

РАЗРАБОТКА РЕАКТОРОВ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ В СОЕДИНЕННЫХ ШТАТАХ

Томас Б. Кохрен, Гарольд А. Фейвесон и Фрэнк фон Хиппель

Эта статья содержит хронику взлета и падения исследований реакторов на быстрых нейтронах в США. Эти исследования начались в конце Второй мировой войны и составили значительную часть полных исследовательских усилий США по гражданской ядерной энергии до начала 80-х годов. Задачей большинства этих исследований была разработка плутониевого размножающего реактора (бридера), способного производить больше плутония от U-238, чем он потребил. Но с прекращением проекта размножающего реактора на Клинч Ривер разработка реакторов на быстрых нейтронах в Соединенных Штатах по существу завершилась. Соображения безопасности сыграли роль в этом окончании программы размножающих реакторов на быстрых нейтронах, но более важными причинами стали опасения ядерного распространения и растущее убеждение, что такие реакторы не будут нужны или окажутся экономически несопоставимыми с легководными реакторами на десятилетия, если не навсегда.

Томас Б. Кохрен работает в Ядерной программе Совета по защите природных ресурсов, Вашингтон, ОК, США.

Гарольд А. Фейвесон и Фрэнк фон Хиппель работают в Программе по науке и всеобщей безопасности, Школа им. Вудро Вилсона по общественным и международным событиям, Принстон, Нью Джерси, США.

Статья получена 1 октября 2009 года и принята к опубликованию 1 ноября 2009 года.

Почтовый адрес для корреспонденций: Harold A. Feiveson, Program on Science and Global Security, Woodrow Wilson School of Public and International Affairs, Princeton University, 221 Nassau Street, Princeton, NJ 08540.

Электронный адрес: feiveson@princeton.edu

РАННЯЯ ИСТОРИЯ

Сразу же после бомбардировки Пирл Харбора 7 декабря 1941 года исследования по производству плутония для атомного оружия были сосредоточены в Университете Чикаго под руководством Нобелевского лауреата Артура Комптона. “Металлургическая лаборатория” (позднее она стала Аргоннской национальной лабораторией) – такое кодовое наименование было дано предприятию Комптона. Именно здесь небольшая группа ученых во главе с Энриком Ферми построила первый в мире реактор – *чикагский котел (ЧК-1)*, который достиг критичности 2 декабря 1942 года. В течение двух последующих лет деятельность по разработке реакторов для производства плутония переместилась в Окридж (Теннесси), а позднее в Хэнфорд (Вашингтон). В начале 1944 года Комптон и чикагские ученые начали думать о роли Metallurgical Laboratory после войны¹.

Утром 26 апреля 1944 года Энрико Ферми, Лео Сциллард, Юджин Вигнер, Элвин Вайнберг и другие собрались для обсуждения возможностей применения ядерного деления к обогреву и освещению городов². Дефицит делящегося материала был у всех на уме. В то время было неясно, хватит ли урана, даже чтобы получить высокообогащенный уран (ВОУ) и плутоний для существенного числа единиц ядерного оружия. Поэтому Ферми и его коллеги из Metallurgical Laboratory изыскивали возможности получения максимума энергии (или плутония для оружия) с минимальными ресурсами³. Они обнаружили, что некоторые конфигурации реакторов могут позволить получать превращение урана-238 в делящийся (и приводящий к цепной реакции) плутоний более быстрыми темпами, чем накапливается делящийся уран-235. Отсюда появился термин “размножающий реактор”.

Уолтер Зинн – один из немногих экспертов США по реакторам и близкий коллега Ферми, вскоре был мобилизован для решения возникшей проблемы. Летом 1944 года он начал бо-

лее детальное рассмотрение конструкций размножающих реакторов. В конце 1945 года он отказался от идеи преобразования тория в уран-233 и одобрил первоначальный план получения плутония-239 из урана-238 с помощью быстрых нейтронов деления⁵. В 1945 году Энрико Ферми заявил: “Страна, которая первой разработает реактор-бридер, будет иметь значительное преимущество в состязании за атомную энергию”⁶.

Первым в мире реактором на быстрых нейтронах стала *Клементина* – опытный реактор мощностью 25 кВт_т с охлаждением ртутью, построенный на площадке Омега (ТА-2) в Лос Аламосе⁷. Проект был предложен и одобрен в 1945 году. Высокие интенсивности нейтронов спектра деления требовались конструкторами бомбы. Кроме того, работа реактора дала бы информацию о быстрых реакторах, касающуюся их возможного применения для получения энергии и делящихся материалов⁸.

Сооружение началось в августе 1946 года и критичность была достигнута в конце 1946 года, а работа на полной мощности началась в марте 1949 года. Реактор был заполнен металлургическим плутонием, закрытым пробкой из естественного урана на каждом конце брусьев, покрытых сталью. Брусья были установлены в стальную коробку, через которую электромагнитным насосом прогонялся охладитель (жидкая ртуть). Активная зона реактора была концентрично окружена отражателем из естественного урана толщиной 15 см и слоем свинца толщиной 10 см⁹.

Клементина была заглушена в марте 1950 года из-за неправильного функционирования контрольного стержня. Операции возобновились в сентябре 1952 года. Реактор, впрочем, проработал только до 24 декабря 1952 года, когда разорвался топливный стержень. Урановые пробки раздулись, разрушили оболочку и освободили плутонию путь в ртутный охладитель¹⁰. В дальнейшем реактор был разобран.

После *Клементины* Лос Аламос разработал еще один быстрый реактор *LAMPRE-I* и проработал с ним в течение короткого времени. Охлаждаемый натрием реактор был заполнен в качестве топлива расплавленным плутонием. Он достигнул начальной критичности в начале 1961 года и успешно проработал несколько тысяч часов до середины 1963 года. *LAMPRE-I* был сконструированный для изучения вопросов, связанных с применением плутониевого топлива в быстрых реакторах, и заранее предназначался для работы на уровне 20 МВт_т. Стало очевидным, однако, что имевшиеся представления о поведении некоторых материалов активной зоны при высоких температурах и в условиях высокого радиационного окружения оказались неадекватными¹¹. Поэтому проектная мощность была снижена до 1 МВт_т и появились планы построить *LAMPRE-2* с мощностью 20 МВт_т. К середине 1963 года *LAMPRE-I* выполнил намеченные задачи и был заглушен. Финансирование строительства *LAMPRE-2* никогда не было реализовано¹².

Адмирал Риквер немного экспериментировал с реактором на быстрых нейтронах для двигательных установок подводных лодок. Эти усилия начались с разработки компанией “Дженерал Электрик” для флота наземного прототипа *SIG* в лаборатории атомной энергии Кнолл (Вест Милтон, Нью Йорк). Реактор *SIG* с топливом из ВОО проработал с весны 1955 года до закрытия в 1957 году после того, как адмирал Риквер отказался от быстрых реакторов для морских силовых установок. За свою недолговечную историю существования охлаждаемый натрием *SIG* испытывал трудности из-за утечек в паровых генераторах¹³.

За прототипом *SIG* последовало развертывание быстрого реактора *S2G* в ядерной подводной лодке USS *Seawolf* (SSN 575). Как сказано историками Комиссии по атомной энергии (КАЭ) Хьюлеттом и Дунканом в их книге по истории американского подводного флота в период 1946-62 гг,

До завершения начальных морских испытаний с уменьшенной мощностью в феврале 1957 года Риквер уже решил отказаться от реактора, охлаждаемого натрием. В начале ноября 1956 года он сообщил Комиссии, что сделал шаги к замене реактора *Seawolf* на охлаждаемый водой реактор, аналогичный тому, какой был на *Nautilus*. Утечки на паровой установке *Seawolf* стали важным фактором для этого решения, но наиболее убедительными оказались природные ограничения систем с натриевым охлаждением. По словам Риквера, они были “дорогими для строительства, сложными для работы и чувствительными к длительным остановкам в результате даже малейших нарушений, а их ремонт оказывался трудным и требовал много времени...”¹⁴.

ОБЪЕДИНЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО РАЗМНОЖАЮЩИМ РЕАКТОРАМ В АРГОННСКОЙ НАЦИОНАЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРИИ

В 1946 году недавно созданная КАЭ взяла контроль над национальными установками по ядерным исследованиям и поручила Зинну руководство Чикагской лабораторией, которая тогда была реорганизована и стала называться Аргоннской национальной лабораторией (АНЛ). В следующем году руководство КАЭ решило объединить в АНЛ все свои реакторные программы¹⁵. Комиссии были нужны реакторы не только для производства оружейного плутония, но также для производства радиоизотопов и для исследований более общего характера. Существовал также широкий общественный интерес к использованию реакторов для получения электроэнергии¹⁶.

При подготовке своей части отчета Генерального Комитета советников Зинн подчеркнул энергетические реакторы. В этом случае (как было без перемен с 1944 года) особо важным фактором был недостаток делящегося материала. Существующие запасы урановой руды казались слишком ограниченными для производства умеренного количества вооружений, не говоря уже относительно обеспечения топливом энергетических реакторов. Зинн верил, что единственная надежда для энергетических экспериментальных реакторов лежит в тех системах, которые вырабатывают больше делящегося материала, чем потребляют¹⁷.

Зинн убедил КАЭ дать проекту размножающего реактора высокий приоритет и настоял на собственном руководстве проектом. Его поддержал Ферми, выступая с лекциями, где превозносил задачу получения почти 100% энергии деления от природного урана¹⁸.

Экспериментальный размножающий реактор-1

19 ноября 1947 года КАЭ уполномочила АНЛ сконструировать и построить реактор на быстрых нейтронах с жидкометаллическим охладителем (второй быстрый реактор в США) – *Экспериментальный размножающий реактор-1 (EBR-1)*, называемый также “Чикагским котлом-4” и “Дьявольским котлом Зинна”.

Группа сотрудников, работавшая с *EBR-1*, решила охлаждать активную зону реактора сплавом натрия и калия. Поскольку они мало знали о влиянии этого жидкометаллического охладителя на материалы и тревожились о том, что управляющие стержни могут размягчиться или подвергнуться коррозии, они решили охлаждать их потоком воздуха, что привело к сложностям при конструировании двух совершенно разных систем охлаждения. Это оказалось особенно трудным, поскольку сплав натрия с калием загорается воде, так и на воздухе. Но поэтому не могло быть утечки жидкого сплава¹⁹.

С начала Манхэттенского проекта поднимались вопросы опасения относительно общественной безопасности, связанной со строительством реакторов в районе Чикаго.

Летом 1948 года Зинн убедился, что проект необходимо осуществлять в удаленном месте, и попросил КАЭ найти такое место²⁰. Руководители выбрали площадку вблизи Арко (Айдахо), которая была проверенным местом для морской артиллерии. Она стала известной теперь как Национальная станция для испытания реакторов и частью Национальной лаборатории Айдахо (НЛА). Скоро НЛА приютила остальные реакторные проекты АНЛ, а также другие правительственные реакторы²¹.

EBR-1 был первым реактором на быстрых нейтронах, сконструированным как для размножения плутония, так и для получения электроэнергии. Реактор с мощностью 1.2 МВт_т (0.2 МВт_э)²², охлаждаемый натрием, стал критичным 20 декабря 1951 года и зажег четыре электроламп по 200 Вт каждая, став по этой причине первой ядерной энергоустановкой, генерирующей электроэнергию (см. Рис.1). Топливом для *EBR-1* стал уран оружейного качества (степень обогащения 94%). КАЭ объявила 4 июня 1953 года, что *EBR-1* стал первым реактором в мире, продемонстрировавшим получение плутония из урана.

К сожалению, реактор был сконструирован с быстрым положительным коэффициентом реактивности (повышение мощности имело положительную обратную связь). 29 ноября 1955 года во время эксперимента по сбору информации относительно этой неустойчивости в реакторе произошло частичное расплавление (40-50 %) активной зоны. Поврежденная активная зона была удалена, а реактор отремонтирован и продолжал работать до закрытия 30 декабря 1963 года.

Авария на *EBR-1* сфокусировала внимание на вопросах безопасности, связанных с реакторами на быстрых нейтронах, охлаждаемыми жидким натрием, и особенно на возможность взрывной критичности, обязанной частичному расплавлению и коллапсу активной зоны. Эта возможность впервые изучалась Бете и Тайтом²³. К 1983 году – официальному завершению американской программы коммерциализации быстрых реакторов, американские аналитики пришли к заключению, что анализ Бете-Тайта был слишком консервативным в отношении величины возможного выброса энергии при аварии быстрого реактора, но в анализе не было “универсально принятых оценок верхних пределов последствий гипотетических аварий быстрых реакторов”²⁴.



Рис.1: Экспериментальный реактор-размножитель-1. После зажигания четырех электроламп *EBR-1* стал первой ядерной электроустановкой 20 декабря 1951 года.

Быстрый реактор с мощностью 1 кВт был также создан на Национальной станции по испытанию реакторов с целью получения нейтронов для программы разработки быстрого реактора. Его запуск произошел 29 октября 1959 года и реактор работал где-то до конца 70-х годов, когда его перевезли на новое место на площадке в Айдахо.

Экспериментальный размножающий реактор - 2

Экспериментальный реактор *EBR-2* был, вероятно, наиболее успешным среди американских быстрых реакторов (См. Рис. 2). Он имел мощность 62.5 МВт_т (20 МВт_э), охлаждался натрием и был реактором “бассейнового типа”, где теплообменники для переноса тепла к вторичной петле жидкого натрия погружены в бак реактора. Он был сконструирован в АНЛ и изготовлялся с июня 1958 года на Национальной станции испытания реакторов (сейчас это Материально-топливный комплекс в Национальной лаборатории Айдахо). Критичность на малой мощности без натриевого охладителя была достигнута 30 сентября 1961 года, критичность с натрием – 12 ноября 1961 года, а проектная мощность - 25 сентября 1969 года

EBR-2 продемонстрировал осуществимость размножающего реактора, охлаждаемого натрием и работающего в качестве источника электроэнергии. Поначалу он работал на металлическом ВОО-топливе. Критическая особенность была в том, что ему сопутствовала Установка топливного цикла (УТЦ), которая теперь называется Установкой для доведения топлива до кондиции, позволяющей проводить непрерывную переработку и повторное использование топлива, чтобы не допустить накопления его рабочего запаса²⁵. Отработанное топливо перерабатывалось, а свежее топливо готовилось на УТЦ с 1964 по 1969 год²⁶. В 1967

году *EBR-2* был переориентирован с демонстрационной установки на установку для облучения.

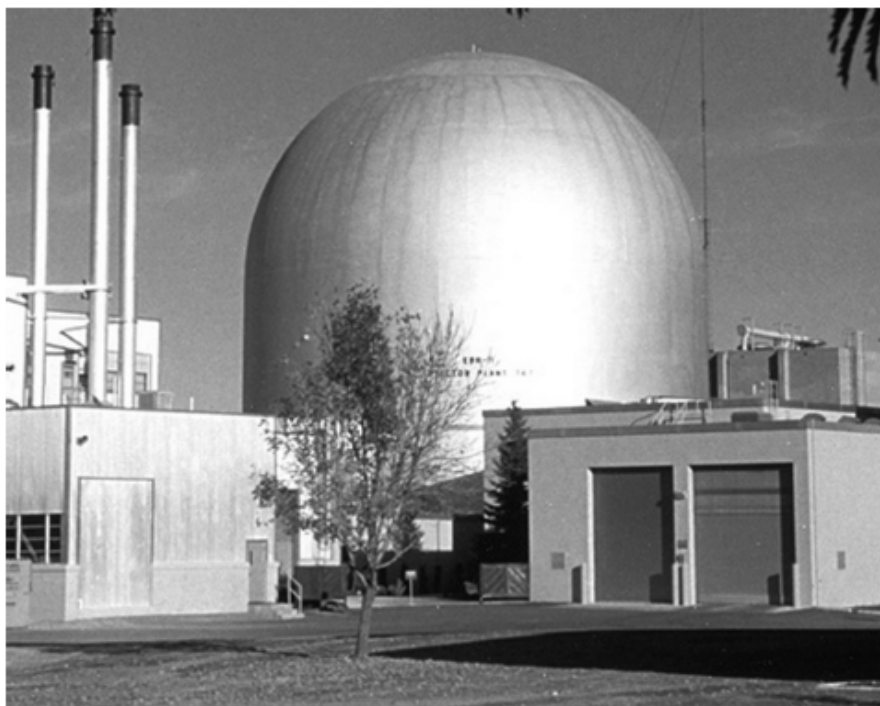


Рис. 2: Экспериментальный размножающий реактор-2.

После закрытия размножающего реактора в 1983 году *EBR-2* и УТЦ стали исследовательской и демонстрационной установками для концепции IFR (Интегральный быстрый реактор), которую поддерживала АНЛ. Программа IFR затем была прекращена, а на *EBR-2* начались операции по закрытию, которое произошло в сентябре 1994 года после 30 лет работы.

Деятельность по закрытию *EBR-2* включала в себя избавление от топлива, а также осушку первичной и вторичной натриевой петли. УТЦ была преобразована в Установку для кондиционирования топлива, чьей задачей стала электрохимическая обработка отработанного топлива от *EBR-2* для получения радиоактивных отходов в таком виде, который оказывается приемлемым для помещения в национальное геологическое хранилище. Топливо не считается годным для прямого помещения в такое хранилище, так как содержит натрий, который обеспечивает хороший тепловой контакт с обломками топлива. Натрий может реагировать с водой, проникающей вовнутрь, образуя водород. Лаборатория подписала соглашение со штатом Айдахо, что деятельность по приведению топлива в надлежащий вид будет завершена к 2035 году.

Короткая жизнь первого коммерческого размножающего реактора – Ферми 1

Атомная энергетическая станция имени Энрико Ферми (*Ферми 1*) была плодом ума Уолкера Кислера, кто в 1951 году стал президентом и генеральным управляющим, а затем председателем Совета директоров компании «Детройт Эдисон». Ядерная энергия захватила воображение Кислера в 1947 году, когда он обратился в комитет советников КАЭ по вопросу налаживания отношений с частной промышленностью. В декабре 1951 года Кислер представил КАЭ результаты исследования, проведенного компанией «Доу-Детройт Эдисон», - одного из четырех, выполненных в промышленности, которые нашли, что «атомная энергия имеет важный потенциал для производства энергии, если даже сами реакторы пока еще не достаточно экономичны для этого»²⁷.

В 1952 году Кислер предложил свои услуги для руководства созданием организации по разработке проекта размножающего реактора имени Энрико Ферми. Проект формально был

организован в 1955 году под началом Компании по разработке энергетического реактора (КРЭР) с участием еще 34 фирм. В январе 1956 года КРЭР обратилась в КАЭ за разрешением начать сооружение реактора на берегу озера Эри в лагуне Бич (около Ньюпорта, в 50 км от Детройта, штат Мичиган). Разрешение на строительство было выдано 4 августа 1956 года, земляные работы начались четырьмя днями позже, а заливка бетоном последовала в декабре 1956 года²⁸.

По размеру активной зоны и по величине мощности *Ферми 1* был самым крупным реактором на быстрых нейтронах, построенным до этого времени. Критичность была достигнута 23 августа 1963 года. Энергетический реактор мощностью 200 МВт_т (66 МВт_э), охлаждаемый натрием, с ВОУ-топливом отличался от *EBR-2* тем, что был основан на конструкции петли, где основной охладитель - жидкий натрий, передавал свое тепло вторичному натрию во внешнем теплообменнике²⁹.

В октябре 1966 года блокировка потока натрия через часть активной зоны привела к частичному расплавлению активной зоны. Этот несчастный случай был вызван циркониевой плитой, которая оказалась не закрепленной и привела к потоку натрия в топливную сборку. В результате этого несчастного случая расплавились две сборки из 105, но никакого загрязнения вне бака, где эти сборки находились, не было отмечено. Этот случай послужил основой для книги "Мы почти потеряли Детройт"³⁰.

Повреждение реактора и топливныхборок отняло примерно четыре года на ремонт.

В мае 1970 года реактор был готов к возобновлению работы, но взрыв натрия задержал начало до июля. В октябре реактор, наконец, достигнул уровня мощности 200 МВт_т. За 1971 год он всего лишь произвел 19.4 гигавагт-часа электричества, что соответствовало среднему коэффициенту занятости, равному 3.4%. КРЭР поэтому отказалась закупать дополнительное урановое топливо для продолжения работы станции. В августе 1972 года после отказа в продлении лицензии на работу было инициировано закрытие реактора. Его деятельность завершилась 22 сентября 1972 года. Решение по этому поводу было принято 27 ноября 1972 года, но официально работа с *Ферми 1* была прекращена 31 декабря 1975 года.

РАЗРАБОТКА ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО РАЗМНОЖАЮЩЕГО РЕАКТОРА В 60-е И 70-е ГОДЫ

Несмотря на коммерческую неудачу *Ферми 1*, усилия по разработке быстрого жидкометаллического размножающего реактора (ЖМБРР) получили толчок в 60-е годы, направленный на коммерциализацию такого реактора до конца века³¹. В докладе президенту США о гражданской атомной энергетике (1962 год) КАЭ конкретно рекомендовала, чтобы будущие правительственные программы содержали энергичные разработки и своевременное введение размножающих реакторов, которые КАЭ считала существенными для длительного и крупномасштабного использования атомной энергии³². В 1967 году ЖМБРР был крупнейшей программой КАЭ по разработке гражданской энергетике³³. Программа КАЭ начала объединять усилия по созданию промышленной базы и получения согласия общественных предприятий на ЖМБРР, в основном, на основе плановых субсидий правительства на строительство коммерческих энергоустановок типа ЖМБРР³⁴. КАЭ рассматривала его программу "как ключ к эффективному переходу программы быстрых размножающих реакторов от стадии разработки технологии к точке крупномасштабного коммерческого использования"³⁵.

Развивая эти задачи, КАЭ в 1968 году выпустила десятилетний план программы ЖМБРР, подготовленный в АНЛ. Двойная цель плана заключалась в следующем:

Добиться (путем НИР) необходимых технологий и "Быть уверенным в максимальной разработке и применении конкурентоспособной, самоподдерживающей промышленной способности ЖМБРР"³⁶.

Задача заключалась в разработке экономически жизнеспособного ЖМБРР коммерческого типа к середине 60-х годов³⁷. Проведенное в 1969 году исследование рациональности программы размножающего реактора, выполненное в КАЭ, предположило, что датой появления коммерческого ЖМБРР станет 1984 год³⁸.

На фоне растущих тревог по поводу возможного экономического кризиса быстрое осуществление технологии ЖМБРР стало национальной задачей³⁹. Эта задача оставалась са-

мой приоритетной программой разработки КАЭ вплоть до 1977 года, когда президент Джимми Картер добился снятия демонстрационного проекта размножающего реактора на Клинч Ривер. Этот проект оставался программой высокого приоритета до 1983 года, когда проект Клинч Ривер был прекращен Конгрессом.

В стиле обязательства президента Кеннеди о высадке американцев на Луну через 10 лет, данного в 1960 году, президент Никсон в своем послании Конгрессу 4 июня 1971 года объявил в качестве высшего приоритета своей энергетической программы "обязательство завершить успешную демонстрацию ЖМБРР в 1980 году"⁴⁰. Эта задача была подтверждена Объединенным комитетом Конгресса по атомной энергии⁴¹.

Расходы на программу ЖМБРР

В 1975 году Отчетно-финансовое управление правительства США (GAO) подсчитало, что "полное финансирование программы ЖМБРР со стороны КАЭ за 1948-74 финансовые годы составило примерно 1.8 миллиардов долларов"⁴². GAO сообщает, что расходы на программу ЖМБРР за 1975 финансовый год составили 481 миллион долларов⁴³, а это по ценам 2006 года примерно составит 1.6 миллиардов долларов. (Смотрите Рис.3). Усилия по коммерциализации характеризуются двумя компонентами: базовой программой НИР, сосредоточенной на двух испытательных реакторах, и усилиями по демонстрации размножающего реактора на Клинч Ривер.

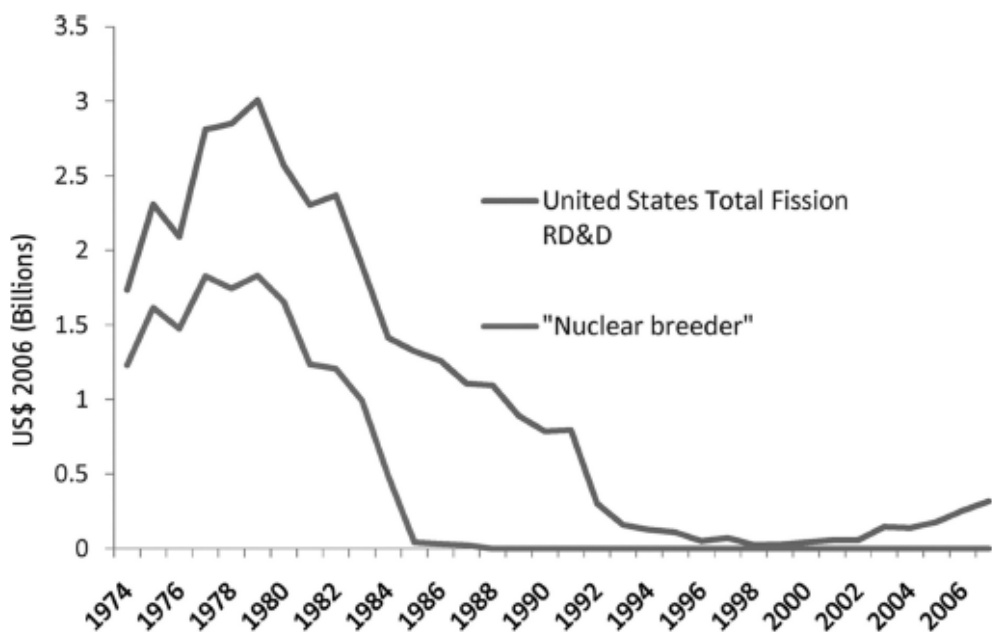


Рис.3: Расходы США на НИР по делению в 1974-2006 финансовых годах (по сведениям МАГАТЭ). По оси Y отложены расходы в миллиардах долларов (по ценам 2006 года). Верхний график соответствует полным расходам на НИР по делению. Нижний график приведен для расходов на "ядерный размножающий реактор".

ЮГО-ЗАПАДНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ БЫСТРЫЙ РЕАКТОР НА ОКСИДАХ МЕТАЛЛОВ

Все ранние концепции размножающих реакторов были основаны на металлическом топливе. Однако в 60-х годах началась работа на использовании керамики – смеси оксида плутония и оксида урана, называемой МОХ-топливом. Юго-западный экспериментальный быстрый реактор на оксидах (ЮЭБРО) имел мощность 20МВт_т, охлаждался натрием, имел топливо из МОХ-смеси и работал на быстрых нейтронах. Он был предназначен для определения рабочих характеристик реактора с МОХ-топливом и, в частности, для изучения влияния доплеровского коэффициента тепловой обратной связи в МОХ-топливе, позволяющего работать при более высоких температурах, чем для металлического топлива⁴⁴. ЮЭБРО не

производил электроэнергию.

Расположенный вблизи Стриклера (Арканзас) *ЮЭБРО* был изготовлен для КАЭ компанией “Дженерал Электрик” и работал под руководством Юго-западной Ассоциации по атомной энергии – бездоходного консорциума, образованного семнадцатью силовыми компаниями и европейскими ядерными агентствами, включая Общество по атомной энергии в Карлсруэ (Западная Германия).

Эксперименты на *ЮЭБРО* подтвердили, что отрицательный температурный коэффициент реактивности, связанный с применением топлива на смеси оксидов, улучшит безопасность быстрых реакторов при аварийных условиях, включая возрастание температуры топлива.

ЮЭБРО начал работу в мае 1969 года и был заглушен три года спустя. Топливо и облученный охладитель были удалены из реактора и позднее помещены за пределы площадки в 1972 году. Был также произведен небольшой демонтаж. Реактор был передан университету Арканзаса в 1975 году и до сего времени находится в его владении, хотя университет никогда не включал его⁴⁸.

Испытательная установка с быстрым потоком

КАЭ посчитала, что переход от существующих быстрых реакторов (*EBR-2* с мощностью 62.5 МВт_т и *Ферми 1* с мощностью 200 МВт_т) к предложенному демонстрационному реактору на Клинч Ривер (975 МВт_т) был бы слишком рискованным для преодоления его одним шагом. Поэтому был нужен реактор с промежуточной мощностью для проверки топлива. Такой реактор был включен в программу разработки ЖМБРР. В июле 1967 года Конгресс США одобрил строительство *Опытной установки с быстрым потоком (ОУБП)*, затраты на которую в то время оценивались в 87.5 миллионов долларов, а к операциям на полной мощности намечалось приступить в начале 1974 года⁴⁹.

ОУБП с мощностью 400 МВт_т была быстрым реактором с МОХ-топливом и натриевым охлаждением, а также не имела бланкета для размножения дополнительного плутония.. (Смотрите Рис.4).

Сооружение *ОУБП* было завершено в 1978 году на площадке Министерства энергетики США в Хэнфорде (Вашингтон), а критичность была достигнута в 1980 году. Она начала действовать в качестве опытной установки в 1982 году. Когда в следующем году прекратил свою деятельность реактор на Клинч Ривер, *ОУБП* осталась без своей основной задачи. Она продолжала работать до апреля 1992 года, проверяя разные аспекты конструкций и операций быстрых реакторов, включая эксперименты, предназначенные для проверки возможности пассивного удаления тепла радиоактивного распада из активной зоны реактора путем конвекции охладителя из жидкого натрия. К 1993 году польза от реактора упала, так что в декабре этого года было принято решение о его остановке. Через несколько последующих лет все попытки найти новые задачи для *ОУБП*, включая производство радиоактивных изотопов для применения в медицине или трития для оружия, ни к чему не привели. После удаления топлива и охладителя *ОУБП* продолжает оставаться в холодном резервном состоянии, а его сторонники продолжают искать новые оправдания для его применения.

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ КОНЦЕПЦИИ РАЗМНОЖАЮЩИХ РЕАКТОРОВ

Хотя наивысший приоритет был отдан ЖМБРР, в США рассматривались некоторые иные типы размножающих реакторов и были достигнуты разные этапы разработки. Кроме ЖМБРР сюда входят быстрый размножающий реактор с газовым (гелиевым) охлаждением и два типа реакторов на тепловых нейтронах: легководный размножающий реактор и размножающий реактор на расплавленных солях. Размножающие реакторы на быстрых нейтронах были предназначены для получения плутония из урана-238, а конструкции размножающих реакторов на тепловых нейтронах оптимизированы на получение урана-233 из тория-232.

Возможно наиболее интересной альтернативной концепцией, исследованной в этих ранних работах, был размножающий реактор на расплавленных солях, у которого еще остались защитники⁴⁷. В этом реакторе топливо и охладитель находятся в расплаве смесей солей фторидов. Соль протекает через активную зону реактора, через промежуточный теплообменник и затем снова попадает в активную зону. Реакторы на расплавленных солях впервые

предложили Эд Беттис и Рэй Брайант из Окриджской национальной лаборатории во время послевоенной попытки сконструировать самолет на атомной энергии⁴⁸. В Окридже было построено два реактора с расплавом солей. Первый был прототипом реактора для самолета с мощностью 1.5 МВт_т (*Экспериментальный самолетный реактор*), который проработал 100 часов в октябре 1954 года. Второй реактор с графитовым замедлителем имел мощность 8 МВт_т (*Экспериментальный реактор на расплавленных солях -ЭРРС*) и проработал с июня 1965 года до декабря 1969 года, продемонстрировав техническую осуществимость концепции размножающего реактора на расплавленных солях.



Рис.4: Испытательная установка с большим потоком в Хэнфорде (Вашингтон). Фото Федерации американских ученых.

В 1972 году Окриджская национальная лаборатория предложила крупную программу разработки, объединяющую создание и работу реактора, получившую название Эксперимента с размножающим реактором на расплавленных солях. Полная стоимость программы оценивалась в 350 миллионов долларов на период в 11 лет⁴⁹. Однако те, кому пришлось одобрить финансирование программы, уже были сильно втянуты в ЖМБРР. Предложение Окриджа было отвергнуто КАЭ отчасти потому, что КАЭ хотело снизить количество кандидатов на разработку, и по причине низкого коэффициента воспроизводства, проектируемого для реактора на расплаве солей по сравнению с тем, что ожидалось от реакторов на быстрых нейтронах⁵⁰. В январе 1973 года Окриджской национальной лаборатории было дано указание прекратить разработку размножающего реактора на расплавленных солях (РРС). Но попытки возобновились через год. В 1973 году Окридж представил более разработанное предложение, предлагающее потратить примерно 720 миллионов долларов в течение 11 лет. Это предложение снова было отклонено, а в 1976 году Окриджу приказали закрыть программу РРС в очередной раз по “бюджетным соображениям”⁵¹.

Атомная электростанция в Шиппингпорте была преобразована в 1975 году в незначительный размножающий реактор, использующий топливный цикл торий -уран-233⁵². Установка в Шиппингпорте начала коммерческую деятельность 26 мая 1958 года и была первой ядерной энергетической станцией в США, генерирующей коммерческую электроэнергию. Это также стало крупным этапом в разработке легководных силовых реакторов, поскольку такое событие явилось пионером в применении топлива из окиси урана в реакторе с водяным охлаждением⁵³.

Быстрый размножающий реактор с газовым охлаждением (БРРГО) продвигался компанией “Дженерал Атомикс”, которая разработала и выбросила на американский рынок высо-

котемпературный реактор с газовым охлаждением (ВТГР)⁵⁴. Первая демонстрационная модель ВТГР была создана на атомной силовой станции в Форте святого Врайна (Колорадо). Форт святого Врайна был соединен с электросетью 11 декабря 1976 года и был отключен 29 августа 1989 года из-за продолжавшихся проблем⁵⁵. Быстрый реактор с газовым охлаждением (БРГО) будет иметь такую же охлаждающую гелиевую технологию, а его топливо будет иметь много общего с топливом ВТГР. Но у него не будет графитового замедлителя (какой имеется у ВТГР), хотя он обладает преимуществом в безопасности из-за большой теплоемкости.

АНАЛИЗ СТОИМОСТИ И ВЫГОД, ПРОВЕДЕННЫЙ КАЭ

КАЭ подготовила три исключительно оптимистических анализа стоимости и выгод для программы ЖМБРР. Первый был написан в 1968 году и выпущен в 1969 году⁵⁶; второй был обновленным (1970 год) вариантом, вышедшим в 1972 году⁵⁷, а третий анализ 1973 года был поначалу выпущен как часть Заявления КАЭ о воздействии на окружающую среду (черновик 1974 года) по поводу программы ЖМБРР⁵⁸.

Эти анализы были исключительно чувствительны к изменениям некоторых важных входных переменных, включающих в себя капитальные затраты на ЖМБРР в сравнении с обычными ядерными реакторами, требования к темпам роста потребления электричества, доступность урана и курс дисконта, которые определяют относительный вес краткосрочных инвестиций и долгосрочных выгод. Делая благоприятные, но нереальные предположения, КАЭ создает привлекательные соотношения между выгодами и затратами в каждом из упомянутых анализов.

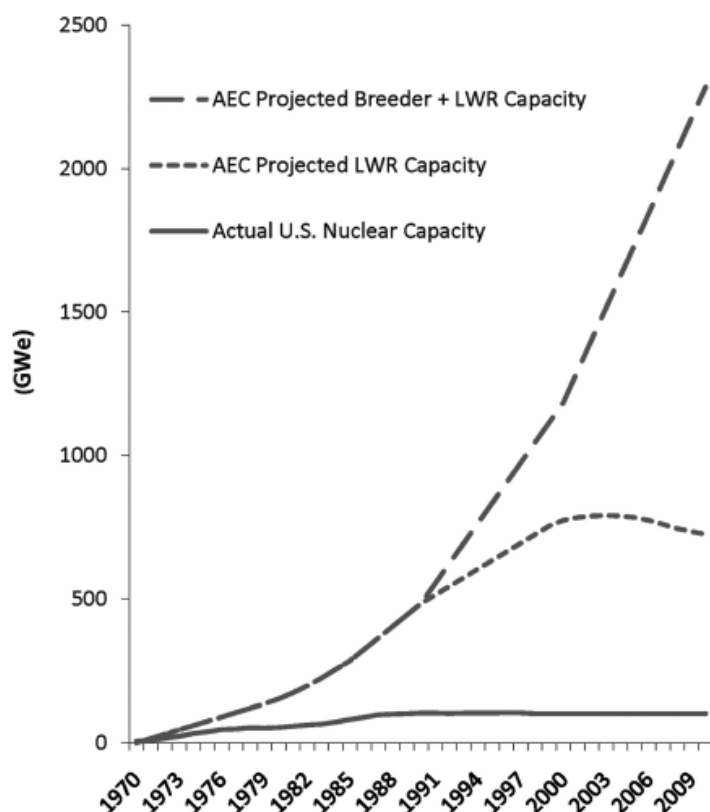


Рис.5: Оценки КАЭ роста ядерной мощности в США. LWR –это легководные реакторы. По мнению КАЭ, урановые запасы США смогут поддержать менее 1000 ГВт, от LWR. Размножающиеся реакторы представлены ЖМБРР. Источник: Заявление КАЭ Wash-1535 (1974) относительно ЖМБРР. На верхнем графике приведены перспективные возможности ЖМБРР и LWR, на среднем – перспективы только возможностей LWR, а на нижнем – реальное потребление ядерной энергии в США.

Эти предположения включают в себя совершенно нереальные допущения о росте ядер-

ной энергии⁵⁹. Например, Рис.5 показывает прогнозы КАЭ на 1974 год по ядерной энергии, где на 2008 год прогнозируется полное потребление ядерной энергии примерно в 2000 ГВт_э. Эта величина примерно в четыре раза превышает реальное полное потребление электроэнергии в США за 2008 год. Реальное полное потребление ядерной энергии в США составило в 2008 году примерно 100 ГВт_э, что приблизительно равно 20% всей электрической мощности США.

ВЗЛЕТ И ПАДЕНИЕ ДЕМОНСТРАЦИОННОГО РАЗМНОЖАЮЩЕГО РЕАКТОРА НА КЛИНЧ РИВЕР

В 1969 году было получено твердое решение о начале работ по первой демонстрационной модели ЖМБРР⁶⁰, финансируемой, в основном, федеральным правительством⁵¹. Размножающий реактор на Клинч Ривер (РРКР) явился совместным проектом нескольких электрических компаний и КАЭ (в дальнейшем Министерства энергетики)⁶². Ответственности за финансирование, строительство и управление РРКР были распределены согласно Меморандуму о понимании 1972 года между КАЭ, властями Долины Теннесси, компанией “Эдисон” (теперь “Экселон”), Корпорацией управления проектом и Корпорацией размножающего реактора. Изготовление реактора было поручено корпорации “Вестингауз Электрик”. Сооружение РРКР было решено начать в 1974 году или 1975 году (а электрогенератора – в 1981 или 1982 году).

Для строительства была выбрана площадка КАЭ на изгибе реки Клинч в Окридже (Теннесси), а руководство электростанцией было отдано властям Долины Теннесси (ВДТ).

Она должна была поставлять электричество в сети ВДТ. РРКР должен был стать связующим звеном между ОУБП и конечным полномасштабным прототипом коммерческого размножающего реактора. Его проектная тепловая мощность составила 975 МВт_т, что примерно в 2.5 раза выше, чем у ОУБП, а мощность электрогенератора равнялась 350 МВт_э. Реактор охлаждался натрием и питался МОХ-топливом, увеличивая запасы плутония.

Однако, начавшись в 1972 году, программа ЖМБРР и проект РРКР в частности начали возбуждать сильное противодействие, связанное с экономическими перспективами, а также с опасениями относительно нераспространения и безопасности. Президент Джимми Картер 24 марта 1977 года, основываясь на решении президента Форда от 28 октября 1976 года, отдал распоряжение о бессрочном запрещении коммерческой переработки и повторного применения плутония в США. В этом же распоряжении президент Картер отложил процесс лицензирования на получение ограниченного разрешения проводить работу над РРКР.

Решения президентов Форда и Картера стали, в основном, реакцией на использование Индией плутония, выделенного при содействии США по программе “Атомы для мира”, для проведения ядерного взрыва в 1974 году. В это же время Бразилия, Пакистан и Южная Корея заключили контракты на закупку предприятий по переработке во Франции и Германии. Правительство США подозревало, что три эти страны были заинтересованы в выделении плутония для военных целей.

Наряду с этими тревогами по поводу распространения срочность в размножающих реакторах начала таять. Президенту Картеру намекнули, что прогнозы КАЭ о росте ядерной мощности в США и, следовательно, ее утверждения о том, что США вскоре выиграют от дешевого урана, были сильно преувеличены⁶⁵.

Возрастание затрат также сыграло значительную роль в расширении оппозиции проекту. В сентябре 1972 года во время слушаний в Объединенном комитете по атомной энергии КАЭ представила оценку расходов на демонстрационную установку РРКР в объеме 699 миллионов долларов. Федеральное правительство должно было обеспечить 422 миллиона долларов через КАЭ, а оставшуюся часть покрывали электрические компании. Проект должен был приступить к начальным операциям в 1979 году⁶⁶. В следующем году компании обязались выплатить 257 миллионов долларов, а остаток – в сентябре 1983 года в объеме 340 миллионов долларов. Но к 1974 году, когда были рассмотрены детали проекта, оценка полных затрат на проект возросла до 1.7 миллиарда долларов. К сентябрю 1983 года, когда было затрачено примерно 1.7 миллиарда долларов, оценки затрат на проект выросли свыше 4 миллиардов долларов. В соответствии с контрактом между Министерством энергетики и частными компаниями, практически все дополнительное финансирование придется покрывать правительству⁶⁷.

Связанный с этим вопрос заключался в высокой цене строительства размножающих реакторов для получения электроэнергии. До конца 1975 года КАЭ предполагала, что капитальные затраты на размножающие реакторы должны уменьшиться до такого уровня, как у легководных реакторов, в течение 15 лет. В 1977 году эта оценка была пересмотрена в сторону повышения до постоянно более высокого уровня затрат на 25-75%. Это означало, что цене урана придется расти до 450-1300 долларов для экономии урана, чтобы скомпенсировать дополнительные капитальные расходы на размножающие реакторы⁶⁸.

В исследовании, проведенном для консервативного Фонда наследия в 1982 году, Генри Сокольски, ссылаясь на изучение контрактов, выполненное для Агентства США по контролю над вооружениями и разоружению, обратил внимание на то, что с учетом неравенства предполагаемых капитальных затрат выравненная цена урана будет почти в 18 раз выше текущей цены⁶⁹. Такие исследования затрат привели многие консервативные группы к противодействию КРРР. Экономика размножающих реакторов кажется столь же туманной сегодня, как и в 1983 году⁷⁰.

Несмотря на возражения администрации Картера, Конгресс продолжил финансирование КРРР. Хотя строительство на площадке не могло развиваться, проект продолжал заказывать и помещать на склады важные компоненты. В 1981 году президент Рональд Рейган возобновил процесс лицензирования строительства КРРР. К концу 1982 года проект был в основном завершен, а большинство компонент либо были на руках, либо были заказаны⁷¹. Но 23 октября 1983 года Конгресс снял финансирование на 1984 финансовый год для КРРР, а 31 декабря 1983 года Ядерная регулирующая комиссия прекратила процесс лицензирования и упразднила одобрение лицензии на работу, которую она поддержала годом раньше. В результате этих действий разработка размножающих реакторов в США фактически завершилась.

ПОПЫТКИ ВОСКРЕСИТЬ БЫСТРЫЕ РЕАКТОРЫ В США

С момента прекращения работ по КРРР в 1983 году Аргоннская национальная лаборатория и Управление программой ядерной энергии в Министерстве энергетики продолжали искать пути для разработки реакторов на быстрых нейтронах в США, во-первых, поддерживая интегральную концепцию быстрых реакторов⁷², затем через Международный форум четвертого поколения и совсем недавно с помощью Глобального партнерства по ядерной энергии (ГПЯЭ). До сих пор, однако, эти инициативы содержали в основном только исследования на бумаге.

Интегральный быстрый реактор и пирообработка

Поминая кончину проекта реактора на Клинт Ривер, ученые АНЛ разработали и поддерживают концепцию Интегрального быстрого реактора (ИБР). Подготовленный по образцу *EBR-2* и соединенной с ним Установки топливного цикла (смотрите обсуждение *EBR-2*), ИБР будет объединять реактор размножения плутония с процессами пиротехнической обработки и электро-очистки, расположенными поблизости. В такой конфигурации плутоний будет отделяться от незначительного количества трансурановых элементов и заново вводиться в новое топливо.

ИБР был прорекламирован как ключ к тому, чтобы сделать размножающий реактор экономичным, устойчивым к распространению и приемлемым с точки зрения окружающей среды⁷³. Но было достаточно оснований для скептицизма. Более важно то, что пиро-обработка смотрится более дорогой по сравнению с обычной переработкой. Более того, если технология ИБР будет принята страной, не имеющей ядерного оружия, эта технология обеспечит страну доступом к тоннам плутония в каждом расположенном вблизи реакторе и установках для переработки. Кадры экспертов, натренированных в химии трансуранов и металлургии плутония, смогут отделить плутоний от других трансурановых элементов, используя горячие камеры и другие имеющиеся установки. Проведенное в 1992 году исследование, поддержанное совместно Министерством энергетики и Государственным Департаментом США, рассматривает множество путей для использования заводов пиропереработки, чтобы получить относительно чистый плутоний⁷⁴.

Несмотря на эти проблемы, АНЛ была способна привлечь федеральную поддержку концепции ИБР в течении десятка лет до тех пор, пока администрация Клинтона прекратила программу ИБР, а Конгресс завершил ее финансирование в 1994 году. В качестве политического компромисса с Конгрессом стороны пришли к соглашению, что когда *EBR-2* будет закрыт, финансирование исследований по переработке топлива будет продолжено под новым названием – “ проект повторного использования актинидов”⁷⁵.

Через десяток лет характер программы изменится, и ее будут продвигать как необходимую для долгосрочного управления ядерными отходами, что стало центральной частью программы ГПЯЭ администрации Джорджа Буша.

После того, как Конгресс прекратил финансирование программы ИБР, Министерство энергетики сохранило свою программу пирообработки нетронутый, выбрав ее для переработки 3.35 метрических тонн отработанного топлива *EBR-2* и *ОУБЛ*, залитого натрием, в Национальной лаборатории Айдахо. В 2006 году Министерство энергетики провело оценку возможности обработать этим способом оставшиеся 2.65 тонны такого топлива за восемь лет за 234 миллионов долларов, включая обработку отходов и удаление их при стоимости переработки примерно 88000 долларов за кг⁷⁶.

Международное сотрудничество

Расходы на НИР для продвинутых ядерных энергетических реакторов сегодня гораздо меньше того, что было в 70-х годах. Это приводит к большему международному сотрудничеству.

Одним примером такого сотрудничества между ведомствами, финансируемыми государственными НИРами, служит Международный форум четвертого поколения. Этот форум возник в 2001 году по инициативе Соединенных Штатов, чтобы облегчить международное сотрудничество по проектированию нового поколения ядерных реакторов, намечаемых к развертыванию после 2030 года. В 2002 году Форум отобрал шесть типов для изучения, включая три размножающих реактора на быстрых нейтронах, охлаждаемых, соответственно, жидким натрием, жидким сплавом свинца с висмутом и гелием. Таким образом, сотрудничество по этим вопросам было сосредоточено на координации и объединении национальных исследований в областях проектирования реакторов, сопротивления распространению, безопасности, технологий производства топлива, разработки материалов и на других вопросах⁷⁷.

Второй пример сотрудничества – Международный проект по инновационным ядерным реакторам и топливным циклам (МПИЯР), был инициирован резолюцией Совета МАГАТЭ в 2001 году благодаря отчасти исключению России и ряда других стран, с которыми США не имели соглашений по ядерному сотрудничеству, из Форума четвертого поколения. Поэтому МПИЯР издал “Руководство по оценке инновационных ядерных реакторов и топливных циклов” и справочники о том, как осуществлять оценку “инновационных систем по ядерной энергии”. Сейчас члены МПИЯР сотрудничают по исследовательским проектам, выдвинутым разными странами, и оценивают предложенные системы⁷⁸.

В 2006 году администрация Джорджа Буша предложила Глобальный план по ядерной энергии (GNEP) с целью расширить ядерную энергетику в США и за границей с уменьшением рисков распространения и требований к долгосрочным хранилищам для размещения радиоактивных отходов. Для достижения этих целей администрация предложила отказаться от однократно используемого ядерного топлива, когда ядерное топливо будет постоянно храниться в геологических хранилищах, ради разработки и использования замкнутого топливного цикла, основанного на продвинутой переработке ядерного топлива и “сжигающих” реакторах на быстрых нейтронах.

Программа GNEP проектировала применение реакторов на быстрых нейтронах скорее для сжигания, а не для размножения плутония и незначительных трансурановых элементов (нептуний, америций и кюрий), чтобы избежать необходимости помещения этих радиоактивных материалов с большим периодом полураспада в геологическое хранилище отходов. Отношение числа быстрых реакторов к обычным реакторам зависит от коэффициента конверсии (КК), который определяется как отношение скорости производства к скорости разрушения трансурановых элементов в реакторе на быстрых нейтронах. Для таких реакторов возможен широкий диапазон значений КК, поскольку величина КК зависит от конструкции актив-

ной зоны. Чем ниже коэффициент конверсии быстрого реактора, тем меньше потребуется сжигающих реакторов. Вообще говоря, количество быстрых сжигающих реакторов пропорционально величине $KK/(1-KK)$. В 1996 году в докладе Национального исследовательского совета цитировалось высказывание компании "Дженерал Электрик" о том, что минимально возможное значение KK , которое может быть получено от конструкции ее быстрого реактора PRISM и совместимо с приемлемой безопасностью, равно 0.6⁷⁹. Аргоннская национальная лаборатория гораздо позже утверждала, что значение $KK=0.25$ может быть легко достигнуто⁸⁰. Если предположить, что KK быстрого реактора лежит в диапазоне 0.25-0.6, потребуется 40-75 ГВт_э от быстрого реактора на каждые 100 ГВт_э легководного реактора⁸¹.

:Несмотря на переход от размножения плутония к его сжиганию, мечта о размножении не умирает. Одна из конструкций сжигающего реактора на быстрых нейтронах Аргоннской национальной лаборатории отличается компактной активной зоной, где инертный (стальной) бланкет нельзя просто заменить на бланкет из урана или обедненного урана, удобный для размножения. Но АНЛ в 2007 году выбрала другую конструкцию, в которой можно осуществить перевод в режим размножения гораздо легче, но за более высокую цену (примерно на 0.8 цента за кВт-час)⁸².

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Хотя существуют вопросы безопасности, характерные для жидкометаллических быстрых реакторов, не кажется очевидным, что они оказались доминирующими для кончины программы размножающих реакторов в США. Более важными были тревоги по распространению и растущее убеждение в том, что размножающие реакторы не будут требоваться или не смогут стать конкурентными по сравнению с легководными реакторами в течение десятилетий, если не навсегда.

Приняв программу GNEP, Министерство энергетики отразило возникший интерес к быстрым реакторам и поначалу к сжигающим реакторам, вызывающим деление актинидов из отработанного топлива легководных реакторов. Пока что новые проекты существуют в основном на бумаге, а перспективы больших усилий для разработки сжигающих реакторов в лучшем случае остаются неопределенными. Администрация Обамы прекратило действие программного заявления GNEP и усилий Министерства энергетики по стремлению к близкой коммерциализации быстрых реакторов и замкнутых топливных циклов для преобразования отходов.

Однако администрация Обамы будет продолжать НИРы по быстрым реакторам и продвинутым топливным циклам как возможным долгосрочным вариантам. Экономические аргументы против таких реакторов остаются сильными⁸³.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. Большинство материалов в этом и нескольких последующих секциях основано на работе Герберта Коутса "The Development of Breeder Reactors in the United States," *Annual Review of Energy* 8 (1983): 383.
2. Catherine Westfall, "Vision and reality: the EBR-II story," *Nuclear News* 47 (2004): Part 2, 25.
3. Смотрите [2].
4. Уолтер Зинн – студент Ферми, вместе с ним соорудил "Чикагский котел", а затем стал первым директором Аргоннской национальной лаборатории, которая была создана на основе Металлургической лаборатории 1 июля 1946 года. В 1947 году Зинн руководил сооружением трех экспериментальных реакторов. Richard G. Hewlett and Francis Duncan, *Atomic Shield: A History of the United States Atomic Energy Commission: Volume II 1947-1952* (University Park: Pennsylvania State University Press, 1969), 1972 reissue in paper of 1969 edition, 28.
5. Смотрите [2], 25-26.
6. Walter Mitchell, III and Stanley E. Turner, "Breeder Reactors," Oak Ridge: U.S. Atomic Energy Commission, Division of Technical Information (1971): 32.
7. Смотрите IAEA, *Fast Reactor Database: 2006 Update*, IAEA-TECDOC-1531 (Vienna: International Atomic Energy Agency, 2006), <<http://www.iaea.org/index.html>> (доступ с 14 июня 2009 года); "Brief History of IAEA's Project on Technology Advances in Fast Reactors and Accelerator Driven Systems,"

8. <[http:// www-frdb.iaea.org/auxillary/history.html](http://www-frdb.iaea.org/auxillary/history.html)> (доступ с 14 июня 2009 года). Merle E.Bunker, "Early Reactors," *Los Alamos Science* 7, (Winter/Spring 1983): 124-131.
9. Смотрите [7], Merle E.Bunker, 127.
10. Center for Disease Control, ORAU Team, NIOSH Dose Reconstruction Project, "Technical Basis Document for the Los Alamos National Laboratory – Site Description," ORAUT-TKBS-0010-2 (May 2004).
11. *The Technology of Nuclear Reactor Safety*, ed. T.J. Thompson and J.G. Berkeley (Cambridge: MIT Press, 1964): 686.
12. Смотрите [7], Merle E.Bunker, 130.
13. Смотрите [11], 130-131.
14. Richard G. Hewlett and Francis Duncan, *Nuclear Navy:1946-1962* (Chicago: University of Chicago Press, 1974), 272-273.
15. Смотрите [13], 274.
16. Смотрите [2], 25-26. Это решение втянуло Зинна в отнявшие много времени пререкания о национальной программе как раз тогда, когда он занимался организацией послевоенной программой исследований в Аргонне и переводом работ по реакторам с военных лабораторных площадок в новое место юго-западнее Чикаго.
17. Смотрите *Atomic Shield* ([4]).
18. Там же.
19. Смотрите [2], 25-26.
20. Смотрите [2], 26
21. Там же.
22. Смотрите [2], 27.
23. МВт_т означает тепловые мегаватты, а МВт_э – электрические мегаватты
24. H.A. Bethe and J.H. Tait, "An estimate of the order of magnitude of the explosion when the core of fast reactor collapses," *UKAEA-RHM* 56 (1956): 113.
25. Смотрите [1], 391.
26. Смотрите [2], 31-32.
27. American Nuclear Society, *Controlled Nuclear Chain Reaction: the First 50 Years* (La Grange Park, Illinois: 1992), 47.
28. Смотрите *Atomic Shield*: [4], 512.
29. John G. Fuller, *We Almost Lost Detroit* (New York, Reader's Digest Press: 1975), 49-54.
30. Смотрите [1], 393.
31. Смотрите [28].
32. Большая часть последующего заключения о развертывании деятельности с 1962 года по 1972 год взята из решения апелляционного суда от 12 июня 1973 года, который постановил, что КАЭ должна подготовить заявление о влиянии программы ЖМБПР на окружающую среду.
33. КАЭ, "Гражданская ядерная энергия: Доклад президенту," (1962): 41.
34. Там же, 25.
35. Там же, 36.
36. Заявление Милтона Шоу из Отдела разработки и технологии реакторов КАЭ на слушаниях в Конгрессе США по вопросу программы гражданской ядерной энергии 4 марта 1971 года
37. КАЭ, Отдел разработки и технологии реакторов, "Программный план ЖМБПР," (том 1), 1-3. Смотрите также доклад в Палаты представителей США 92-325, 25-26 (1971), где говорилось: "Целью этого доклада программы разработок не было просто показать, что мы можем построить ЖМБПР и работать с ним. Когда это выполнено, нам надо в то же время создать способную к выживанию и конкуренции индустрию ЖМБПР, которая готова и способна проектировать, создавать и управлять крупными (1000 МВт) ЖМБПР."
38. КАЭ. "План программы ЖМБПР," тт. 1-10, WASH-1101-1110 (1968), подготовленный для Отдела разработки и технологии реакторов Аргоннской национальной лабораторией.9
39. КАЭ, "Анализ выгоды и затрат для программы США по размножающим реакторам," WASH-1126, OSTI ID, 4776832 (апрель 1969); US GAO, Доклад Конгрессу "Программа ЖМБПР – прошлое, настоящее, будущее," (28 апреля 1975 года): 3.
40. Смотрите Доклад Палаты представителей США 91-1036 (1970), 21.
41. Смотрите Доклад Конгрессу 117, часть 14 (1971): 18, 200.

42. Смотрите Доклад Платы представителей США, 92-325 (1992): 25.
43. US GAO, "The LMFBR: Promises and Uncertainties," (31 июля 1975 года). В Табл. 9 приведена оценка в 1.795 миллиарда (в долларах 1975 года).
44. Там же.
45. Смотрите [26], 47. Существуют два резонансных пика в сечении поглощения нейтронов ураном-238. При нагревании топлива тепловые колебания урана-238 возрастают, а пик выходит за пределы расширившегося нейтронного спектра. Поэтому доля нейтронов, поглотившихся в уране-238, возрастает с увеличением температуры топлива, что уменьшает число нейтронов, доступных для продолжения цепной реакции. Это обеспечивает быстро действующий механизм обратной связи для отрицательной реактивности.
46. Министерство энергетики, Дирекция окружающей среды, Информационное обеспечение Юго-западного экспериментального быстрого реактора на оксидах. <http://www.em.doe.gov/SiteInfo/SEFOR.aspx> (доступ с 14 июня 2009 года).
47. Смотрите [38]: GAO, 25.
48. Смотрите, например, Чарлз Форсберг, "Сопротивление распространению и характеристики физической защиты реакторов на расплавленных солях," Окриджская национальная лаборатория, черновик (14 сентября 2006 года); а также Ральф Мур и Эдвард Теллер, "Подземная электростанция с ториевым топливом, основанная на технологии расплавленных солей," *Nuclear Technology* 151 (2005): 3, 334-340.
49. H.G. McPherson, "Рискованный реактор на расплавленных солях," *Nuclear Science and Engineering* (1985): 90, 374-380, <http://home.earthlink.net/~bhoglund/mSR.Adventure.html> (доступ с 14 июня 2009 года).
50. Там же.
51. Смотрите [47], Мур и Теллер, 339; [1], 385-389.
52. Смотрите [48].
53. Смотрите [44], 32.
54. Там же.
55. Компания "Дженерал Атомикс" была создана в 1955 году как отделение компании "Дженерал Дайнамикс" (но под своим именем). Ее продали "Галф Ойл" в 1967 году и она была переименована в "Галф Дженерал Атомикс". В 1973 году она стала называться "Компанией Дженерал Атомикс", когда партнером стал "Шелл". Но "Шелл" ушел в 1982 году, а "Галф" назвал компанию "GA Technologies." Вскоре (в 1984 году) Inc. Chevron купил "Галф". Но в 1986 году он был продан компании, владельцами которой были Нил и Линда Блю, а "Дженерал Атомикс" получила современное название.
56. "История электростанции в Форте святого Врайна" (написана сотрудниками), <http://fsvfolks.org/FSVHistory.2.html> (доступ после 14 июня 2009 года).
57. КАЭ США, "Анализ стоимости и выгод для программы американских размножающих реакторов," WASH 1126, OSTI ID: 4776832 (1969).
58. КАЭ США, "Обновленный (1970) анализ стоимости и выгод для программы американских размножающих реакторов," WASH 1184, OSTI ID: 4628590 (1972).
59. КАЭ США, "Предлагаемый черновик заявления об окружающей среде, программа ЖМБРР," WASH-1535 (1974), 1-4.
60. Смотрите, например, Allen L. Hammond, "Управление программой американских размножающих реакторов вызывает скептицизм," *Science* 174 (1971): 809; Thomas B. Cochran "Жидкометаллический быстрый размножающий реактор: Природная и экономическая критика" (Baltimore: The Johns Hopkins University Press, for Resources for the Future, Inc, 1974); Irvin C. Vupp and Jean-Claude Derian, "Размножающий реактор в США: Новый экономический анализ," *Technology Review* (July/August 1974); and Mark Sharetkin, "Решение по быстрому размножающему реактору: анализ ограничений и ограничения анализа," Исследование, подготовленное для совместного экономического комитета Конгресса США, 19 апреля 1976 года.
61. Закон 91-44 (11 июля 1969 года) санкционировал фазу определения проекта ЖМБРР; Закон 91-273 (2 июня 1970 года) санкционировал вступление КАЭ в совместное соглашение по сооружению демонстрационной установки ЖМБРР; Закон 92-84 (11 августа 1971 года) увеличил ассигнования на программу демонстрационной станции.
62. Закон 91-273 (смотрите [60]) санкционировал расходы в размере 50 миллионов долларов наличными, 20 миллионов долларов на услуги и 10 миллионов долларов на использование ядерных материалов для демонстрационной установки. Закон 92-84 (смотрите [60]) уве-

- личил сумму наличных еще на 50 миллионов долларов, доведя полное ассигнование до 130 миллионов долларов. Смотрите [41], 24,
63. Комиссия по атомной энергии была упразднена 19 января 1975 года и заменена двумя агентствами: Администрацией по исследованиям и разработкам в области энергии, а также Ядерной регулятивной комиссией. В октябре 1977 года было создано Министерство энергетики США, руководящее деятельностью упомянутой выше Администрации, а также вопросами энергии в других федеральных агентствах.
64. В “Заявлении президента Форда по ядерной политике,” (Президентские документы, том 12, ном.44, 28 октября 1976 года, 1624) сказано “Я пришел к заключению, что переработка и повторное применение плутония не должны протекать, если только нет убедительных причин для вывода, что мировое сообщество сможет эффективно преодолеть риски распространения.”
65. Президент Картер в “Заявлении об ядерной политике” 27 апреля 1977 года (Президентские документы, т.13, ном.15, 506) сказал: “Мы будем непрерывно откладывать коммерческую переработку и повторное применение плутония, полученного в американских программах ядерной энергии. На основе нашего собственного опыта мы пришли к заключению, что жизненные и экономические программы ядерной энергии могут поддерживаться без такой переработки и повторного применения.”
66. Смотрите, например, T.V. Cochran, R.E. Train, Frank von Hippel and R.H. Williams, “Proliferation Resistant Nuclear Power Technologies, Preferred Alternatives to the Plutonium Breeders,” доклад меньшинства в Обзорном комитете по рассмотрению программы ЖМБРР в Администрации США по энергетическим исследованиям и разработкам (6 апреля 1977 года), <http://docs.nrdc.org/nuclear/files.nuc.770412601a21.pdf> (доступ открыт с 14 июня 2009 года).
67. Смотрите [46], 26.
68. Бюджетное управление Конгресса, “Сравнительный анализ планов альтернативного финансирования проекта размножающего реактора на Клинч Ривер, “ Внутренний рабочий документ (20 сентября 1983 года), 1-2.
69. H. Feiveson, F. von Hippel, and R. Williams, “Энергия деления: Эволюционная стратегия,” *Science* 203 (1979): 330. Цена в 60-180 долларов за фунт U_2O_3 в долларах 1978 года, использованная в этой статье, преобразуется в 2006 долларов за килограмм, если применить коэффициент инфляции (примерно 2.9) и множитель 2.59 (количество фунтов U_2O_3 в кг урана).
70. Henry Sokolski, “Безрассудство с Клинч Ривер,” *The Heritage Foundation, Backgrounder*, 231 (3 декабря 1982 года).
71. Matthew Bunn, John Holdren, Steve Fetter, and Bob van der Zwaan, ‘ Экономика переработки в сравнении с прямым удалением отработанного ядерного топлива,’ *Nuclear Technology* 150 (2005). Авторы показывают, что прямое удаление отработанного топлива от реактора на легкой воде станет гораздо менее дорогим, чем переработка и повторное использование в размножающих реакторах при широком выборе предположений. Например, для предприятия, финансирующего основные объемы переработки и формирования активной зоны за 1000 долларов на кг тяжелого металла и 1500 долларов на кг тяжелого металла, соответственно, и разница в капитальных расходах между реакторами на легкой воде и размножающими реакторами в 200 долларов/кВт_э, цена за кг урана составит 340 долларов, что гораздо выше прогнозируемых цен, даже если ядерная энергия значительно вырастет в последующих десятилетиях; смотрите также статью Эриха Шнайдера и Уильяма Сэйлора “Ядерное деление” в журнале *Наука и всеобщая безопасность*, т.14 (2006).
72. Смотрите [1], 404.
73. Это концепция, где отработанное топливо будет повторно использоваться в том же месте, Jack M. Holl, *Аргоннская национальная лаборатория, 1946-96* (Chicago: University of Illinois Press, 1997),
74. Там же.
75. R.G. Wymer et al., “Оценка распространительного потенциала и международное воздействие Интегрального быстрого реактора,” Martin-Marietta K/IPT-511 (May 1992), подготовлено для Министерства энергетики и Государственного Департамента.
76. Смотрите [72], 456.
77. Министерство энергетики США, “Предпочтительный план размещения залитого натрием отработанного топлива ядерного реактора,” Доклад Конгрессу (март 2006),

- <http://www.ne.doe.gov/pdfFiles/DisPlanForSodBondedSNFMarch2006.pdf>. (доступ открыт с 14 июня 2009 года). Табл.1 и 3. Пирообработка потребует 67% полных затрат.
78. Международный форум четвертого поколения, “Годовой отчет за 2007 год” (2008). <<http://www.gen-4/org/PDFs/annual.report2007.pdf>> (доступ открыт с 14 июня 2009 года).
79. МАГАТЭ, Международный проект по инновационным ядерным реакторам и топливным циклам (INPRO), <<http://www.iaea.org/OutWork/ST/NE/NENP/NPTDS/Projects/INPRO/>> (доступ открыт с 14 июня 2009 года).
80. Национальный исследовательский совет США, Комитет по разделительной технологии и системам трансмутации. *Ядерные отходы: Технологии для разделения и трансмутации*. (Washington, DC: National Academy Press, 1995), 205-206.
81. J. E. Cahalan, M. A. Smith, R. N. Hill, and F. E. Dunn, “Измерения физики и безопасности для быстрого реактора с охлаждением натрием и низким коэффициентом конверсии. (Материалы конференции PHYSOR 2004 года, Американское ядерное общество, Чикаго, апрель 2004).
82. Фрэнк фон Хиппель, “Управление отработанным топливом в США. Отсутствие логики в переработке,” Исследовательский отчет по.3, (2007): 15, 33.
83. Ричард Гарвин, “Повторное использование плутония в американской системе ядерной энергии,” Федерация американской ученых, сообщение для заинтересованной общественности, 60 (2007): 11.