей в электроэнергии. Однако, имеется простая и экономичная многоэтапная стратегия, которая гарантирует продолжающийся вклад ядерного сектора на базе ЛВР в энергетическую безопасность Японии в ближайшем и среднесрочном будущем при обеспечении долгосрочной энергетической безопасности и экономического выигрыша за счет добавления типов реакторов, которые обладают потенциалом более легкого локального развертывания и значительным экспортным рынком. Эта стратегия включает исследования и разработку реакторов, которые могут обеспечить высокотемпературное тепло процесса, позволяя таким образом атомной энергии играть большую роль в обеспечении энергетической безопасности и поставок.

Предлагаемая краткосрочная и среднесрочная стратегия основана на накоплении достаточных количеств природного или низкообогащенного (реакторного качества) урана для обеспечения непрерывной эксплуатации установленного парка реакторов ЛВР в одноразовом цикле на протяжении по крайней мере нескольких десятилетий. Расходы на такой «страховой запас» будут в основном, если не полностью, скомпенсированы экономией от перенаправления расходов на реакторы-размножители на исследования и разработку реакторов, работающих в одноразовых циклах с увеличенной безопасностью, пониженным образованием долгоживущих отходов, высокой эффективностью, и потенциалом тепла для обработки.

Необходимость разработки, и, окончательно, развертывания новых конструкций реакторов возникает не только по соображениям, относящимся к поставке урана. Даже при обеспеченной доступности топлива, «монокультурный» парк ЛВР представляет собой источник опасности, из-за невозможности демонстрации в реальном испытании того, что безопасность, основанная на «глубокой обороне», может предотвратить катастрофические аварии. Характерные просчеты, как реальные, так и подозреваемые, могут привести к пониженной доступности, или даже к выключению всего парка. Эта возможность становится все более важной помехой для роста ядерного сектора. Таким образом, имеется сильный стимул для разработки фундаментально отличных типов реакторов, которые могут быть развернуты без возникновения таких опасений по безопасности. Такие реакторы могут скорее получить преимущество от технического прогресса в конструкции реакторов и систем преобразования энергии, который произошел после выбора технологии ЛВР почти 50 лет назад. Модульный реактор с газовым охлаждением с газотурбинным преобразованием энергии, например, предлагает повышенную безопасность, возможность тепла для обработки, и потенциал очень прибыльного экспортного рынка². Парк разнообразных реакторов обеспечит энергетическую независимость будут ли доступны внешние источники урана, или нет.

Продолжающаяся опора на атомную энергию для выработки электричества и тепла в долгосрочной перспективе должна быть обеспечена доступностью добываемого в больших количествах из морской воды урана при стоимости, которая имеет лишь небольшое влияние на стоимость производства атомной энергии. Несмотря на то, что исследования добычи урана из морской воды начались более 30 лет назад в Англии³, именно исследования и разработки, проводившиеся в Японии, установили техническую и экономическую реализуемость технологии⁴. Гарантированная доступность урана по разумно низким и предсказуемым це-

² Экспортный рынок ЛВР ограничен из-за высокой капитальной стоимости больших блоков и требований, которые накладываются этой сложной технологией на общественную инфраструктуру для ее безопасной эксплуатации.

³ R. V. Davies et al., "Extraction of Uranium from Seawater," *Nature* 203 (1964): 1110.

⁴ К сожалению, эта работа, которая включает теоретические исследования, лабораторные испытания, и эксплуатацию опытного завода, не очень хорошо известна, даже в ядерном сообществе, за пределами Японии, в основном из-за того, что большинство публикаций были написаны по-японски. Например, последние океанские испытания усовершенствованных ад-

нам способствует разработке реакторов, оптимизированных по таким показателям, как демонстрируемая безопасность, сопротивляемость к распространению, и производство тепла, без компромиссов, требуемых повторным использованием и размножением.

ВВЕДЕНИЕ

Парадигматическая система атомной энергии ЛВР/РРБН была задумана в Соединенных Штатах более 50 лет назад, и вскоре получила статус «Официальной технологии», с результирующей сильной государственной поддержкой, предпочтительным допуском к капиталам, и захватом зависящего от пути преимущества⁵. Подход ЛВР/РРБН быстро стал доминирующим, чему помогал его статус «Официальной технологии» и агрессивный и субсидируемый государством маркетинг. ЛВР быстро начали вносить существенный вклад в производство энергии в США и других индустриализованных странах и РРБН стали одной целью усилий по разработке.

Однако, после очень быстрого расширения в период 1970-1990 г.г., быстрый рост атомной энергетики существенно замедлился; в некоторых странах, установленные ядерные мощности фактически начались сокращаться. В целом, доля атомной энергии в общемировом производстве электроэнергии, 17 % в 1996 г., начала сокращаться, и текущий экономический кризис в Азии не сулит ничего хорошего для роста в регионе, где ожидался быстрый рост⁶. Положение двух других компонент парадигмы ЛВР/РРБН, реактора-размножителя и повторного использования плутония, даже еще хуже. США и Германия прекратили свои программы реакторов-размножителей. Французское правительство недавно объявило о том, что реактор-размножитель «Суперфеникс» электрической мощностью 1200 МВт будет демонтирован, в то время как японский демонстрационный реактор, «Монджу», остается выключенным в течение после двух лет после аварии с потерей натрия. Ситуация с вторичным использованием плутония как топлива со смешанными окислами (МОХ) в ЛВР: действующие контракты выполняются, но МОХ-топливо не популярно ни у операторов реакторов, ни у общественности.

Атомная энергия, в своем настоящем воплощении, не дожидая до своих великих обещаний. Фундаментальный вопрос состоит в том, является ли такой провал внутренне присущим и неотвратимым, или, возможно, другие технические реализации ядерных энергетических систем смогут удовлетворить экономическим и политическим требованиям общества. Имеются хорошие основания предположить, что другие варианты применения ядерной энергетической технологии позволят атомной энергии сыграть более важную роль в поставках энергии и в энергетической безопасности. Текущая схема ЛВР/РРБН является, в конце концов, только одним из многих фундаментально различных путей эксплуатации атомной энергии. Она была выбрана в ответ на политические и военные условия, существовавшие около 1950 года, на основании тогдашних предположений в отношении доступности урана и ископаемого топлива, и предсказываемых расходов, связанных как с РРБН, так и со связанной технологией переработки. В то время считали, что поставки урана являются критически недостаточными, что цены на ископаемое топливо в скором времени резко возрастут, что атомная энергия станет основным источником энергии, и что расходы на РРБН, и на их топливный цикл, на самом деле будут меньше, чем для ЛВР. Все эти предположения оказались неверными. В настоящее время лучшее понимание реальной ситуации и повышение технических возможностей сделали возможной разработку более ясной идеи о надлежащей роли атомной энергии в поставках энергии, и для разработки технических вариантов, которые оптимизируют требуемые характеристики.

сорбентов урана были представлены в работе T. Sugo, "Status of Development for Recovery of Uranium from Seawater," *Bulletin of Seawater Science of Japan* 51 (1997): 20.

⁵ Steven M. Cohn, *Too Cheap to Meter: An Economic and Philosophical Analysis of the Nuclear Dream* (Albany, NY: State University of New York Press, 1997). В главе 3 и 5 описывается история и преимущества статуса «Официальной технологии» для атомной энергии. В главе 6 обсуждается потеря статуса «Официальной технологии» и влияние этого на ядерную программу США.

⁶ Для оценок МАГАТЭ смотри J. Kupitz, "Rationale for Thorium Introduction" (Advisory Group Meeting on Thorium Fuel Perspectives, Vienna, Austria 16–18 April 1997).

ИСТОРИЯ – РАЗВИТИЕ ДО ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ

Ядерные реакторы разрабатывались секретно в течение первого десятилетия атомной эры (1945 – 1955 г.г.) в национальных лабораториях нескольких стран, под контролем военных. Первые реакторы с топливом из природного урана использовались для производства плутония для использования в оружии. Вскоре после этого США решили использовать реактор с топливом из обогащенного урана и с охлаждением обычной водой для двигателя подводной лодки. В господствующей атмосфере холодной войны разработка подводных лодок с ядерной энергетикой имела весьма высокий приоритет. ЛВР под давлением был выбран как реактор подводной лодки среди нескольких конкурентов, потому что в нем использовалась «знакомая» технология (жидкая вода и пар) и потому что он мог обеспечить очень высокую плотность энергии.

Когда в 1953 г. программа «Атомы для мира» привела в действие гонку за ведущую роль в области гражданской атомной энергии, и США потребовалась быстрая реакция для того, чтобы противостоять британской (коммерческой) и советской (пропагандистской) угрозам, ЛВР стал очевидным выбором. Исследования по использованию реакторов для гражданского производства энергии хотя и были широко распространенными, все еще находились на поисковой стадии, и ни одна другая конструкция реакторов в США не была так быстро готова к развертыванию.

У ЛВР много особенностей, говорящих в его пользу. Он получил преимущества от продолжающихся исследований и разработок в программе ВМС для судовых двигателей, и были изготовители, знакомые с требуемой технологией. В нем использовался обогащенный уран, который был (временно) монополией США, и поэтому давал американским производителям важное конкурентное преимущество по отношению к потенциальным конкурентам (Франции, Англии, и Советскому Союзу). Гегемония США в этой области еще более усилилась благодаря серии двусторонних «Соглашений о сотрудничестве», в которых США предоставляло кредитные фонды, которые могли быть использованы только для покупки оборудования, материалов (включая обогащенный уран), и технических услуг у продавцов из США⁷. Это усилило статус официальной технологии ЛВР в большинстве стран западного блока.

Хотя ЛВР занял привилегированную позицию благодаря политической ситуации, у него имелись значительные недостатки, многие из которых были очевидными с самого начала. У него была низкая термодинамическая эффективность с небольшим потенциалом для увеличения. Выгорание топлива было ограничено. Он значительно сильнее реагирует на механические или эксплуатационные ошибки, чем такие конкурирующие конструкции, как реактор с расплавленными солями, или реактор с газовым охлаждением. Необходимая сложность ЛВР (требуемая для предоставления «глубокой обороны») подразумевает «экономии масштаба», такую, что он может быть экономически конкурентоспособен, если вообще может, только при очень больших размерах. Эти недостатки достаточно очевидны, чтобы показать, что ЛВР были плохим выбором для того, чтобы играть центральную роль в стратегиях ядерного производства. Его недостатки терпели только из-за того, что ЛВР первоначально предназначался только для временного применения, и должны были быть в основном заменены реакторами-размножителями к 1990 году.

Разработка реакторов-размножителей была наиболее важной задачей ученых, занятых как в военном, так и гражданском секторе разработки атомной энергии. Существовало распространенное мнение, что уран является весьма ограниченным ресурсом, настолько ограниченным, что было бы серьезно затронуто производство оружия, и значительное гражданское применение было бы невозможным⁸. Защитники атомной энергии видели себя участниками гонки со схемами производства энергии из ископаемого топлива, и поэтому им требовался путь довольно быстрого увеличения количества атомных электростанций для завоевания доли рынка и после этого поддерживать ожидаемый очень быстрый рост спроса на электроэнергию. Но требовался не просто любой реактор-размножитель. Из-за ожидаемого

⁷ 7. I. C. Bupp, J.-C. Derian, 1997. *Light Water: How the Nuclear Dream Dissolved* (New York: Basic Books): 15–41.

⁸ 8. J. G. Morone, E. J. Woodhouse, *The Demise of Nuclear Energy?: Lessons for Democratic Control of Technology* (New Haven: Yale University Press, 1989): 29–34.

быстрого роста мощностей атомных станций, было бы недостаточно размножение со скоростью, способной просто восполнить выгоревший делящийся материал. Нужна была «фабрика топлива», которая должна была производить достаточно избыточного плутония не только, чтобы поддерживать саму себя, но и одновременно производить достаточно добавочного плутония для того, чтобы служить источником загрузки быстро растущего парка аналогичных реакторов.

Мерой способности выполнения функции «фабрики топлива», не только как самоподдерживающегося реактора, является «время удвоения»⁹ и только ЖМРРБН, по крайней мере теоретически, возможность достичь достаточно короткого времени удвоения. ЖМРРБН лучше всего работает с начальной загрузкой плутония для начала процесса размножения, которое может быть обеспечено извлечением плутония из отработанного топлива ЛВР, с использованием методов и установок, аналогичных тем, которые были разработаны в оружейной программе.

Таким образом, считалось, что комбинация ЛВР/ЖМРРБН предоставит наиболее быстрый путь к самоподдерживающемуся ядерному циклу. Даже тогда, когда стало ясно, что доступность урана не ограничит рост ядерной энергетики, Комиссия США по атомной энергии (КАЭ), а позднее и Министерство энергетики США (МЭ), оставалась полностью привержена начальному плану, используя как стратегические, так и экономические аргументы против любой альтернативы видению будущего в схеме ЛВР/ЖМРРБН. В 1969 г. Милтон Шоу, директор отделения КАЭ по разработке и технологии реакторов, в предисловии к исследованию альтернативных реакторов-размножителей, писал:

«Широко распространенное восприятие легководных реакторов является установленным фактом. Масштабное участие промышленности и технические усовершенствования должны привести к дальнейшему повышению эксплуатационных характеристик. Эти факторы осложняют внедрение в США любой новой системы, даже если появятся указания на потенциальную экономическую выгоду. Из-за неотложной необходимости внедрения реакторов-размножителей в как можно более ранние сроки КАЭ включилось в широкую программу, включающую ЖМРРБН. По этой причине, фонды для разработки конкурирующих концепций ограничены. Возможная роль таких реакторов в экономике атомной энергии в США поэтому неясна¹⁰». [курсив добавлен]

Степень непреклонной государственной поддержки такого видения будущего атомной энергии подтверждается оценкой КАЭ 1973 г. (!), по которой в 2000 г. США должны были получать половину своей электроэнергии от 400 реакторов-размножителей и 600 ЛВР¹¹. После 1973 г. был заказан только 41 реактор, и от каждого из них впоследствии отказались, так же, как от примерно 70% из тех, которые были заказаны после 1970 г.¹² В 1998 г. имелось 103 лицензированных установки, все из которых были ЛВР, и ожидается, что в следующем десятилетии их число значительно сократится.

Промышленность коммунальных услуг США также выступала на раннее внедрение ЛВР. В 1970 г. вице-президент компании Дженерал Электрик, вспоминая причины решения предлагать продаваемые с убытком электростанции «под ключ», которые начали массовое рас-

⁹ Временем удвоения называется время, необходимое для удвоения количества доступного делящегося материала в предположении того, что весь делящийся материал используется как топливо для размножителя так быстро, как он станет доступным в подходящей форме. Время удвоения должно учитывать время, проведенное в активной зоне реактора, время, проведенное в переработке и в повторном изготовлении, так же, как и любые другие необходимые периоды выдержки для распада отработанного топлива перед переработкой. Факторы, благоприятствующие короткому времени удвоения, включают эффективное использование нейтронов, высокую удельную мощность, и быструю повторную переработку отработанного топлива. Все эти факторы повышают риск и стоимость системы ЛВР/РРБН.

¹⁰ M. Shaw, *An Evaluation of Alternate Coolant Fast Breeder Reactors* (USAEC document WASH-1089, April, 1969): Предисловие.

¹¹ William Lanouette, "Nuclear Power in America: 1945–1985," *The Wilson Quarterly*, 9:5 (Winter 1985): 90–133 (cited on page 120).

¹² U.S. Department of Energy, *Commercial Nuclear Power, 1991* (DOE/EIA-043891).

ширение ядерной энергетики в США, говорил:

«Если мы не сможем получить заказы от промышленности коммунальных услуг, с каждым ударом часов, будет становиться все более вероятным, будет разработана какая-нибудь другая конкурирующая технология, которая превзойдет экономическую значимость нашей. Наши люди понимали, что идет игра с высокими ставками, и что если мы не заставим промышленность коммунальных услуг принять эти станции, то мы в конце концов останемся ни с чем.»¹³

Стратегия быстрого наращивания мощности ЛВР, сопровождаемого столь же быстрым переходом к опоре на ЖМРРБН обладала неотразимой технической логикой. Она обладала также привлекательной экономической логикой для участников из промышленности, которые стремились начать получать прибыль от своих огромных капиталовложений в ядерную технологию¹⁴. К сожалению, как в США, так и у тех, кто последовал за американским лидером, оба логических анализа оказались неверными из-за того, что лежащие в основе аксиомы и предположения были неправильными.

Цена, уплачиваемая сейчас за эти ошибки, огромна, как в финансовых потерях, так и в потерянных возможностях. Финансовые потери практически невозможно рассчитать, и их назвали самой большой управленческой катастрофой в истории бизнеса¹⁵. Более того, даже в тех странах, где такая стратегия в конце концов провалилась, ЛВР, из-за своего статуса «Официальной технологии», сдерживали разработку и внедрение более безопасных и дешевых атомных электростанций, которые могли использовать преимущества современной технологии и были лучше приспособлены к современным ограничениям и специфическим нуждам различных стран.

ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ ПАРАДИГМЫ ЛВР/РРБН В АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

Стоимость и сложность систем, необходимых для противостояния опасности серьезных аварий делает ЛВР плохим выбором для крупных центральных электростанций. По иронии, именно высокая плотность энергии в ЛВР, основная причина, по которой они были выбраны для применения в подводных лодках, стала их ахиллесовой пятой. Даже 10-секундный перерыв в подаче охлаждающей воды к топливному стержню приводит к локальному перегреву и неотвратимому каскадному повреждению активной зоны реактора. В результате ЛВР должен опираться на глубокую оборону, систему разнообразных и избыточных запасных устройств для защиты от таких событий. Эта методика широко используется, но глубокая оборона сама по себе не может гарантировать абсолютной безопасности, она может только сократить вероятность серьезной аварии. Все атомные электростанции, из-за их стоимости и потенциалу ущерба за пределами площадки, обладают весьма низкой «приемлемой» вероятностью аварии. Чем крупнее станция, тем ниже приемлемая вероятность аварии. Поскольку последствия аварии на станциях гигаваттного масштаба так велики, ЛВР вынуждены использовать сложные системы безопасности, которые обещают беспрецедентную, и, возможно, недостижимую, низкую вероятность аварии.

В первых ЛВР использовались системы глубокой обороны, которые были рассчитаны для достижения вероятности аварии в 10^{-4} за год, или менее (т.е., ожидаемое среднее время между крупными авариями, такими, как расплавление активной зоны, должно составлять для отдельного выбранного реактора по меньшей мере 10 000 лет). Это является обычно принимаемым уровнем риска для промышленных установок с высокой капитальной стоимостью с точки зрения защиты инвестиций. Однако, это является совершенно неадекватным с точки зрения общественной безопасности в случае ядерных реакторов¹⁶. В результате требуется, чтобы у всех реакторов имелся удерживающий корпус для защиты населения, по-

¹³ Steven M. Cohn, ссылка [5], стр. 32.

¹⁴ Там же, стр. 73–74.

¹⁵ James Cook, "Nuclear Follies" *Forbes*: 135(3) (Feb. 11, 1985): 82–100.

¹⁶ Кумулятивный риск для населения зависит от размера парка реакторов. Для ста реакторов, у каждого из которых вероятность крупной аварии равна 10^{-4} за год, общая вероятность аварии будет составлять 10^{-2} за год.

мимо сложных устройств безопасности высокого промышленного уровня. Очевидно, разумно иметь такой дополнительный уровень защиты для новой технологии с возможными неожиданными аварийными режимами с в основном плохо понимаемыми последствиями. Считается, что результирующий риск крупной аварии с последствиями для здоровья населения для заданного реактора не превышает 10^{-6} за год, причем основную роль в предотвращении последствий аварии играет удерживающий корпус. Такая конфигурация имела полный смысл для первого поколения ЛВР с электрической мощностью 200-400 МВт, но она стала коварной ловушкой для следующего и последующих поколений более крупных реакторов.

Сложность систем безопасности глубокой обороны приводит к независимым от размера расходам, которые легче перенести, когда расходы поддерживаются доходами от более крупной станции. Этот фактор, в совокупности с масштабной экономикой парогенераторов и турбин, и более сложная, чем ожидалось, конкуренция с дешевым ископаемым топливом, привела к очень быстрому росту размеров ЛВР. Но при электрической мощности, не превышающей 500 – 600 МВт, инженеры больше не могут гарантировать целостность системы удержания¹⁷¹⁷. До тех пор, пока не стало слишком поздно изменить планы развития, не было понято, что невозможность создания удерживающего корпуса, который может противостоять крупной аварии в таких больших реакторах, нарушает начальную концепцию безопасности. Поскольку удерживающий корпус нельзя принимать в расчет, безопасность населения должна полностью обеспечиваться глубокой обороной. Это означает, что для самого реактора следует добиваться вероятностей аварии 10^{-6} за год, или среднего времени между крупными авариями в миллион лет, не рассчитывая на любой дополнительный вклад корпуса в безопасность. Этот беспрецедентный уровень безопасности системы глубокой обороны при приложении к такой сложной системе, как ядерный реактор, означает, что сама система безопасности должна быть исключительно сложной, что требует ее интенсивного обслуживания, и, в результате, гораздо более устойчивой к проблемам, чем то устройство, которое она защищает. В результате станции с ЛВР являются дорогими, сложными, трудными в эксплуатации, и неспособными одновременно конкурировать с ископаемыми топливами и достигать желаемого уровня безопасности. Все эти проблемы связаны, по крайней мере, частично, с опорой на глубокую оборону. Однако, несмотря на все внимание, уделяемое системе безопасности, общественность остается не убежденной в безопасности, за которую платится такая высокая цена. Этот скептицизм хорошо обоснован, поскольку не имеется достаточных данных для того, чтобы рассчитать истинную вероятность крупной аварии и буквально невозможно продемонстрировать в определенном испытании, что был достигнут заявленный уровень безопасности.

ЖМРРБН с натриевым охлаждением являлся устройством, которое было предназначено для замены ЛВР, когда разработка залежей урана станет слишком дорогой. ЖМРРБН был выбран среди других конструкций реакторов-размножителей, потому что он, теоретически, мог обеспечить очень короткие времена удвоения топлива, меньшие, чем у любой другой конкурирующей конструкции реактора. Временем удвоения называют время, требующееся для производства избыточного топлива, равного количеству, первоначально требующемуся для загрузки реактора. Другим словами, за одно время удвоения можно накопить топливо, требующееся для запуска другого реактора. При отсутствии добычи урана, как полагали, только короткое время удвоения могло позволить ядерной энергетике расти достаточно быстро, чтобы конкурировать с альтернативными источниками энергии.

К сожалению, теоретические преимущества ЖМРРБН не были достигнуты на практике. Успешный коммерческий реактор-размножитель должен обладать тремя свойствами; он должен размножать, он должен быть экономичным, и он должен быть безопасным. Хотя при надлежащей конструкции можно добиться по отдельности одного или даже двух из этих свойств, законы физики очевидно делают невозможным достижения всех трех целей одновременно, независимо от того, насколько хорошей будет конструкция. Фундаментальная проблема заключается в свойствах натрия, которые делают возможным малое время удвоения. Физические характеристики натрия и плутония таковы, что потеря натриевого охладителя в центре активной зоны реактора-размножителя (вызванная, например, перегревом) приводит к увеличению мощности реактора, что удаляет из активной зоны еще больше натрия, и еще более увеличивает мощность реактора в контуре с положительной обратной

¹⁷ J. G. Morone, E. J. Woodhouse, см. ссылку [8], pp. 78–82.

связью. Получающееся быстрое и практически неконтролируемое увеличение мощности реактора является очевидно неприемлемым с точки зрения безопасности. С этим эффектом, так называемым «положительным коэффициентом реактивности», можно бороться, например, изменяя форму активной зоны так, чтобы активную зону покидало больше нейтронов, но это немедленно ухудшит потенциал реактора по отношению к размножению. Безопасность и размножение являются взаимно антагонистичными. Эту ситуацию можно изменить, делая радикальные изменения конструкции, но такие изменения сопровождаются резким ростом стоимости, что делает реактор слишком дорогим.

Даже если бы ЖМРРБН мог удовлетворить своим первоначальным, весьма оптимистичным, целям эксплуатации, и энергетический цикл ЛВР/РРБН был введен в действие, не очевидно, что цели энергетической безопасности были бы достигнуты. Как будет обсуждаться в последующих разделах, необходимые меры для защиты всех частей топливного цикла от терроризма, будут обладать очень высокой социальной ценой. Таким же важным является возрастающий риск случайной или сознательной технической аварии. По сравнению с легководными реакторами, работающими в одноразовом топливном цикле, топливо для реакторов-размножителей является намного более сложным и уязвимым к ошибкам. Из этого следует большая вероятность того, что вся ядерная система или ее значительная часть может быть выключена из-за общей проблемы, например, из-за загрязнения натрия в реакторах, или из-за аварии на заводах по переработке или изготовлению топлива, которые обслуживают систему.

КРУПНОМАСШТАБНОЕ РАЗВЕРТЫВАНИЕ РЕАКТОРОВ-РАЗМНОЖИТЕЛЕЙ

Стандартная логическое обоснование энергетической безопасности для развертывания реакторов-размножителей в странах с небольшими внутренними запасами урана, таких, как Япония, основывается на их малых требованиях по загрузке урана, примерно в 100 раз меньших, чем для ЛВР той же самой мощности, работающем в одноразовом топливном цикле. Аргументом является то, что это делает основанную на реакторах-размножителях систему поставки неуязвимой для возможных перерывов в поставках и связанной с ними угрозы стабильности общества, которая может сопровождать недостаток электроэнергии. Однако, эта точка зрения на энергетическую безопасность является слишком узкой. Имеются общественный риск, связанный с развертыванием реакторов-размножителей, которая перевешивает преимущество независимости от поставок урана, и может даже ухудшить ситуацию. Ниже мы обсудим риски распространения ядерного оружия, терроризма, и аварий, связанных с топливным циклом реакторов-размножителей, и затем наметим стратегию энергетической безопасности, основанную на реакторах-преобразователях (в основном ЛВР, в течение нескольких следующих десятилетий), работающих с одноразовыми топливными циклами, которые минимизируют эти риски.

Для того, чтобы получить количественную оценку потенциального масштаба развертывания реакторов-размножителей в стране, такой, как Япония, мы предположим, что использование атомной энергии является одним из компонентов энергетической стратегии, предназначенной для минимизации риска парникового эффекта. Чтобы быть конкретными, мы предположим, что будущее развертывание атомных станций в Японии будет согласоваться со сценарием системы поставки энергии с низким выделением двуокси углерода и активным использованием атомной энергии (LEES), разработанным межправительственной рабочей группой по климатическим изменениям (IPCC)¹⁸. Этот сценарий основывается на приблизительном 10-кратном росте общемировой электрической атомных станций от 330 ГВт в начале 1990-х г.г. до 3 300 ГВт в 2100 г.

В Японии правительство недавно объявило планы сокращения выброса углекислого газа за счет строительства 20 дополнительных ядерных реакторов в начале следующего столетия. Это увеличит электрическую мощность установленных атомных станций примерно до 70 ГВт по сравнению с текущими 40 ГВт. В соответствии с опирающимся на ядерную энергетику сценарием LEES, мы консервативно предположим, что в 2100 году произойдет дальнейшее увеличение мощности атомных станций до 100 ГВт. Если эти мощности будут со-

¹⁸ H. Ishitami et al., "Energy Supply Mitigation Options," chapter 19 in *Climate Change 1995*, eds. R. T. Watson et al. (Cambridge, Eng.: Cambridge University Press, 1996).

стоять из жидкометаллических реакторов-размножителей на быстрых нейтронах (ЖМРРБН) обычной конструкции, то связанный с ними поток плутония составит приблизительно 200 тонн в год.

Распространение ядерного оружия

Основной проблемой здесь является то, что топливный цикл реакторов-размножителей включает очень большие потоки плутония, которые, поскольку они не связаны с продуктами деления, могут быть обработаны непосредственным химическим способом в пригодные к оружию ядерные материалы. Если активная зона реактора-размножителя и отработанное топливо в оболочке перерабатываются вместе, то топливо будет содержать большое количество изотопов плутония с четным массовым числом по сравнению с плутонием «оружейного качества», традиционно используемым в ядерном оружии. С самого начала атомной эры имелись значительные противоречия о пригодности плутония реакторного качества для ядерного оружия. Однако, тот факт, что такой плутоний может быть использован для изготовления ядерного оружия любого уровня технической сложности, был недавно раскрыт Министерством энергетики США¹⁹. В частности, субнациональные группы могут изготовить бомбы деления первого поколения, используя 5-10 кг плутония реакторного качества, которые будут обладать гарантированной мощностью в одну или несколько килотонн, и, на другом конце сложности конструкции, технически развитые государства могут создать двухступенчатое термоядерное оружие, используя еще меньшие количества этого материала.

Таким образом, очень большие потоки плутония, связанные с крупномасштабным развертыванием реакторов-размножителей приводит к серьезному риску отвлечения для оружия как государствами, так и субнациональными группами. Это вряд ли можно назвать новой идеей: неадекватность режима нераспространения, который основан только на международных инспекциях ядерных предприятий, для предотвращения государственного отвлечения материалов, пригодных для оружия, отмечалась еще в докладе Ачесона-Лилиенталя 1946 г., который стал основой для плана Баруха для международного контроля, представленного США в ООН в том же году.

Не существует перспектив безопасности от атомного оружия в системе международных соглашений по запрещению такого оружия, контролируемых только системой, полагающейся на инспекции и аналогичные полицейские методы. Причины, поддерживающие этот вывод, являются не столько техническими, но, в первую очередь, непреодолимые политические, социальные, и организационные проблемы, связанные с вводом в силу соглашений между нациями, которые могут свободно развивать атомную энергию, но только обещают не использовать бомбы... До тех пор, пока действительно опасная деятельность (т.е., производство и использование пригодных для оружия материалов, таких, как плутоний и высокообогащенный уран) будет проводиться странами, соперничество будет неизбежным, и будут порождаться опасения, которые наложат на систему международного ввода в силу полицейскими методами столь большого давления, что никакой уровень изобретательности или технической компетентности, по-видимому, не сможет справиться с ними²⁰.

Теперь, с ростом поддержки цели глобального ядерного разоружения, высказанной в статье VI договора о нераспространении ядерного оружия (ДНЯО), этот вывод так же очевиден, как в 1946 г. В самом деле, имеется широко распространенное мнение, которое разделяется даже многими сторонниками атомной энергии, о том, что риск появления ядерного оружия в мире, где такое оружие запрещено, но атомная энергия широко распространена, будет слишком велик, если вся «опасная деятельность», такая, как переработка отработанного топлива, не будет сосредоточена в «ядерных парках», в которых обеспечивается как

¹⁹ *Nonproliferation and Arms Control Assessment of Weapons-Useable Fissile Material Storage and Excess Plutonium Disposition Alternatives*. (U.S. Dept. of Energy, DOE/NN-0007, 1997): 37–39.

²⁰ *A Report on the International Control of Atomic Energy* (Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office, March 16, 1946).

строгая физическая безопасность, так и международные гарантии, и что она, в сильном отличие от существующей практики, будет находиться под международным или многонациональным контролем.

Предположительно, такая организация сократит риск распространения на страну-хозяина, так и субнациональное отвлечение. Но какими будут последствия для энергетической безопасности такой страны, как Япония?

Очевидно, что ответ будет зависеть от специфических институциональных решений, которые будут определять управление предприятием²¹. Однако, свобода действий индивидуальных стран обязательно будет в некоторой степени ограниченной: это, в конце концов, является основным обоснованием постановки чувствительных ядерных предприятий под международный или многонациональный контроль. Рассмотрим, например, большой многонациональный завод по переработке топлива, такой, как завод с производительностью в 1000 тонн отработанного топлива реакторов-размножителей, расположенный в Японии, который обслуживает все японские реакторы-размножители, скажем, 100, так же, как и несколько дополнительных блоков в других странах Восточной Азии. В случае, например, обнаружения Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ) большого количества неучтенного материала, или серьезной аварии, организация, ответственная за эксплуатацию завода, вполне может принять решение о закрытии завода до тех пор, пока источник неучтенного материала или причина аварии не будут определены и не будут предприняты действия по исправлению. Однако, японское правительство, вероятно, будет противостоять передаче решений, касающихся прекращения работы предприятия, которое является критичным для ее поставок атомной энергии, органу, который не находится под его контролем.

Ядерный терроризм

Последствия для энергетической безопасности мер, которые могут быть сочтены необходимыми для борьбы с угрозой субнационального отвлечения очень малой доли плутония, связанного с крупномасштабным развертыванием реакторов-размножителей, будут еще более серьезными. Учитывая потенциальные катастрофические последствия такого отвлечения, например, взрыв грубой бомбы деления, изготовленной из 5-10 кг плутония реакторного качества может вызвать гибель людей и разрушения от ударной волны на площади, более, чем в 60 раз большей, чем недавний взрыв в Оклахома-Сити в США²². Будет трудно возражать против применения жестких, возможно, драконовских мер, в первую очередь, для предотвращения таких отвлечений, и, если они не принесут успеха, для поиска и возвращения плутония, прежде чем они будут использованы в оружии.

Опасения того, что такие меры окажут отрицательное влияние на гражданские свободы граждан демократических государств и могут вызвать значительное напряжение в обществе. До появления планов крупномасштабного разделения и использования плутония в ядерном топливном цикле целью опасений по гражданским свободам были меры безопасности для предотвращения саботажа на коммерческих ядерных реакциях с возможным высвобождением большого количества радиоактивности. Однако, именно крупномасштабное применение плутония, со связанным с ним транспортом материала, который представляет наилучшую возможность для негосударственных противников, например, террористов или криминальных организаций, работающих вместе с недовольными сотрудниками для получения пригодного для оружия ядерного материала, заставило рассмотреть, и, возможно, применить дополнительные меры безопасности с потенциально большим влиянием на граждан-

²¹ Подробное обсуждение технических, экономических, и институциональных проблем, относящихся к организации и эксплуатации международных или многонациональных центров топливного цикла, можно найти в *International Arrangements for Nuclear Fuel Reprocessing*, eds. A. Chayes and W. B. Lewis (Cambridge, MA: Ballinger, 1977).

²² В 1995 г. бомба в грузовике, в которой содержалось около двух тонн хлоридной взрывчатки низкого качества, разрушила здание федеральных учреждений Меррей в Оклахома Сити, штат Оклахома, что привело к смерти 168 человек. Множитель, равный 60, следует из того факта, что площадь разрушения от ударной волны меняется пропорционально мощности взрыва в степени 2/3.

ские свободы²³.

Очевидно, что влияние зависит от масштаба использования плутония и от степени совмещения предприятий по переработке и изготовлению МОХ-топлива. Хотя совмещение может исключить транспортировку окиси плутония за пределами площадки и поэтому сократить риск отвлечения материала, остается необходимость в скрытом наблюдении за работниками завода и внешними лицами, которые рассматриваются как возможные похитители плутония, и в экстренных обысках и задержаниях для возвращения похищенного плутония. Приемлемость таких мер в демократическом обществе зависит как от политических и культурных норм общества, и от того, сможет ли удовлетворить свои энергетические последствия без обращения к применению плутония.

Таким образом, парадоксально, попытка обеспечения социальной стабильности с применением основанной на реакторах-размножителях ядерной системы снабжения энергией может привести к серьезным социальным напряжениям из-за потенциального влияния меры, требующихся для спасения плутония от рук преступников и террористов, на гражданские свободы.

Техническая авария

Основанная на реакторах-размножителях ядерная система снабжения энергией естественно более сложна и подвержена ошибкам, чем система, основанная на ЛВР, работающих в одноразовом топливном цикле. Система с реакторами-размножителями не только включает сложные компоненты, не имеющие аналогов в системе с ЛВР, например, заводы по переработке, но даже тогда, когда аналог существует, например, сами реакторы, заводы по изготовлению топлива, и транспортная сеть, в системе с реакторами-размножителями являются более сложными. Помимо реактора, большая часть этой добавленных сложных проблем связана с радиологической опасностью, опасностью критичности, и угрозами безопасности, связанными с присутствием в топливном цикле реакторов-размножителей большого количества необлученного плутония, т.е., плутония без продуктов деления. Реальная авария, или даже потеря уверенности общественности в любом компоненте топливного цикла реакторов-размножителей, приведет к выключению значительной части, или даже всей системы, нейтрализуя таким образом ее потенциальные преимущества в энергетической безопасности. Ниже мы вкратце обсудим техническую уязвимость реакторов-размножителей и связанных с ними заводов по переработке и изготовлению топлива.

Защитники ЖМРРБН делали много заявлений, относящихся к надежной технической основе технологии натриевых реакторов, но опыт во всем мире продемонстрировал, что охлаждаемые натрием системы часто страдают от серьезных нарушений даже в случае относительно небольших нарушений²⁴. Потенциал натриево-воздушных и натриево-водяных реакций частично объясняет эту чувствительность, и проблема усложняется непрозрачностью натрия, которая делает обнаружение неисправностей существенно более трудным для таких систем по сравнению с теми, в которых возможна визуальная проверка. Эти технические проблемы, в дополнение к конструктивным трудностям, связанных с компромиссом между

²³ Имеется многочисленная литература о влиянии атомной энергии на гражданские свободы, в особенности, по отношению к использованию плутония. Имеется старый, но все еще полезный, отчет, в котором исследуются три широко распространенных мнения в американском обществе, относящихся к риску для гражданских свобод при использовании плутония в ядерном топливном цикле: Alan F. Westin, "Civil Liberties Implications of U.S. Domestic Safeguards," Appendix III-C of Volume II of *Nuclear Proliferation and Safeguards* (Washington, D.C.: U.S. Office of Technology Assessment, 1977). Более поздняя оценка, в которой рассматриваются угрозы гражданским свободам при использовании плутония в Японии, приведена в работе: Alexander Rossnagel, "Societal and Legal Implications of MOX Use, Part 2 MOX and Society," Chapter 6 in J. Takagi et al., *Comprehensive Social Impact Assessment of MOX Use in Light Water Reactors* (Tokyo, Japan: Citizen's Nuclear Information Center, Nov. 1977). В обеих этих ссылках приведена обширная библиография.

²⁴ Недавнее выключение реактора «Монджу» было вызвано отказом небольшой термопарной трубки, которое привело к реакции натрия и воздуха. Аналогичные инциденты в легководных реакторах обычно сопровождаются незначительными последствиями.

размножением и безопасностью, сильно поддерживают мнение, по которому любой крупномасштабный ЖМРРБН будет более восприимчивым к проблемам, чем современное поколение ЛВР.

Большие заводы по переработке отработанного топлива ЛВР во Франции и Англии в последние годы достигли большого коэффициента использования производственных мощностей. Однако, радиоактивные выбросы таких заводов во время нормальной работы и накапливающиеся запасы выделенного плутония и высокоактивных и трансурановых отходов являются источником растущих опасений среди общественности, прессы, групп защитников окружающей среды и бюрократий во многих странах. Более того, из-за гораздо большего содержания делящихся материалов и степени выгорания в реакторе-размножителе по сравнению с отработанным топливом ЛВР, надежная эксплуатация заводов по переработке для реакторов-размножителей является более сложной и дорогой. Следовательно, оборудование завода для реакторов-размножителей должно быть меньше для обеспечения безопасности по критичности, контактное время между фазами экстракции должно быть короче для предотвращения радиационного разложения материалов процесса, и необходимость большего обеззараживания от продуктов деления увеличивает объем потоков жидких отходов. Аналогичные замечания относятся и к производству топлива из плутония, так же, как и для переработки, изготовление топлива для ЖМРРБН более требовательно, чем МОХ-топлива для ЛВР.

В целом, хотя потенциальный риск как по распространению ядерного оружия и терроризму, так и техническим авариям, связанным с основанной на реакторах-размножителях ядерной системе снабжения, трудно выразить в цифрах, они представляются значительно большими, чем те, которые связаны с современными системами на базе ЛВР. Таким образом, в свете сильного отрицательного отклика на относительно небольшие проблемы современной системы, шансы и последствия аварии в любом секторе системы с реакторами-размножителями слишком велики для того, чтобы подтвердить уверенность в ней для существенной части потребностей Японии в электроэнергии. Но можно ли достичь энергетической безопасности через атомную энергию без реакторов-размножителей. Мы полагаем, что ответ будет положительным, и существенным элементом является накопление запасов урана.

НАКОПЛЕНИЕ ЗАПАСОВ УРАНА

Ниже мы вкратце обсудим три вопроса: (1) доступность обычных запасов урана, т.е., запасов на суше; (2) возможность накопления значительных запасов импортного урана в стране, такой, как Япония, для эксплуатации большой ядерной системы подачи энергии с однофазным топливным циклом, основанной на современных легководных реакторах, или усовершенствованных преобразователях, в течение многих лет; и (3) возможность извлечения урана из морской воды.

Обычные запасы урана

Глобальная доступность обычных запасов урана зависит по определенной цене зависит от базы геологических ресурсов, имеющейся технологии извлечения, и политических и экологических ограничений на добычу или экспорт урана. За последние 100 лет появлялось множество предсказаний о грядущей нехватке или росте цены на различные элементы, например, на медь, цинк, или уран. В большинстве случаев такие предсказания оказались неверными из-за новых открытий, или из-за улучшения технологии добычи или обогащения таких материалов. В особом случае урана, современные цены ниже (при поправке на инфляцию), чем когда бы то ни было. Частично это объясняется падением спроса на рынке атомной энергии и открытием новых очень богатых месторождений в Канаде, Австралии, и государствах бывшего Советского Союза, а частично появлением лучшей технологии, такой, как добычей выщелачиванием на месте и процессом гидравлического бурения в мерзлом грунте, позволяющем извлекать урановую руду из-под земли и выкачивать ее в виде пульпы на поверхность без контакта с человеком.

Недавние предсказания ОЭСР и МАГАТЭ запасов урана, извлекаемых по различным ценам («Красная книга» 1995 г.) указывают на значительное увеличение запасов в большин-

стве категорий цен по сравнению с аналогичными предсказаниями 1993 г., несмотря на тот факт, что из-за отсутствия спроса в большинстве изучавшихся стран объем работ по разведке уменьшился. Таким образом, текущие оценки ресурсной базы порядка 30 миллионов тонн, что достаточно для снабжения общемировых ядерных мощностей в течение более 400 лет, следует рассматривать как консервативные, учитывая как отсутствие инициативы для лучшей оценки дорогих ресурсов, так и то, что не все страны предоставили данные о ресурсах урана.

Следует отметить, по отношению к последнему вопросу, что практика добычи показывает, что оцениваемые запасы извлекаемого урана увеличиваются в 300 раз при каждом ухудшении качества руды в 10 раз²⁵. Кроме того, даже если цена урана из низкосортных руд значительно больше текущей цены, влияние большей стоимости урана на общую стоимость атомной энергии будет невелико. Например, текущая цена природного урана (около 20 долларов за килограмм) соответствует вкладу в стоимость электроэнергии, получаемой на современных легководных реакторах, примерно в 0,05 цента на киловатт-час, или около 1% от отпускной цены. Следовательно, даже 10-кратное увеличение стоимости урана увеличит отпускную цену на примерно 10%.

В целом, добываемый на суше уран по приемлемым ценам гораздо более доступен, чем кто-либо мог предположить 20 или 30 лет назад. Однако, в стратегической перспективе, распределение ресурсов урана очень неоднородно, и большинство ресурсов сосредоточено в нескольких странах. Следовательно, странам с большими ядерными амбициями и с отсутствием урана на своей территории, таким, как Япония, будет нелегко обеспечить безопасность поставок урана для ЛВР даже при максимальной диверсификации источников поставок и участии в разведке урана и разработке новых рудников в других странах. Двумя многообещающими способами улучшения этой ситуации являются создание стратегических запасов урана путем накопления и дальнейшая разработка технологии добычи урана из морской воды.

Создание стратегического запаса урана

Общемировой избыток природного урана сейчас дополняется перспективой появления сотен тонн высокообогащенного урана (ВОУ), возвращаемого из демонтируемых ядерных боеголовок США и России, и становящегося доступным в виде топлива из низкообогащенного урана (НОУ) для легководных реакторов. Недавно США и Россия заключили соглашение, по которому 500 тонн российского ВОУ будут разбавлены до НОУ и проданы в США в течение следующих 20 лет, и, кроме того, в России и США смогут стать доступными сравнимые количества ВОУ из демонтируемого оружия.

Однако, даже без доступа к разбавленному ВОУ из оружия, имеются адекватные ресурсы природного урана и мощности по обогащению урана, доступные для таких стран, как Япония, для того, чтобы создать стратегический запас урана в виде природного урана или топлива с НОУ для обеспечения поставок топлива при любом реалистичном перерыве в поставках²⁶. Например, для создания запасов желтого кека, достаточных для снабжения всех работающих, а также строящихся в Японии ЛВР в течение 10 лет, понадобится менее 1,5 миллиарда долларов (в ценах 1998 года)²⁷. Эта сумма намного меньше стоимости одного

²⁵ K. S. Deffeyes, I. MacGregor, "World Uranium Resources," *Scientific American* 24(1) (1980): 66–76.

²⁶ Детальная оценка относительной стоимости одноразовой системы с ЛВР, использующей накопленный уран, и системы, основанной на переработке и повторном использовании плутония из ЛВР, приведена в работе P. Leventhal, S. Dolley, "A Japanese Strategic Uranium Reserve: A Safe and Economic Alternative to Plutonium," *Science & Global Security* 5(1) (1994): 1–31.

²⁷ Это предполагает: (1) требование 150 миллионов фунтов желтого кека для системы, включающей ЛВР с суммарной электрической мощностью 42 ГВт со средним выгоранием топлива в 43 000 МВт·день/т; (2) желтый кек будет использоваться в равных количествах в течение 10-летнего периода, начиная с 1998 года, без реального увеличения цены за наличный расчет в 12 долларов за фунт в течение этого периода; и (3) реальной учетной ставке в 5% в год.

реактора-размножителя. Вместо этого, или вместе с этим, можно накапливать топливо с НОУ, используя текущий общемировой избыток мощностей по обогащению урана.

Хотя теоретически доступ к услугам по обогащению может сократиться, Япония продемонстрировала собственные возможности по обогащению урана с газовыми центрифугами, которые могут быть быстро расширены. Накопление желтого кека и опора на иностранные или собственные мощности по обогащению имеет преимущество в предоставлении некоторой гибкости при выборе уровней обогащения продукта для приспособления к предсказываемому будущему увеличению степени выгорания в ЛВР или к требованиям усовершенствованных реакторов.

Конечно, можно создать запасы других энергетических ресурсов, таких, как уголь, но здесь уран обладает существенными преимуществами: (1) низкой стоимостью (примерно одной десятой от стоимости угля при эквивалентной энергии); и (2) простотой хранения (масса более, чем на четыре порядка величины меньше, чем масса угля с эквивалентной энергией). Кроме того, уран, в отличие от угля, не портится при хранении.

Добыча урана из морской воды

Уран из морской воды по приемлемым ценам является окончательной гарантией доступности урана для любой страны с доступом к океану. Из-за очень большого количества урана в морской воде (около 4 миллиардов тонн, или примерно в 800 раз больше, чем в ресурсах на суше, извлекаемых по цене в 130 долларов за килограмм, или меньше) возможность извлечения урана из морской воды привлекала значительное внимание в течение последних сорока лет. Основной проблемой является очень низкая концентрация урана, около 3 частей на миллиард. Из этого следует, что стоимость извлечения будет высокой, если только эффективность извлечения урана из морской воды не будет высока, и если можно будет организовать достаточные потоки воды без активной подкачки. Ведущиеся в течение последних десяти лет в Японии исследовательские работы по адсорбентам урана и схема обработки морской воды позволили решить эту задачу и подтвердить техническую возможность и экономическую жизнеспособность процесса. Например, самые последние (1993 г.) оценки стоимости составили примерно 40 000 иен за килограмм извлеченного урана, или около 100 долларов за фунт U_3O_8 (1 доллар = 125 иенам)²⁸. Хотя эта цена примерно в 10 раз больше текущей рыночной цены урана, она увеличит отпускную цену электроэнергии ЛВР только на 10%, а на более эффективных реакторах – еще меньше. Конечная цена электроэнергии будет весьма конкурентоспособной с ценой электричества на реакторах-размножителях даже при самых оптимистических оценках разности капитальных затрат между реакторами-размножителями и обычными ЛВР.

В Японии существует долгая история исследований и разработок извлечения урана из морской воды, и текущие планы предусматривают все более крупные океанские испытания технологии вплоть до коммерческого масштаба. В 1986-87 г.г. работала крупная экспериментальная установка, в которой использовался адсорбент с частицами гидратированной окиси титана в качестве адсорбента в обычном кипящем слое. Было извлечено около 15,5 кг урана. В конце 1980-х г.г. был разработан и испытан гораздо более быстрый адсорбент. Он состоит из очень мелкого порошка амидоксима, внедренного в тонкие волокна поддерживающего материала, такого, как полиэтилен с двуокисью кремния, который может быть изготовлен в форме сети или матов. Поскольку в такой структуре много пустот, морская вода может проходить через него с относительно малой потерей напора воды. Этим способом можно построить заякоренные адсорбционные системы, использующие быстрые природные морские течения, как альтернативу закачиванию морской воды. Такие быстрые течения повышают скорость адсорбции. В последнем испытании блоки, содержащие волокнистые амидоксимовые адсорбенты, помещенные в море на различных глубинах, позволили извлечь 1 кг урана на тонну адсорбента за 20 суток, и 2 кг на тонну за 60 суток²⁹.

²⁸ H. Nobukawa et al., "Development of a Floating Type System for Uranium Extraction from Seawater Using Sea Current and Wave Power" in *Proceeding of the 4th International Offshore and Polar Engineering Conference, Osaka, Japan, April 10–15, 1994*: 294–300.

²⁹ См. сноску [3].

ВОЗМОЖНЫЙ СПОСОБ ДЕЙСТВИЙ

Краткосрочный (1998 – 2001 г.г.)

Этот период может быть использован для оценки состояния ядерной энергетики и разработке нового плана будущего ядерного развития, использующего преимущества новых реалий по отношению к доступности ресурсов и развития технологии, с тех пор, как была заложена первоначальная стратегия ЛВР/РРБН. Наиболее важными задачами являются: (1) обеспечение безопасной и эффективной эксплуатации существующего парка ЛВР, а также любых дополнительных реакторов, использующих топливо с НОУ в одноразовом цикле; (2) исключение дальнейших обязательств извлечения и применения плутония; (3) разработка планов создания запаса урана, основанного на дешевых ресурсах на суше; и (4) продолжение активных исследований и разработок систем экстракции урана из морской воды, ведущих к окончательному испытанию системы, способной извлекать сотни тонн желтого кека.

Особые действия в (1) включают демонстрацию и использование топлива с большей степенью выгорания, которые сокращают количество отработанного топлива в расчете на единицу выработанной электроэнергии, и разработку планов долгосрочного хранения такого топлива как в самой Японии, так, и, возможно, под международным контролем. В то время как топливо с большим выгоранием требует большей степени начального обогащения, эти расходы могут быть скомпенсированы доступностью более дешевой работы разделения при лазерном обогащении. Теоретически это может оказать отрицательное влияние на нераспространение, поскольку, после того, как применение лазеров для обогащения до уровня НОУ будет продемонстрировано, станет ясно, как можно приспособить эту технологию для изготовления ВОУ, а также преобразовать плутоний реакторного качества в плутоний оружейного качества, разделяя четные и нечетные изотопы плутония. Однако, газовое центрифугирование, проверенный метод для изготовления НОУ, ВОУ, и разделения изотопов плутония, уже существует, и, как отмечалось ранее, плутоний реакторного качества может быть использован для изготовления ядерного оружия любой степени технической сложности. Таким образом, даже если лазерное обогащение в конце концов будет использоваться для производства НОУ для коммерческих реакторов, оно не увеличит существенно существующего технического потенциала для распространения ядерного оружия.

Факторы, которые следует рассмотреть в связи с (2), включают размер парка реакторов, риск возможного прекращения поставок, и цену, которую можно заплатить за такую страховку. В этой связи мы отметим, что единственным примером прекращения поставок ядерных материалов и технологии в прошлом были прекращения поставок из США и Канады в Индию и Пакистан, которые были основаны на несоблюдении норм нераспространения. В этом плане аналогичное прекращение поставок в Японию, одну из основных стран, поддерживающих режим нераспространения, кажется весьма маловероятным.

В ближайшем будущем может также оказаться возможным принятие решения о больших инвестициях в разработку высокотемпературного реактора (ВТР). В этом решении будет использоваться опыт, полученный при строительстве высокотемпературного исследовательского реактора (ВТИР)³⁰. Однако, важно понимать, что в этой области после разработки ВТИР появились значительные технические достижения. Наиболее важной из них стала модульная концепция, которая ограничивает размеры и плотность мощности для достижения присущей безопасности. Аналогичное значение имели разработка высокотемпературных материалов и высококачественных турбоагрегатов. Современные концептуальные конструкции, сделанные в Японии³¹ и в других странах³², демонстрируют потенциал ВТР для развер-

³⁰ Сборник *Proceedings of the 2nd JAERI Symposium on HTGR Technologies, Orai, Japan, Oct. 21–23, 1992 (JAERI-M 92-215)* содержит обзор проекта ВТИР и детальное описание избранных вопросов. В этом сборнике обсуждается также состояние высокотемпературных реакторов в нескольких других странах.

³¹ K. Kunitomi et al., "Conceptual Design of 50 MW Severe Accident Free HTR and Related Test Program of HTR," *Nuclear Technology* 123, September 1998, 245–258.

³² X. L. Yan, L. M. Lidsky, "Design of Closed-Cycle Helium Turbine Nuclear Power Plants" in *International Gas Turbine and Aeroengines Congress and Exposition, Cincinnati, Ohio, May 24–27, 1993. (ASME 93-GT-196)*.

ывания в Японии, а также для предоставления значительного экспортного потенциала для японских производственных мощностей по турбоагрегатам и теплообменникам.

Среднесрочный (2001 – 2010 г.г.)

Этот период может быть использован для реализации решений, принятых в предыдущем периоде, и для постановки планов для долгосрочной роли атомной энергии в производстве электроэнергии и тепла. Самым важным ранним действием должно стать завершение испытания извлечения урана из морской воды в коммерческом масштабе. Если оно окажется успешным, то затем эта технология может быть «положена на полку» как страховка, используемая в случае прекращения поставок урана. Опыт с полупромышленной установкой позволит получить точную оценку времени, необходимого для развертывания количества заводов, достаточного для поддержания ядерной энергетики Японии в случае полного прекращения поставок. Реализация системы экстракции из морской воды в масштабе, необходимом для поставки урана для парка, скажем, из 100 реакторов, будет большой задачей. Однако, таким образом может быть достигнута та же самая независимость от импорта урана, которую обещают реакторы-размножители, но за гораздо меньшую экономическую и социополитическую цену, и с меньшим риском неудач.

Если потенциал высокотемпературного реактора с газовой турбиной (ВТР-ГТ) будет подтвержден в краткосрочных исследованиях, но промежуточный период может быть использован для установки производственной инфраструктуры для серийного производства таких реакторов и их специализированного топлива. Поскольку каждый блок будет ограничен по тепловой мощности 200 – 250 МВт, размеры парка и изготавливающих предприятий будут сравнимы с размерами современной промышленности коммерческих самолетов, со сравнимыми экономическими последствиями.

Промежуточный период может также стать тем временем, когда будет рассматриваться весь диапазон вариантов ядерной энергетики для окончательного развития. В особенности, если крупномасштабная реализация экстракции урана из морской воды столкнется с серьезными проблемами, будет целесообразно рассмотреть перспективы более безопасного и менее сложного, более устойчивого к распространению по сравнению со стандартным ЖМРБН реактора-размножителя. В самом деле, уже проведены существенные исследования и разработки такой концепции, интегрального реактора на быстрых нейтронах (ИРБН). Основной особенностью топливного цикла ИРБН является применение пирообработки, а не стандартного процесса ПУРЕКС для обеспечения чистого отделения актинидов от продуктов деления в отработанном топливе в установке, расположенной рядом с реактором. Свободные от актинидов отходы должны быть захоронены в геологическом хранилище, в то время как актиниды, вместе с некоторыми продуктами деления, должны быть повторно переработаны в реакторе. Хотя эта концепция привлекательна, мы полагаем, что ее заявленные преимущества по отношению к опасности отходов и большей устойчивости к распространению преувеличены ее защитниками. Более того, еще должна быть продемонстрирована способность обеспечить чистое отделение актинидов от продуктов деления и сжигание актинидов, включая нептуний, америций, и курий.

Предлагались также ториевые топливные циклы на основании меньшей долговременной токсичности отходов и большей устойчивости к распространению, но, как и выше, их преимущества могут оказаться меньше, чем они кажутся. Исходным обоснованием для введения ториевого цикла было мнение о том, что он является более распространенным, чем уран, и что он может быть использован для воспроизводства U-233, изотопа с лучшими свойствами для применения в реакторах на тепловых нейтронах. Однако, его распространенность в земной коре не имеет большого значения для энергетической безопасности Японии, поскольку у Японии нет собственных запасов тория, и трудно представить себе ситуацию, в которой поставки урана прекратятся, а тория – нет. Предположительно, применение U-233 в усовершенствованном реакторе сократит возможность возникновения одинаковых аварий в парке реакторов, состоящем из ЛВР и ВТР-ГТ с топливом из НОУ. Реактор с расплавленными солями может быть серьезным кандидатом для рассмотрения на эту роль, с

прочной исследовательской базой и международной группой поддержки³³, но рассматриваются также и другие концепции с ториевым топливом³⁴.

Долгосрочный (2011 г. –)

В этот период времени затраты и преимущества продолжающейся опоры на ископаемое топливо и потенциал крупномасштабного использования возобновляемых ресурсов станут намного более ясными. Это предоставит более реалистичную перспективу необходимости в атомной энергии, включая предпочтительные технические варианты и международные институциональные рамки для решения проблем безопасности и распространения. Роль атомной энергии, решения по оптимальному построению парка энергетических реакторов, и степень опоры на добываемый из морской воды уран могут быть отложены до тех пор, пока не будут лучше разрешены технические, экономические и политические вопросы. Однако, исключительно важно убедиться в том, что текущие действия не будут предоставлять необоснованной поддержки ядерной компоненте энергоснабжения. Сильная поддержка повторного использования плутония со связанными с ним техническим риском и влиянием на общество, перед лицом все возрастающих свидетельств о преимуществах альтернативных стратегий, очевидно является контрпродуктивным. Преимущества в отношении энергетической безопасности такого топливного цикла могут быть достигнуты при гораздо меньших технических, экономических, и социополитических затратах за счет накопления добытого на суше урана и разработки технологии извлечения урана из морской воды.

³³ Проф. К. Фурукава является лидером проекта по возобновлению разработки реакторов, базирующихся на технологии расплавленных ториевых солей. Международная конференция по разработке реакторов с расплавленными солями тория проходила в Санта-Монике, Калифорния, США, 8 – 11 апреля 1997 г. В совещании участвовало 24 ученых из Беларуси, Чехии, Франции, Индии, Японии, России, Турции, США и МАГАТЭ.

³⁴ Пример одноразового ториевого цикла, привлекающий сейчас значительный интерес, использует конфигурацию из запальной сборки из обогащенного урана и бланкета из природного урана и тория в стандартном реакторе с водой под давлением. Подробная критика этого проекта приведена в работе P. R. Kasten, "Review of Thorium Reactor Concept," *Science & Global Security* 7(2) (1998): 237–269.