

КОНВЕРСИЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РЕАКТОРОВ НА НИЗКООБОГАЩЕННОЕ ТОПЛИВО И СЛУЧАЙ FRM-II

Александр Глазер

Использование высокообогащенного урана (ВОУ) в качестве топлива в исследовательских реакторах противоречит концепции устойчивых к распространению ядерного оружия ядерных технологий. По этой причине, в течение более, чем двух десятилетий, предпринимаются международные мероприятия по прекращению использования ВОУ в исследовательских реакторах посредством поддержки конверсии этих установок на низкообогащенное топливо (НОУ). В этой статье обсуждаются достижения, неудачи, и перспективы этих усилий.

Немецкий исследовательский реактор FRM-II, который предположительно начнет работу в 2002 году, станет первым реактором с топливом из ВОУ за более, чем за десять лет. Между защитниками и критиками применения ВОУ в этом реакторе имеется разногласие по поводу научного влияния конверсии FRM-II, которая базируется на конструкциях, предложенных Аргоннской национальной лабораторией (АНЛ). Для поддержки процесса принятия решения было проведено независимое компьютерное моделирование, которое предоставило подробную информацию о научной полезности конвертированного реактора. Представлены и обсуждены наиболее важные результаты этих расчетов.

Статья получена 31 мая 2001 года и принята 14 ноября 2001 года.

Ранний вариант этой статьи был представлен на 12 международном летнем симпозиуме по науке и международным отношениям в Москве, 23 – 31 августа 2000 года. Результаты расчетов FRM-II докладывались на 23 международном совещании по уменьшению степени обогащения в исследовательских и испытательных реакторах (RERTR) в Лас-Вегасе, США, 1 – 6 октября 2000 года.

Посылайте корреспонденцию по адресу Alexander Glaser, MIT/SSP, 292 Main Street (E38-658), Cambridge, Massachusetts 02739. E-mail: aglaser@mit.edu

Александр Глазер является аспирантом исследовательского совета социальных наук (SSRC) программы исследований по безопасности Массачусетского технологического института, Кембридж, США, и членом междисциплинарной исследовательской группы по науке, технике, и безопасности (IANUS), Дармштадский технический университет, Германия.

Применение высокообогащенного урана (ВОУ), одного из основных ядерных материалов, пригодных для изготовления, в топливе гражданских исследовательских реакторов является одним из наиболее уязвимых аспектов гражданского ядерного топливного цикла¹. Вслед за обращением, транспортировкой, и долговременным хранением материала неминуемо появляется риск хищения негосударственными личностями и риск использования государствами для военных целей. По этой причине, в течение более, чем двух десятилетий, предпринимаются международные мероприятия по прекращению использования ВОУ в исследовательских реакторах посредством поддержки конверсии этих установок на низкообогащенное топливо (НОУ), которое не может использоваться в качестве расщепляющегося материала в ядерном оружии. В настоящее время, несмотря на то, что количество реакторов с топливом в ВОУ во всем мире уменьшается, для оставшихся установок все еще тре-

¹ В гражданском секторе ВОУ также используется в мишенях исследовательских реакторов (в незначительных количествах) для получения радиоактивных изотопов и в топливе российских ядерных ледоколов.

буется приблизительно одна тонна свежего ВОУ в год². В среднесрочной перспективе, однако, если не будет построено новых установок, а остающиеся будут конвертироваться, как это запланировано, применение ВОУ в гражданском секторе в конце концов полностью прекратится, что существенно повысит устойчивость ядерного топливного цикла к распространению ядерного оружия.

ВОУ ПРОТИВ НОУ

Основной функцией исследовательских реакторов является предоставление максимального количества нейтронов, доступных для научных, промышленных, и медицинских приложений. Для этой цели в исследовательских реакторах, в которых нейтроны получают в процессе деления, должна быть максимально увеличена плотность делящихся ядер в топливе. Это может быть достигнуто при помощи двух различных способов:

- Применения высокообогащенного урана (ВОУ), то есть урана с содержанием делящегося изотопа, урана-235, превышающего 20%, но обычно большего 90%, или
- Применения высокой плотности урана в топливной матрице, которое позволяет использовать низкообогащенный уран (НОУ, содержание U-235 менее 20%) для получения эквивалентной плотности делений.

Частично из-за технических ограничений, в 1950-х и 1960-х годах в основном использовался вариант ВОУ, причем связанный с распространением ядерного оружия риск учитывался, но в конечном счете недооценивался. Только в конце 1970-х годов началась разработка новых видов топлива для исследовательских реакторов, когда международная конференция по оценке ядерного топливного цикла (INFCE) рекомендовала конверсию исследовательских реакторов на низкообогащенное топливо в качестве важной меры для увеличения устойчивости ядерного топливного цикла к распространению ядерного оружия. В частности, программа уменьшению степени обогащения в исследовательских и испытательных реакторах (RERTR), которая первоначально была основана США, но в настоящее время получила широкую международную поддержку, предоставила основной стимул для этой деятельности посредством координации международных мероприятий, побуждающих операторов реакторов к отказу от ВОУ, и подготавливающих исследования по оценке возможности конверсии существующих реакторов³.

В начале 1980-х годов, типичная плотность урана в топливе исследовательских реакторов составляла примерно 1 грамм урана на кубический сантиметр. Долгосрочная оценка потенциала изготовления топлива, то есть, верхний предел допустимой плотности урана в таком топливе, позволяла полагать, что можно достичь примерно 3 граммов урана на кубический сантиметр⁴. Только позднее, когда были обнаружены новые подходящие соединения урана и топливные матрицы, были достигнуты более высокие плотности урана. В настоящее время плотность достигает 4,8 грамма урана на кубический сантиметр. В настоящее время разрабатывается топливо, допускающее плотность урана до 7 – 8 граммов урана на кубический сантиметр и оно должно достичь совершенства к 2006 – 2008 годам⁵.

ОБЗОР МЕРОПРИЯТИЙ ПО КОНВЕРСИИ И НОВЫЙ НЕМЕЦКИЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ

² D. Albright, *Plutonium and Highly Enriched Uranium 1996: World Inventories, Capabilities and Policies*, SIPRI (Oxford University Press, 1997), in particular, chapter 8 and appendix D.

³ См., например, W. Krull, "Progress and Pain with RERTR—20 Years on," *Nuclear Engineering International*, December 1998, pp. 26–28, and A. Travelli, *Status and Progress of the RERTR Program in the Year 2000*, 23rd International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors (RERTR), October 1–6, 2000, Las Vegas, Nevada.

⁴ *International Nuclear Fuel Cycle Evaluation (INFCE)* (International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, 1980), См. также, в частности, , Vol. VIII, p. 142.

⁵ Следует подчеркнуть, что достижимые в настоящее время плотности урана являются непосредственным результатом исследований и разработок, начатых и финансируемых в связи с деятельностью по конверсии. Факт, что такое топливо может быть использовано в ФРМ-II (см. ниже) вместе с высокообогащенным ураном, является поэтому весьма проблематичным.

РЕАКТОР FRM-II

На рисунке 1 показаны даты начала строительства исследовательских реакторов с тепловой мощностью более 1 МВт, в которых используется, или использовалось, топливо с ВОУ⁶. На рисунке показаны только те установки, которые все еще находятся в эксплуатации, или строятся, и выделены те реакторы, конверсия которых полностью или частично завершена, или те, конверсия или окончательное выключение которых определенно запланированы⁷.

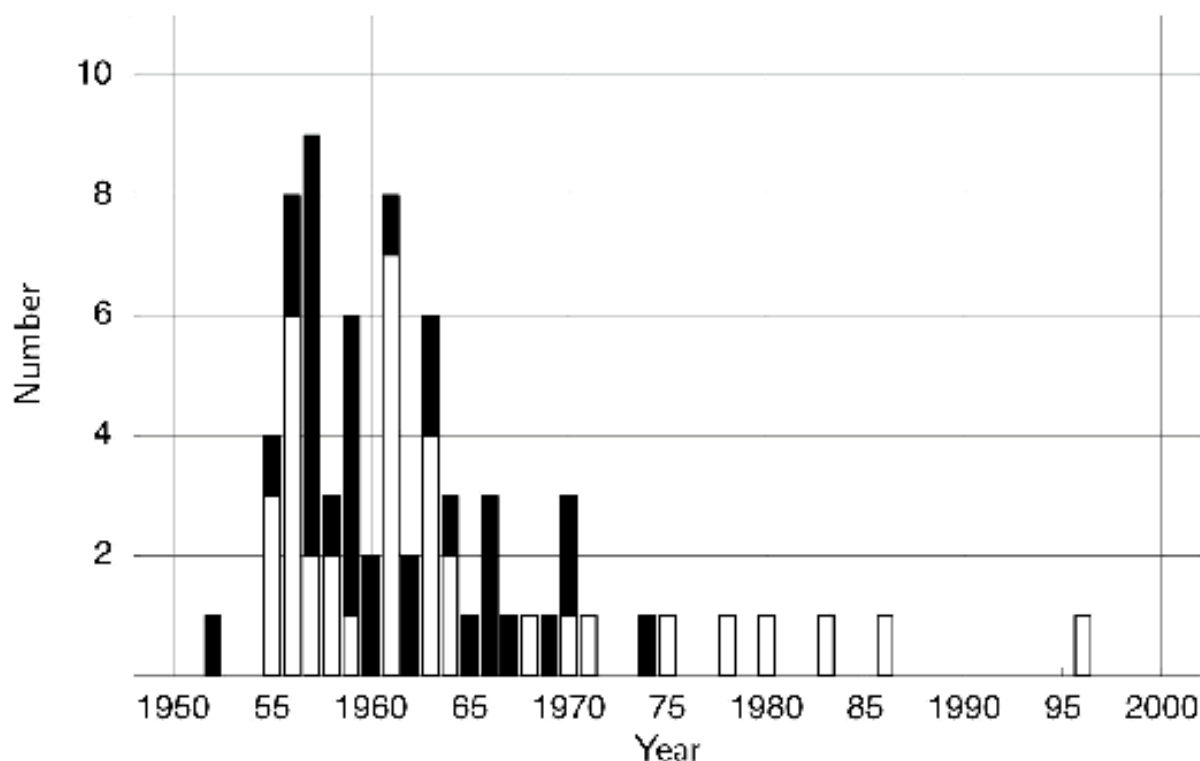


Рисунок 1: Даты начала строительства исследовательских реакторов, работавших в 2000 году, с тепловой мощностью более 1 МВт, которые использовали, или все еще используют ВОУ. Черным отмечены те реакторы, конверсия которых полностью или частично закончена, или те, у которых определенно запланирована конверсия или окончательное выключение. Ссылки указаны в сноске 6.

Драматическое уменьшение количества новых планируемых реакторов, использующих топливо с ВОУ, стало происходить с конца 1970-х годов. Реальная конверсия старых реакторов, построенных до 1980 года, стала непосредственным достижением программы RERTR и связанных с ней программ поддержки. В дополнение к этому, для большинства реакторов, которые все еще пользуются топливом с ВОУ, условия и требования для конверсии были

⁶ Информация по действующим исследовательским реакторам была взята из *Nuclear Research Reactors in the World*, (International Atomic Energy Agency, Reference Data. Series No. 3, September 2000 Edition, Vienna, 2000). Информация по состоянию конверсии соответствующих установок в основном базируется на J. E. Matos, *LEU Conversion Status of U.S. Research Reactors*, September 1996, 19th International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors, October 7–10, 1996, Seoul, Korea. Дополнительная обновленная информация была представлена Дж. Е. Матосом (АНЛ) в частных сообщениях. Более подробная информация по отдельным установкам (представленным на рисунке 1) доступна по адресу www.inesap.org/rr.html

⁷ Не показаны следующие конвертируемые реакторы, к которым относятся эти ограничения: четыре реактора, которые должны быть выключены, и четыре реактора с тепловой мощностью менее 1 МВт.

указаны в подробных исследованиях по реализуемости⁸. В нескольких случаях, подходящее топливо с НОУ оказалось недоступным, и осуществить конверсию таких установок можно будет только с разработанным в настоящее время новым поколением топлива для исследовательских реакторов (уран-молибденового топлива). В некоторых важных случаях существуют соглашения между поставщиками топлива и операторами реакторов, которые гарантируют, что конверсия будет произведена сразу же после того, как станет доступным конкретное топливо. Это справедливо, в особенности, для наиболее важного исследовательского реактора в Европейском Союзе и во всем мире, реактора с высоким потоком в Институте Лауэ-Ланжевена (ILL) в Гренобле (Франция).

В таблице 1 приведена общая информация по всем исследовательским реакторам с тепловой мощностью более 1 МВт с 1980 года⁹. В настоящее время 3 реактора из 26 (расположенные в Китае, Ливии и России) загружены ВОУ¹⁰.

Немецкий исследовательский реактор FRM-II¹¹ является единственным исследовательским реактором, в котором в настоящее время планируется использовать топливо с ВОУ¹². Все прочие планируемые или строящиеся в настоящее время реакторы будут использовать топливо с НОУ с самого начала, к ним относятся проекты в Австралии, Канаде, Китае, Франции, Марокко, Таиланде, и Тайване. В частности, выделяются китайский и французский проекты (CARR, 60 МВт, и JHR, 100 МВт, соответственно), поскольку они отражают политическую переориентацию бывших традиционных пользователей ВОУ¹³. Следовательно, даже государства, владеющие ядерным оружием, поддерживают возникшую норму по нераспространению ядерного оружия с отказом от строительства реакторов с топливом с ВОУ, и прекращают, по крайней мере, частично, применение ВОУ в гражданском секторе. Эти тенденции подчеркивают драматическое отклонение от международного режима нераспространения, которое представляет FRM-II. Поэтому этот проект с самого начала привлек внимание программы RERTR.

Альтернативные конструкции с НОУ были сначала предложены Аргоннской национальной лабораторией (ANL) в 1995 году, перед началом строительства FRM-II¹⁴. Впоследствии ANL разработала дополнительные конструкции активной зоны, основанные на топливе с НОУ, которые сохраняли длительность цикла и максимальный поток тепловых нейтронов оригинальной конструкции, с увеличением мощности до 32 МВт¹⁵. В конце концов, как будет обсуждаться в следующем разделе, когда в 1998 году было избрано новое федеральное правительство Германии, и возник интерес к конверсии реактора FRM-II, ANL внесла значительный вклад в возможную стратегию конверсии, принимая во внимание возросший уровень проектирования этого времени. Однако, между защитниками и критиками существующей конструкции имеется разногласие по поводу научного влияния конверсии FRM-II. Для поддержки процесса принятия решения было проведено независимое компьютерное моде-

⁸ Исключением являются российские исследовательские реакторы. Для большинства из перечисленных МАГАТЭ 12 российских реакторов, все еще использующих ВОУ (действовавших в 2000 году, с тепловой мощностью более 1 МВт) информация по предварительным условиям для конверсии скудна, но, однако, в настоящее время налаживается более широкое сотрудничество с программой RERTR.

⁹ Ссылки смотри в сноске 6.

¹⁰ В перечне МАГАТЭ один российский реактор с топливом с ВОУ, построенный после 1980 года (RU-0021, RBT-10/1), отмечен как выключенный.

¹¹ FRM-II означает *Forschungsreaktor Munchen II*.

¹² Американский проект перспективного источника нейтронов (ANS), который также базировался на топливе с ВОУ, был закрыт в 1996 году, в основном из-за опасений по нераспространению ядерного оружия.

¹³ Китай начал довольно поздно со строительства в 1985 году реактора с топливом с ВОУ (MJTR, 5 МВт); Франция все еще эксплуатирует четыре старых реактора с топливом с ВОУ.

¹⁴ S. C. Mo, N. A. Hanan, J. E. Matos, *Comparison of the FRM-II HEU Design With an Alternative LEU Design*, 18th International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors. September 18–21, 1995, Paris, France.

¹⁵ N. A. Hanan, S. C. Mo, R. S. Smith, J. E. Matos, *An Alternative LEU Design for the FRM-II*, 19th International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors. Seoul, Korea, October 7–10, 1996.

лирование, которое предоставило подробную информацию о научной полезности конвертированного реактора. Наиболее важные результаты этих расчетов представлены и обсуждены в последующей части статьи.

Таблица 1: Действующие исследовательские реакторы с датой начала строительства не ранее 1980 года (вверху) и строящиеся или планируемые исследовательские реакторы (внизу) с тепловой мощностью более 1 МВт (обогащение дается в весовых процентах, реакторы с топливом из ВОУ отмечены звездочкой).

Страна	Код	Название	Начало строительства	Мощность	Обогащение топлива
ДЕЙСТВУЮЩИЕ					
Алжир	DZ-0001	Нур	1987	1 МВт	20%
	DZ-0002	Эс-Салам	1988	15 МВт	3%
Бангладеш	BD-0001	Трига II	1981	3 МВт	20%
Китай	CN-0007	PPR	1986	1 МВт	20%
	CN-0010	NHR-5	1986	5 МВт	3%
	CN-0012	MJTR	1986	5 МВт	90%*
Египет	EG-0002	ETRR-2	1992	22 МВт	20%
Индонезия	ID-0003	GA SIB	1983	30 МВт	20%
Япония	JP-0008	JRR-3M	1985	20 МВт	20%
Южная Корея	KR-0004	Ханаро	1987	30 МВт	20%
Ливия	LY-0001	IRT-1	1980	10 МВт	80%*
Малайзия	MY-0001	Трига II	1981	1 МВт	20%
Перу	PE-0002	RP-10	1980	10 МВт	20%
Россия	RU-0020	RBT-10/2	1983	10 МВт	63%*
США	US-0238	Трига II	1987	1 МВт	20%
	US-0240	Трига II	1986	1 МВт	20%
СТРОЯЩИЕСЯ ИЛИ ПЛАНИРУЕМЫЕ					
Австралия		ANSTO RR	2002	20 МВт	20%
Канада		Мэйпл 1	1990	10 МВт	20%
		Мэйпл 2	1998	10 МВт	20%
		CNF	2003	40 МВт	20%
Китай		CARR	2003	60 МВт	20%
Германия	DE-0051	FRM-II	1996	20 МВт	93%*
Франция		JHR	2003	100 МВт	20%
Марокко	MA-0001	MA-R1	1999	2 МВт	20%
Таиланд	TH-0002	MPR-10	2000	10 МВт	20%
Тайвань		TRR-II	2001	20 МВт	20%

С более общей перспективы, анализ представляет также пример потенциала современных топлив высокой плотности с НОУ в прямом сравнении с конструкцией с ВОУ и альтернативного проекта с НОУ для заданного реактора при сохранении основных характеристик установки.

ВАРИАНТЫ КОНВЕРСИИ FRM-II

Исследовательский реактор FRM-II строился в период с 1996 по 2002 год. Расположенный в Гархинге около Мюнхена (Германия), он эксплуатируется Мюнхенским Техническим Университетом (ТУМ) и в основном предназначен для нейтронных исследований. Реактор разрабатывался для тепловой мощности в 20 МВт и обладает пиковым невозмущенным потоком тепловых нейтронов в $8 \cdot 10^{14}$ нейтронов/см²с. В FRM-II используется одиночный топливный элемент, содержащий общий запас урана в 8,1 кг, обогащенного до 93%, в 113 топливных пластинках закрученной формы (рисунок 2, слева). Ожидаемая длительность цикла будет несколько больше, чем 50 суток. Активная зона охлаждается обычной водой и располагается в центре резервуара замедлителя, заполненного тяжелой водой, где, в частности, располагаются источник холодных нейтронов и каналы с пучками (показанные на рисунке

3)¹⁶.

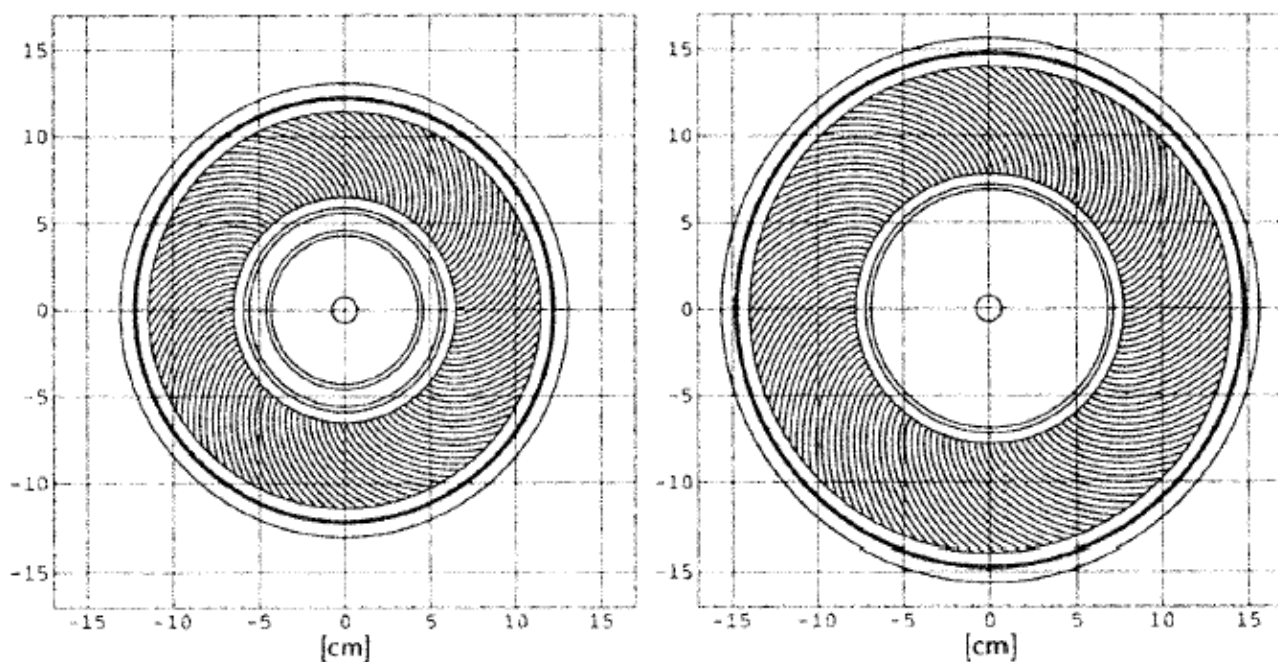


Рисунок 2: Геометрия двух альтернативных топливных элементов для FRM-II: конструкция с ВОУ (слева) и конструкция с НОУ, предложенная АНЛ (справа). Плоскость ху расположена при $z = 0$. Высота активной зоны в обоих случаях равна 70 см.

Тот факт, что в качестве топлива для реактора будет использоваться ВОУ, сильно критиковали с самого начала, как на национальном, так и на международном уровне¹⁷. Тем не менее, благодаря поддержке баварского и бывшего федерального немецкого правительства, строительство реактора началось в 1996 году без серьезного рассмотрения использования НОУ. В январе 1999 года, за несколько месяцев до смены федерального правительства, федеральным министерством по образованию и исследованиям (BMBF) была организована экспертная комиссия. Ее задачей было разъяснение того, возможна ли конверсия реактора после того, как строительство было начато, какими (отрицательными) будут научные последствия конверсии, и какое воздействие окажет применение ВОУ в отношении распространения ядерного оружия. В течение обсуждения были определены три варианта конверсии, в основном базирующиеся на конструкциях с НОУ, разработанных АНЛ¹⁸.

Вариант 1. Увеличение тепловой мощности реактора от 20 МВт до 32 МВт. Основываясь на топливном элементе большего размера и доступном сегодня топливе с НОУ, эта мера должна предоставить те же самые поток тепловых нейтронов и длительность цикла, что и у стандартной конструкции с ВОУ. Этот вариант был отклонен комиссией на ранней стадии, поскольку он фактически приводил к перестройке установки и сопровождался неприемле-

¹⁶ Дополнительную информацию о конструкции реактора можно найти, например, в A. Röhrmoser, *Neutronenphysikalische Optimierung und Auslegung eines Forschungsreaktors mittlerer Leistung mit Zielrichtung auf einen hohen Fluss für Strahlrohrexperimente*, dissertation, Department of Physics, Technical University of Munich, July 25, 1991, or K. Böning, A. Axmann, W. Petry, *Der FRM-II: eine umfassend optimierte Neutronenquelle für die Forschung*, Technical University of Munich, Opa 00229, April 1999.

¹⁷ Смотри, например, W. Liebert, Open letter concerning the planned research reactor FRM-II using highly enriched uranium, *INESAP Information Bulletin*, No. 2, July 1994, pp. 16–18.

¹⁸ Смотри, например, N. A. Hanan, R. S. Smith, J. E. Matos, *Alternative LEU Designs for the FRM-II With Power Levels of 20–22 MW*, 22nd International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors. Budapest, Hungary, October 3–8, 1999.

мыми расходами и задержками¹⁹.

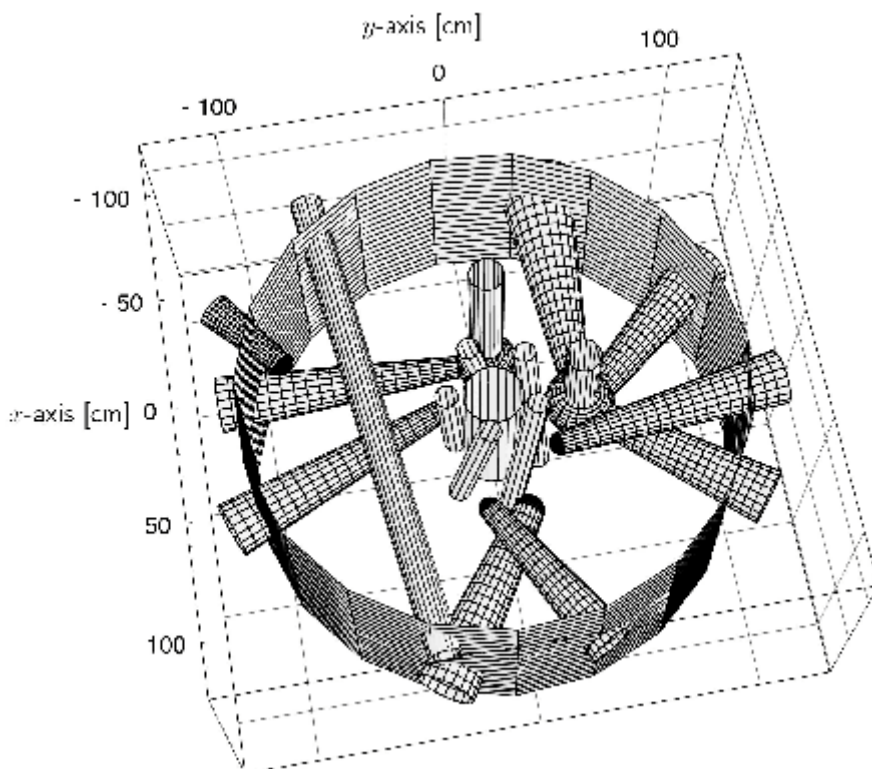


Рисунок 3: Иллюстрация основных компонентов резервуара замедлителя: каналы для пучков от 1 до 10, источники горячих и холодных нейтронов, и стержни безопасности от 1 до 5. Оси определены, как это показано, канал для пучка 1 параллелен оси x и направлен на источник холодных нейтронов, центр которого расположен при $(x,y,z) = (-5; 40; 0)$ см.

Вариант 2. Конверсия реактора перед завершением строительства. При сохранении уровня мощности и длительности цикла она потребует применения топливного элемента увеличенного радиуса и, следовательно, реконфигурации и частичной модификации компонентов резервуара замедлителя (рисунок 2, справа, и таблица 2). Рассматривались два различных варианта (варианты 2а и 2б, подробности приведены в таблице 3). Как только станет доступным недавно разработанное уран-молибденовое топливо, уран-силицидное топливо может быть заменено без дальнейшей модификации реактора.

Вариант 3. Конверсия реактора после завершения строительства, когда станут доступны новые типы топлива с очень высокой плотностью урана, предположительно между 2006 и 2008 годом. И здесь обсуждались две различные стратегии: конверсия на топливо с НОУ с использованием увеличенных топливных элементов, которые могут позволить модификацию активированного реактора (вариант 3а), или конверсия на топливо, обогащенное до 40-60%, которое не потребует никакой модификации реактора (вариант 3б, смотри таблицу 3).

В докладе комиссии обсуждаются за и против этих стратегий конверсии и делается вывод, что конверсия перед пуском является технически возможным и наиболее разумным решением по отношению к политике нераспространения²⁰. Однако, в докладе не делается явного предпочтения ни одному из вариантов, частично, из-за того, что информация, относящаяся к вариантам конверсии, была либо неполной, либо противоречивой, из-за различ-

¹⁹ Как отмечалось ранее, эта стратегия конверсии уже была опубликована АНЛ в 1995 году, до того, как реально началось строительство FRM-II.

²⁰ Federal Ministry of Education and Research (BMBF), *Bericht der von der Bundesregierung eingesetzten Expertenkommission zur Prüfung der Umrüstbarkeit des Forschungsreaktors München II von HEU auf LEU* (Bonn, June 1999).

ных данных, представленных ТУМ и АНЛ. Это противоречие и стало поводом для расчетов, обсуждающихся ниже.

В октябре 2001 года было достигнуто соглашение между федеральным немецким правительством и правительством земли Бавария, которое, по сути, предусматривает конверсию по варианту 3б²¹. Соответственно, реактор должен начать работать с ВОУ, как это первоначально планировалось, и будет преобразован в декабре 2010 года с топливом, обогащенным максимально до 50%.

Таблица 2: Данные по альтернативным топливным элементам.

	Конструкция ТУМ	Конструкция АНЛ
Размеры топливного элемента		
Минимальный внутренний радиус топливного элемента	59,00 мм	71,80 мм
Внешний радиус внутренней трубки зоны	65,00 мм	77,80 мм
Внутренний радиус внешней трубки зоны	114,50 мм	140,00 мм
Максимальный внешний радиус топливного элемента	121,50 мм	147,00 мм
Размеры топливной пластины		
Толщина топлива	0,60 мм	0,76 мм
Толщина оболочки	0,38 мм	0,38 мм
Толщина канала охлаждения	2,20 мм	2,20 мм
Длина дуги внутренней зоны топлива	51,50 мм	–
Длина дуги внешней зоны топлива	10,90 мм	–
Длина дуги активной зоны пластины	62,40 мм	80,31 мм
Длина дуги пластины (от внутренней до внешней трубки)	69,40 мм	87,33 мм
Общая высота топливной пластины	720,00 мм	720,00 мм
Высота активной зоны	700,00 мм	700,00 мм
Число пластин	113	131
Запас урана		
Обогащение	92,65% по весу	26,00% по весу
Полная масса урана в активной зоне	8 108 г	28 865 г
Полная масса урана-235 в активной зоне	7 512 г	6 985 г
Масса урана в пластине	71,75 г	205,8 г

Таблица 3: Данные по стратегиям конверсии FRM-II.

		Вариант 2а	Вариант 2б	Вариант 3а	Вариант 3б
Начало (≥ 2002)	Тип топлива	U ₃ Si ₂	U ₂ Si	Нет действий!	Нет действий!
	Обогащение	24-26% по весу	19,75% по весу		
	Плотность урана	4,8 г/см ³	6,2 г/см ³		
Цель (≥ 2006)	Тип топлива	UMo	UMo	UMo	UMo
	Обогащение	19,75% по весу	19,75% по весу	19,75% по весу	40-70% по весу
	Плотность урана	7-9 г/см ³	7-9 г/см ³	7-9 г/см ³	До 8 г/см ³

МЕТОД РАСЧЕТА

На основании трехмерной модели активной зоны реактора²², для определения всех нейтронно-физических величин, относящихся к оценке влияния конверсии на научную полезность реактора, использовалась программа переноса нейтронов MCNP (версия 4B)²³. Они

²¹ Federal Ministry of Education and Research (BMBF), *Vereinbarung über FRM II vorgestellt*, Press release No. 169/2001, October 25, 2001.

²² Более детальную информацию можно найти в работе A. Glaser, C. Pistner, W. Liebert, *Verifizierung und Präzisierung der Informationen zu den Brennstoff-Varianten für den Forschungsreaktor München II*, IANUS Working Paper 2/2000 (Darmstadt, February 2000).

²³ J. Briesmeister (editor), *MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4B*

включали, в частности, спектр нейтронов, нагрев холодного источника в результате действия гамма-излучения и нейтронов, влияние экспериментальных компонентов в резервуаре замедлителя, а также усредненные по спектру сечения нейтронов, которые, в свою очередь, являются предварительными данными для определения длительности цикла посредством расчета выгорания.

Расчеты по программе MCNP подготавливались при помощи программ, написанных в системе *Mathematica* (версия 4.0.1)²⁴. В зависимости от выбранных параметров, в частности тех, которые определяют конструкцию активной зоны (геометрию и количество топливных пластин, радиусы и т.д.), система *Mathematica* автоматически генерирует входной файл программы MCNP в целом. Эта процедура исключительно полезна, когда анализируются различные конструкции топливных элементов. Например, на рисунке 4 показано представление, выбранное для топливных пластин закрученной формы, которое не может быть непосредственно смоделировано в программе MCNP. Программа определяет оптимальные параметры аппроксимирующих функций и транслирует их в синтаксис программы MCNP. В конечном счете система *Mathematica* предоставляет удобное средство для численной и графической оценки вывода программы MCNP.

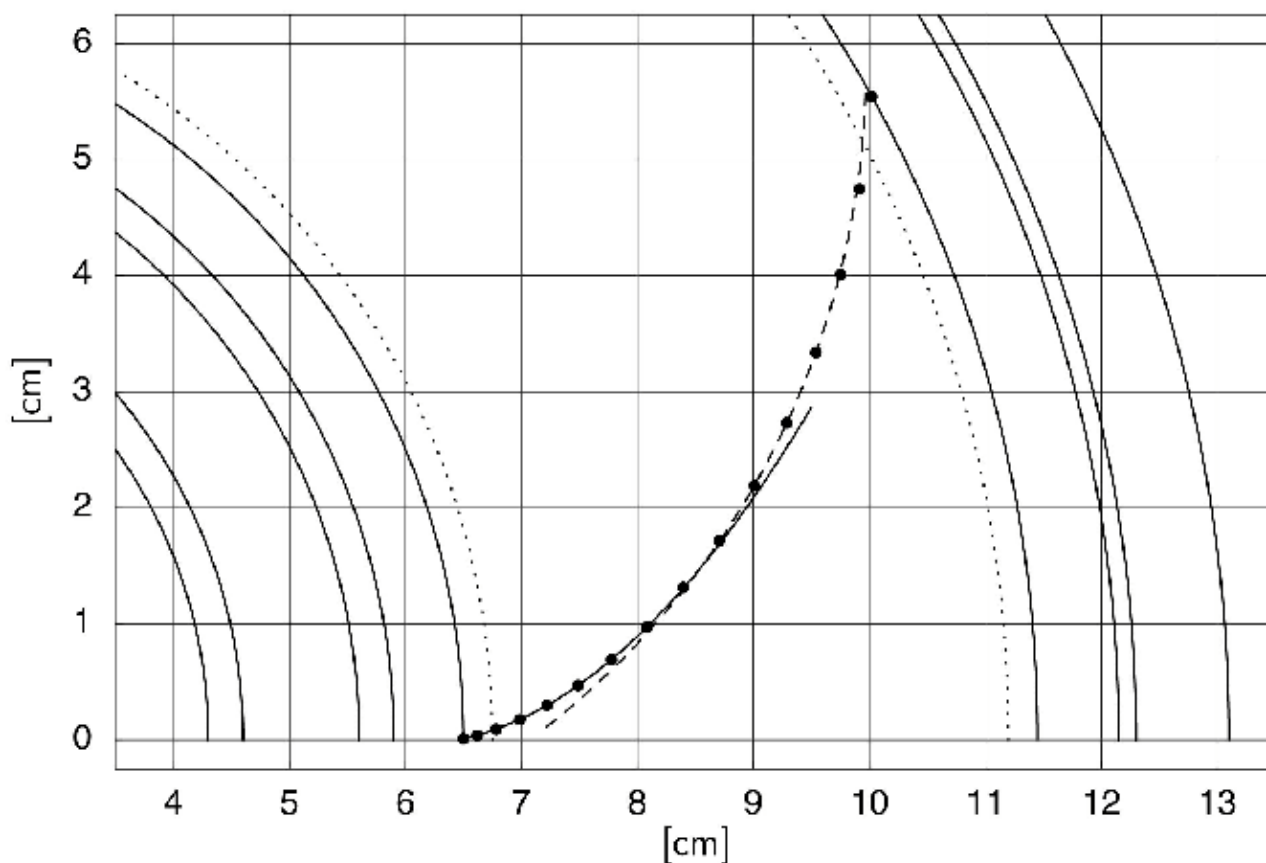


Рисунок 4. Представление топливной пластины закрученной формы при моделировании подходящими аппроксимирующими функциями: параболой (—) и окружностью (- -) в плоскости xu . Сплошными кружками отмечены точные координаты инволюты. Пунктирные линии ограничивают активные зоны топливных пластин.

В невозмущенном случае, топливный элемент, окруженный центральной каналной трубкой, расположен в центре резервуара замедлителя без дополнительных установленных

(Los Alamos National Laboratory, LA-12625-M, 1997).

²⁴ *Mathematica 4.0.1 for Linux*. Wolfram Research, Inc., и S. Wolfram, *The Mathematica Book*, Fourth Edition (Cambridge University Press, 1999).

экспериментальных и реакторных компонент. Высота резервуара равна 300 см, а диаметр равен 220 см, и заполнен тяжелой водой с плотностью $1,1 \text{ г/см}^3$.²⁵ В общем случае, когда цилиндрическая симметрия больше не сохраняется, в модель включаются источник холодных нейтронов и горизонтальные каналы пучков. Поскольку полная и современная информация о конструкции не доступна, в моделировании используется упрощенная модель, в которой смесь жидкого дейтерия и водорода (95 % D_2 и 5% H_2 по весу, с плотностью $0,2 \text{ г/см}^3$) содержится в сферической циркониевой оболочке диаметром 31 см²⁶. Дальнейшие подробности устройства не моделировались²⁷.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Наиболее важные результаты, полученные для различных вариантов конверсии, перечислены в таблице 4. В то время как результаты для различных вариантов с ВОУ очень похожи друг на друга, вариант 2а, предположительно является наиболее предпочтительным вариантом, поскольку все другие стратегии (2б, 3а, и 3б) страдают от серьезного недостатка. Вариант 2б базируется на топливе U_3Si , которое характеризуется худшим поведением при облучении. Хотя и предполагается, что это топливо будет хорошо себя вести в условиях FRM-II, вероятно, понадобятся процедуры дополнительного лицензирования для квалификации топлива. Поэтому привлекательность варианта конверсии 2б существенно сокращается по сравнению с вариантом 2а, в котором используется стандартное топливо U_3Si_2 . Вариант 3а требует модификации активированного реактора, и поэтому его следует рассматривать как исключительно нереалистичный вариант, в то время как вариант 3б опирается на топливо, очевидно расположенное за пределом НОУ и в основном не имеет преимуществ с перспективы нераспространения (смотри обсуждение ниже). Поэтому более подробно рассматривается только вариант 3а²⁸.

Радиальное распределение потока тепловых нейтронов для невозмущенной ситуации, а именно, без дополнительных экспериментальных компонентов в резервуаре модератора, показано на рисунке 5. Максимальное значение в варианте конверсии 2а достигает 79% от исходного значения для ВОУ. Эта величина, однако, появляется ближе к активной зоне, где не извлекается никаких нейтронов для экспериментов, и поэтому она не имеет большого значения при оценке научной полезности реактора. Более соответствующим значением является нейтронный поток в месте расположения холодного нейтронного источника при $r \approx 40$ см. На этом расстоянии от активной зоны уменьшение потока тепловых нейтронов проявляется не так сильно: поток достигает 87% от исходного значения для ВОУ.

Как отмечалось выше, при более сложном моделировании рассматривались также наиболее важные экспериментальные компоненты (смотри рисунок 3). В частности, рассматривались источник холодных нейтронов и каналы для пучков, для того, чтобы определить нагревание холодного источника гамма-лучами и нейтронами, а также спектр нейтронов в каналах для пучков на больших расстояниях от активной зоны.

Руководителями проекта ТУМ отмечалось, что активные элементы большего размера (как предлагалось АНЛ) приведут к увеличению нагрева холодного источника, что, в свою очередь, приведет к непреодолимым проблемам охлаждения. Этот эффект в моделировании не подтвердился, результаты которого скорее поддерживали данные, опубликованные

²⁵ Небольшая добавка водорода прибавлялась для того, чтобы учесть примеси обычной воды (отношение водорода к дейтерию: 0,2 атомных процента).

²⁶ Смотри К. Gobrecht, *Progress on the Cold Neutron Source of the Garching Neutron Research Facility FRM-II*, Proceedings of the 6th Meeting of the International Group on Research Reactors. KAERI/GP-128/98. April 29–May 1, 1998. Taejeon, The Republic of Korea, pp. 377–390.

²⁷ Из-за ограниченной доступности информации об устройстве источника холодных нейтронов, точные оценки абсолютных величин нагревания нейтронами и гамма-лучами сделать трудно. Тем не менее, относительное сравнение тепла, выделяемого в источнике холодных нейтронов при одинаковых условиях моделирования предоставляет хорошую оценку общей ситуации.

²⁸ Результаты расчетов выгорания в этой статье не обсуждаются. Однако, один из основных результатов таков, что длительность цикла для варианта конверсии 2а по крайней мере так же велика, как для исходной конструкции с ВОУ, которая приблизительно составляет 52 дня.

АНЛ²⁹. В случае вариантов 2а и 2б тепло, выделяемое в источнике холодных нейтронов, увеличилось меньше, чем на 1 %, а во всех других случаях выделение тепла уменьшалось³⁰.

Таблица 4: Основные результаты расчетов для вариантов конверсии FRM-II 2 и 3 (величины для невозмущенного случая: максимальный поток тепловых нейтронов $\Phi_{th,max}$ и поток тепловых нейтронов в месте расположения источника холодных нейтронов $\Phi_{th,cns}$. Проведено моделирование относительного нагрева источника холодных нейтронов для возмущенного случая с основными экспериментальными компонентами в резервуаре замедлителя. Величины, приведенные в процентах, являются относительными к стандартной конструкции с ВОУ [100%]).

	ВОУ	Вариант 2а (пуск)	Вариант 2б (пуск)	Вариант 2 (цель)
Тип топлива	U ₃ Si ₂	U ₃ Si ₂	U ₃ Si	UMo (6 вес.%)
Обогащение (в % по весу)	Около 93%	26,00	19,75	19,75
Плотность урана (г/см ³)	3,0/1,5	4,8	6,2	7,1
Невозмущенный случай:				
$\Phi_{th,max}$ (10 ¹⁴ н/см ² с)	8,06	6,40 (79,3%)	6,44 (79,9%)	6,27 (77,8%)
$\Phi_{th,cns}$ (10 ¹⁴ н/см ² с)	5,69	4,93 (86,6%)	4,95 (87,0%)	4,81 (84,6%)
Возмущенный случай:				
Относительный нагрев CNS	100%	100,8%	100,8%	98,7%
	ВОУ	Вариант 3а (цель)	Вариант 3б (цель)	
Тип топлива	U ₃ Si ₂	UMo (6 вес.%)	UMo (6 вес.%)	
Обогащение (в % по весу)	Около 93%	19,75	50,00	
Плотность урана (г/см ³)	3,0/1,5	7,1	8,0/4,0	
Невозмущенный случай:				
$\Phi_{th,max}$ (10 ¹⁴ н/см ² с)	8,06	6,27 (77,8%)	7,63 (94,6%)	
$\Phi_{th,cns}$ (10 ¹⁴ н/см ² с)	5,69	4,81 (84,6%)	5,45 (95,9%)	
Возмущенный случай:				
Относительный нагрев CNS	100%	98,7%	95,1%	

Спектр нейтронов в канале для пучка 1, который сам по себе отвечает более, чем за 40 % научной полезности установки³¹, показан на рисунке 6. Максимальное значение потока холодных нейтронов сокращается на несколько меньше, чем 10% по сравнению с исходной конструкцией с ВОУ. Поток быстрых нейтронов, который рассматривается как нежелательный фоновый сигнал, увеличивается (между 1 эВ и 10 МэВ) в среднем на 17%.

ОЦЕНКА ВАРИАНТОВ КОНВЕРСИИ

При оценке общих последствий предложенных вариантов конверсии FRM-II (по отношению к исходному варианту с ВОУ) следует учитывать несколько соображений. Помимо научной полезности преобразованного реактора и вопросов нераспространения в различных вариантах конверсии, также заслуживают внимания надежность поставки топлива, утилизация отработанного топлива, задержки, и экономические соображения.

²⁹ Смотри ссылку в сноске 18.

³⁰ В последней публикации ТУМ предполагается, что противоречию между возможным увеличением нагрева источника холодных нейтронов могло придаваться слишком большое значение. Представляется, что при необходимости возможно достичь существенного дополнительного охлаждения: «Мощность холодильника [...] может быть увеличена [от 5 кВт] до 8 кВт охлаждающей мощности за счет добавления дополнительного компрессора и Трубин дальнейшего расширения, в случае дополнительных требований к охлаждению вблизи активной зоны (например, для второго источника холодных нейтронов)». (E. Gutmiedl and K. Gobrecht, *Status Report on the Cold Neutron Source of the Garching Neutron Research Facility FRM-II*. IGORR 8 Meeting, April 17–20, 2001, Munich, Germany.)

³¹ В соответствии со второй ссылкой в сноске 16, фактор использования трубы для потока 1 будет равен 42,5%.

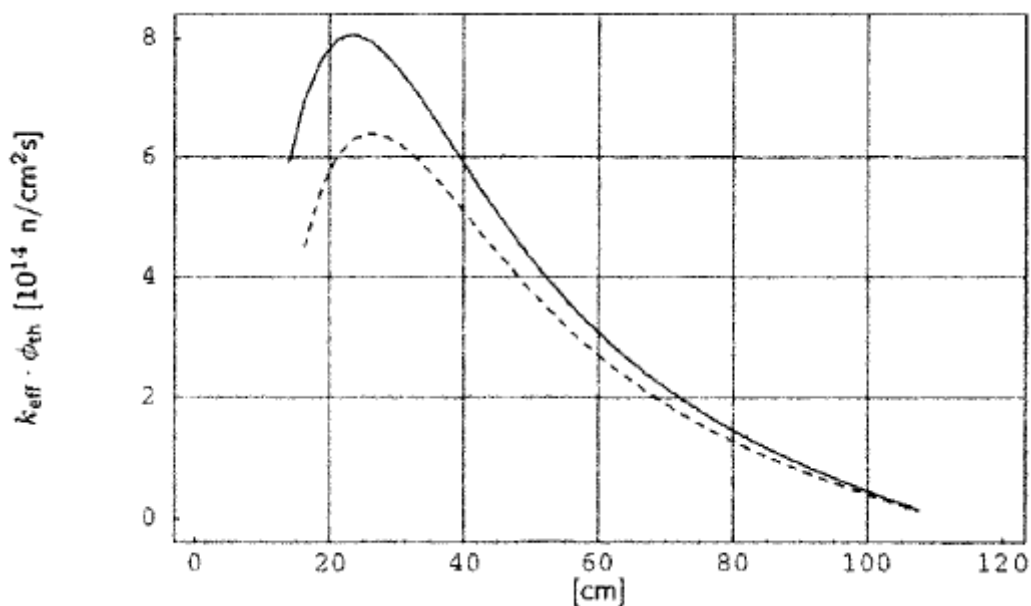


Рисунок 5: Радиальное распределение потока тепловых нейтронов для конструкции с ВОУ (—) и для варианта конверсии 2а (- -). Максимальное значение в варианте конверсии составляет 79% от исходного значения для ВОУ, а поток тепловых нейтронов на $r = 40$ см составляет 87% от него. Расстояние измеряется от центральной оси активной зоны.

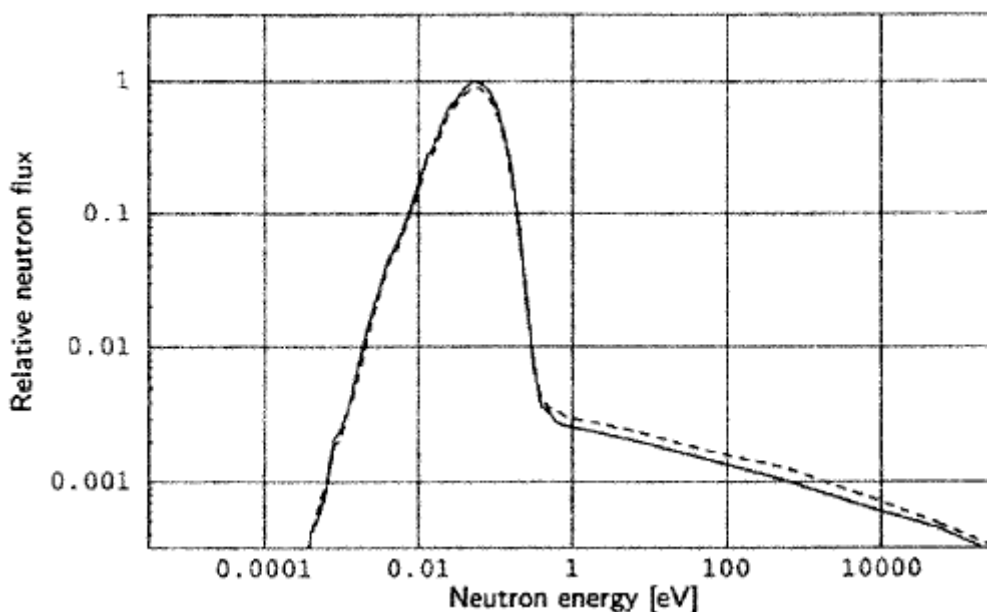


Рисунок 6: Спектр нейтронов в канале для пучка 1 при $x = -70$ см, ось определена на рисунке 3. Стандартная конструкция с ВОУ (—) и вариант 2а (- -). Относительное максимальное значение для конструкции с НОУ: 90,7% от значения для ВОУ. Каждый спектр основан на оценке 40 миллионов нейтронных историй.

Научная полезность

Понизившийся поток нейтронов во всех вариантах конверсии с НОУ потребует увеличения длительности измерений. На основании выполненных расчетов и сравнения значений (для варианта 2а) в месте расположения источника холодных нейтронов, где поток нейтронов уменьшается на 13,4%, получается увеличение длительности измерений примерно на

15%³². Уменьшение потока нейтронов становится менее выраженным на больших расстояниях от активной зоны. В канале для пучка 1 оно составляет не более 10%. Качество спектра нейтронов, а именно, отношение сигнала к шуму, не сильно изменяется при использовании активной зоны с НОУ.

Нераспространение

В той ситуации, когда другие важные реакторы с высоким потоком готовятся к конверсии на НОУ, Германия подает плохой пример для международного сообщества исследовательских реакторов и ставит под угрозу заметный прогресс, которого за последние годы достигла программа RERTR³³. В конечном счете, случай FRM-II может задержать полное прекращение использования ВОУ в гражданском секторе на следующие десятилетия.

По отношению к свойствам отработанного топлива, следует отметить, что выгорание топлива очень невелико. Доля урана-235 в топливе с ВОУ уменьшается от начального обогащения в 93% до средней величины примерно в 88,5%, т.е., всего на 4,5%. Поскольку общий запас урана в топливных элементах также остается довольно высоким (несколько более 7 кг), отработанное топливо также представляет серьезную проблему для распространения.

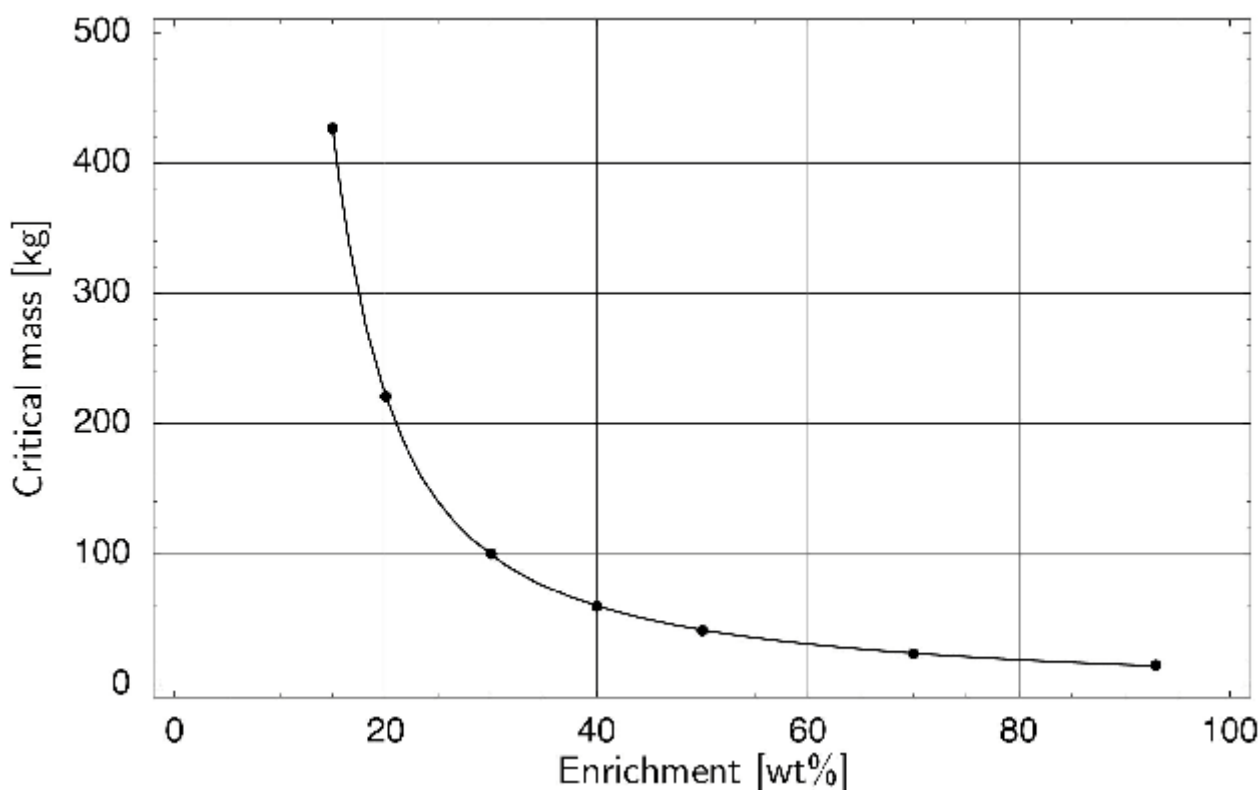


Рисунок 7: Критическая масса урановой сферы с бериллиевым отражателем в зависимости от обогащения ураном-235. Моделирование в программе MCNP 4B при 300 K с библиотекой сечений ENDF/B-VI. Толщина отражателя 10 см. Предполагаемое значение плотности урана: 19 г/см³. Обогащение дается в весовых процентах.

В то время как уран, обогащенный до 20%, является весьма непривлекательным для использования в оружии, критическая масса урана для больших степеней обогащения быстро уменьшается (рисунок 7). В случае металлической сферы с бериллиевым отражателем абсолютное значение одной критической массы увеличивается от 15 кг для обогащения в 93% меньше, чем в три раза, когда обогащение снижается до 50%. Это можно сравнить с критической массой примерно в 220 кг для урана, обогащенного до 20%. Вследствие этого, аль-

³² Предполагается, что для данного эксперимента длительность измерения должна быть увеличена таким образом, что полное количество нейтронов остается постоянным, т.е. $\Phi_1 t_1 = \Phi_2 t_2 = const$.

³³ Смотри ссылки в сноске 3.

тернативное обогащение топлива до 50%, предлагаемое в недавно рассматривавшемся варианте конверсии 3б, нельзя рассматривать как защищенное от распространения. Конверсия реактора по этому варианту не приведет к значительному улучшению сопротивляемости распространению.

Поставка и утилизация топлива

Количество ВОУ, ежегодно требующееся для эксплуатации FRM-II, составляет более 40 кг (пять топливных элементов с запасом урана по 8,1 кг в каждом). В соответствии с поправкой Шумера от 1992 года, США не будет поставлять топливо для FRM-II. По этой причине оператор реактора планирует осуществлять долговременную поставку топлива с ВОУ из России. Для полного срока эксплуатации установки проект должен рассчитывать на поставку материала, который является международно запрещенным. Следует подчеркнуть, что вариант 3б не решит проблему поставки, стоящую перед оператором, поскольку топливо, обогащенное до 50%, также классифицируется как ВОУ. Второй вариант конверсии, превышающий лимит в 20% (вариант 2а, обогащение 24 – 26%), однако, может оказаться приемлемым с точки зрения нераспространения, в особенности, если он рассматривается как временное решение.

Неожиданные проблемы могут возникнуть также в конце топливного цикла. Поскольку сотрудничество с программой приема отработанного топлива США исключается, и услуги по переработке уран-силицидного топлива не предоставляются, Германия должна будет в конце концов разработать и внедрить стратегию утилизации отработанного топлива с ВОУ из FRM-II, которая может оказаться дорогим предприятием. Например, США разрабатывают в настоящее время технологию «Расплавь и разбавь» для обращения с наследием отработанного топлива исследовательских реакторов в программе стоимостью в два миллиарда долларов³⁴.

Задержки и расходы

За исключением варианта 3б, в котором не ожидается значительных задержек, конверсия реактора, вероятно, будет связана с задержкой или временным отключением на 2 – 3 года. Критическим вопросом является то, когда эта задержка будет наиболее приемлемой. Анализ доступности европейских установок для нейтронных исследований показывает, что задержка сегодня окажет меньшее влияние, чем задержка на несколько лет для конверсии через 10 лет, или около того, когда другие предназначенные для нейтронных исследований установки будут выключены, а планируемый европейский источник расщепления (ESS) еще не будет доступен. И опять это сильно свидетельствует в пользу конверсии FRM-II до пуска (варианты 2а и 2б).

Дополнительные расходы, которые возникают из-за конверсии или задержки пуска реактора, появляются в любом из сценариев конверсии. Даже если отсутствует точный анализ, эти расходы будут приемлемыми по сравнению с полным бюджетом проекта. В этом контексте было бы предпочтительно принять решение о конверсии сразу же после опубликования отчета комиссии в июне 1999 года, когда резервуар замедлителя еще не был установлен.

Тем не менее, вариант с ВОУ также может привести к существенным дополнительным расходам. Например, вероятная окончательная утилизация ВОУ внутри страны и невозможность кооперации с программами США наложат дополнительное финансовое бремя в конце топливного цикла.

ВЫВОДЫ

Расчеты, обсуждаемые в этой статье, направлены на сценарии конверсии FRM-II, ото-

³⁴ U.S. Department of Energy, Savannah River Site, Spent Nuclear Fuel Management Final Environmental Impact Statement, DOE/EIS-0279, March 2000, и Record of Decision for the Savannah River Site Spent Fuel Management Final Environmental Impact Statement, Federal Register, Vol. 65, No. 152, August 7, 2000.

ждествленные экспертной комиссией в 1999 году, и подтверждают в целом выводы, опубликованные ранее АНЛ. В дополнительном моделировании, представленном в этой статье, где в модель были включены основные компоненты резервуара замедлителя, и, в особенности, каналы для пучков, были получены дальнейшие данные для различных стратегий конверсий.

При учете обсуждавшихся выше аргументов за и против, самым предпочтительным выглядит вариант 2а. Он предусматривает немедленную конверсию реактора до пуска и только временно базируется на топливе, несколько превышающем предел НОУ (обогащение 24-26%). Моделирование показывает, что времена измерений увеличатся не более, чем на 15% по сравнению с текущей конструкцией с ВОУ.

Конверсия реактора в более позднее время приведет либо к модификации активированного реактора, либо к использованию топлива, обогащенного на 40-60% при сохранении текущей геометрии. Этот последний вариант соответствует стратегии, предусмотренной в настоящее время соглашением немецкого федерального и баварского правительств, которое требует конверсии на топливо, обогащенное до 50%, в декабре 2010 года. Конверсия исследовательского реактора на такое топливо не представляет удовлетворительного решения с точки зрения нераспространения, в особенности, если оно понимается как постоянное решение. Прямое сравнение между конструкциями с ВОУ и НОУ, даже при исключительно ограничивающих условиях, накладываемых далеко зашедшим уровнем постройки FRM-II в момент первого рассмотрения конверсии, демонстрирует потенциал усовершенствованного топлива с НОУ высокой плотности, которое практически воспроизводит характеристики своих аналогов с ВОУ. Следовательно, даже с технической точки зрения, аргументы в пользу использования ВОУ выглядят устаревшими.

Реактор FRM-II с современной конструкцией с ВОУ создаст отрицательный прецедент, которого можно легко избежать. Он представляет собой явное отклонение от проверенной политики нераспространения и неоправданно ставит под сомнение успешные международные усилия для запрещения использования ВОУ для гражданских целей.

БЛАГОДАРНОСТИ

Я выражаю особую благодарность моим коллегам в Дармштадтском техническом университете, в особенности, Кристофу Пистнеру и Вольфгангу Либерту, за поддержку и вклад в этот проект. Я также хочу поблагодарить сотрудников программы RERTR, которые заложили основы этой работы, предоставив базовые концепции конверсии реактора FRM-II. И, наконец, я с благодарностью отмечаю финансовую поддержку этого проекта Фондом Бергхофа для исследований по миру и конфликтам, междисциплинарную группу по науке, технике и безопасности (IANUS), и исследовательский совет по социальным наукам (SSRC).