

АЛЬТЕРНАТИВЫ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ОТРАБОТАННОГО ТОПЛИВА В ЮЖНОЙ КОРЕЕ

Дж. Канг

По мере того, как будут заполняться расположенные рядом с реакторами бассейны для хранения отработанного топлива, Южная Корея будет увеличивать внутренние объемы хранилищ отработанного топлива. В этом исследовании проводится оценка требований к хранению дополнительного отработанного топлива в период до 2030 г. и анализируется одно мероприятие, потенциально позволяющее сократить требования к новым хранилищам вдали от реакторов: перевозки отработанного топлива между площадками атомных электростанций. Такие перевозки, если они будут реализованы, могут внести существенный вклад в смягчение требований для хранения дополнительного топлива. Если перевозка между площадками не сможет быть реализована из-за опасений по поводу транспортировки отработанного топлива, или по другим причинам, то следующим наиболее эффективным по стоимости методом станет сухое хранение на месте.

Получено 23 марта 1999 г.; принято 15 октября 2002 г.

Почтовый адрес: Дж. Канг, доктор философии, ядерная техника, 101-1005, Чеонггу Апартамент, Джамвон-донг, Скочогу, Сеул, 137-030, Южная Корея. Адрес электронной почты: jmkang55@hotmail.com

ВВЕДЕНИЕ

Все отработанное ядерное топливо, выгружаемое из южнокорейских реакторов с водой под давлением (РВД) и канадских тяжеловодных урановых реакторов (КТУР) хранится в расположенных рядом с реакторами бассейнах для хранения отработанного топлива, за исключением небольшого количества отработанного топлива КТУР, которое хранится в установке для сухого хранения¹. Учитывая, что подземное хранилище для постоянного хранения отработанного топлива не будет доступно по крайней мере в течение тридцати лет², Южной Корее потребуются разработать дополнительные мощности для приема на промежуточное хранение отработанного топлива по мере заполнения хранилищ отработанного топлива, расположенных вблизи реакторов. Хотя в прошлом имелись планы строительства удаленного от реакторов централизованного хранилища для временного хранения отработанного топлива³, оно было отложено до 2016 г.⁴ из-за противостояния общественности в начале 1990-х г.г. В результате этого потребуются гораздо более крупные временные хранилища на более длительные периоды, чем это первоначально ожидалось.

С учетом этих сведений, в данном исследовании оценивались требования для дополнительных объемов хранения отработанного топлива с реакторов РВД и ПТУР в Южной Корее

¹ <<http://www.most.go.kr/index-new.html>> (Подраздел: Ядерная статистика и общее состояние) Министерство науки и техники (MOST), Южная Корея (на корейском языке).

² Ввод в строй подземного хранилища в Южной Корее не ожидается до 2030 г. *Белая книга о производстве атомной энергии*, Министерство торговли, промышленности и энергетики (МОСІЕ), Южная Корея, июль 1998 г. (на корейском языке).

³ Строительство удаленного от реакторов хранилища отработанного топлива емкостью в 3000 тонн в 1997 г. было запланировано на 221 совещании Комиссии Южной Кореи по атомной энергии в декабре 1988 г.

⁴ Удаленное от реакторов хранилище для централизованного временного хранения отработанного топлива может войти в строй в 2016 г. Тип хранения отработанного топлива, например, хранение в воде, или сухое хранение, будет определен до начала строительства в 2008 г. (249 совещание Комиссии Южной Кореи по атомной энергии в сентябре 1998 г.).

до 2030 г.⁵ После этого проводилась оценка возможности сокращения этих требований посредством перевозок отработанного топлива между площадками атомных электростанций, если такие перевозки будут реализованы.

ПРОГНОЗЫ МОЩНОСТЕЙ ОБЩЕГО ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Будущие объемы выгрузки отработанного топлива из реакторов РВД и КТУР будут зависеть от прогнозов установленных мощностей атомных электростанций, которые, в свою очередь, будут зависеть от общего производства электроэнергии и от доли атомной энергетики в этом производстве в изучаемом периоде времени. Для этого исследования прогнозы делались до 2030 г., когда должно стать доступным подземное хранилище для постоянной утилизации отработанного топлива.

Прогнозы общего производства электроэнергии до 2030 года

Недавно южнокорейское правительство оценило общее производство электроэнергии и установленные мощности атомных электростанций в период 1998 – 2015 г.г.⁶ Для того, чтобы оценить общее производство электроэнергии в 2016 – 2030 г.г., в этом исследовании для оценки производства электроэнергии на душу населения в 2016 – 2030 г.г. использовался метод подгонки логистической кривой⁷. После этого общее производство электроэнергии может быть рассчитано, умножая производство электроэнергии на душу населения на оцениваемую численность населения.

В таблице 1 показано общее производство электроэнергии, численность населения, и производство электроэнергии на душу населения в Южной Корее, которые использовались как базовые данные для оценки прогнозов производства электроэнергии на душу населения в 2016 – 2030 г.г. 1995 г. считался базовым для прогнозов производства электроэнергии на душу населения.

⁵ В данном исследовании не рассматривается отработанное топливо, которое может быть выгружено из РВД программы организации энергетического развития Корейского полуострова в Северной Корее (KEDO).

⁶ *Четвертый долгосрочный план развития энергетики (1998–2015)*, МОСІЕ, Южная Корея, август 1998 г. (на корейском языке).

⁷ При оценке прогноза производства электроэнергии и установленных мощностей ядерных электростанций в мире до 2025 г. использовалась логистическая кривая. *Nuclear Energy and Its Fuel Cycle: Prospects to 2025*, OECD/NEA, Paris, 1987. Аппроксимирующая функция логистической кривой для производства электроэнергии на душу населения определяется следующим образом:

$$E_t = \frac{E_\infty}{1 + e^{-(a_E + b_E T)}}$$

где E_t – производство электроэнергии на душу населения в году t , E_∞ – предполагаемая асимптота, которой стремится производство на душу населения, T – время в годах от базового года, a_E и b_E – параметры, определяемые следующим уравнением:

$$a_E + b_E T = \log \frac{E_t}{E_\infty - E_t}$$

Определенные параметры a_E и b_E соответственно равны $-0,2443$ и $0,1177$.

Таблица 1: Общее производство электроэнергии (А), численность населения (Б), и производство электроэнергии на душу населения (В) в Южной Корее.*

Год	А (ТВт·ч)	Б (млн.)	В (МВт·ч)
1995	184,7	45,09	4,1
2005	328,6	49,12	6,7
2015	429,7	51,68	8,3

Примечание: в 2030 г. население Южной Кореи составит приблизительно 52,74 млн. человек.

* Четвертый долгосрочный план развития энергетики (1998–2015), МОСІЕ, Южная Корея, август 1998 г. (на корейском языке). Основная статистика корейской экономики, Национальное статистическое управление (NSO), Южная Корея, сентябрь 1997 г. (на корейском языке). KOSIS-DB, NSO, Южная Корея (на корейском языке).

Определенная асимптота, т.е., E1, для годового производства электроэнергии в области 2045 г. равна 9,2 МВт·ч, примерно на 1 МВт·ч больше, чем среднее потребление электроэнергии в 8,2 МВт·ч в странах Организации экономического сотрудничества и развития в 1995 г.⁸

Общее производство электроэнергии может быть получено после этого умножением производства электроэнергии на душу населения на прогнозируемую численность населения на протяжении периода времени. Определенный прогноз общего производства электроэнергии в 2016 – 2030 г.г. показан на рис.1. На рис.1 показаны также реальные исторические данные до 1997 г. и прогноз южнокорейского правительства до 2015 г., представленные сплошной линией. Общее производство электроэнергии в 2030 г. оценивается приблизительно в 480 ТВт·ч.

Прогноз установленных мощностей атомных электростанций до 2030 г.

Прогноз развития атомной энергетики в течение трех ближайших десятилетий будет подвержен действию различных факторов, например, экономического роста, восприятия общественностью, и так далее. В этом исследовании предполагаются два сценария прогноза на 2016 – 2030 г.г. Одним из них является «референтный сценарий», основанный на предположении поддерживаемого развития атомной энергетики. Вторым является «сценарий медленного роста», основанный на предположении, что после 2016 г. не будет построено ни одной новой атомной электростанции.

Для установленных мощностей атомных электростанций до 2001 г. принимаются реальные исторические данные. Для периода 2002 – 2015 г.г. принимается прогноз южнокорейского правительства. Этот долгосрочный план поставок атомной энергии на 2002 – 2015 г.г. приведен в таблице 2.

Референтный сценарий

Для референтного сценария прогноз доли атомной энергии может быть оценена методом, аналогичным использованному для прогноза производства электроэнергии на душу населения. Важным предположением является то, что доля атомной энергии асимптотически достигает в 2045 г. 50% от полного производства электроэнергии. Это показано в табл. 3 и на рис. 2. На рис. 2 сплошная линия для 2016 – 2030 г.г. показывает прогноз установленных мощностей атомных электростанций для референтного сценария. Установленная мощность атомных электростанций в 2030 г. составит 32,0 ГВт (эл.). Специфика развертывания реакторов в 2016 – 2030 г.г. объясняется следующим образом.

⁸ *Electricity Information 1996*, International Energy Agency, OECD, 1997. Additional Spent Fuel Storage in South Korea 205

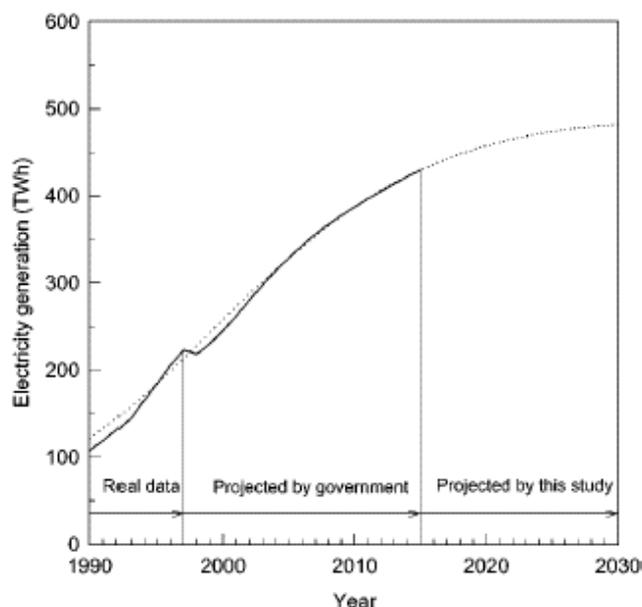


Рисунок 1: Полное производство электроэнергии (в ТВт·ч) в Южной Корее (1990 – 2030 г.г.).

Таблица 2: Долгосрочный план поставок атомной энергии на 2002 – 2015 г.г.*

Блок	Тип	Мощность (МВт-эл.)	Ввод в строй
Волсонг 3	КТУР	700	1998.7
Улчин 3	РВД	1 000	1998.8
Волсонг 4	КТУР	700	1998.9
Улчин 4	РВД	1 000	1999.12
Енгванг 5	РВД	1 000	2002.5
Енгванг 6	РВД	1 000	2002.12
Улчин 5	РВД	1 000	2004.6
Улчин 6	РВД	1 000	2005.6
Блок 1	РВД	1 000	2008.9
Блок 2	РВД	1 000	2009.9
Блок 3	РВД	1 000	2009.9
Блок 4	РВД	1 000	2010.9
УЭР 1400 ^a	Усов. ЭР	1 400	2010.9
УЭР 1400	Усов. ЭР	1 400	2011.9
УЭР 1400	Усов. ЭР	1 400	2014.6
УЭР 1400	Усов. ЭР	1 400	2015.6

^a Усовершенствованный энергетический реактор.
* The First Power Supply Plan (2002–2015), MOCIE, South Korea, August 2002 (Korean).

Это исследование предполагает, что конкретные типы реакторов, развертываемых в 2016 – 2030 г.г., будут основаны на долгосрочном плане развития атомной энергетики южнокорейского правительства. В соответствии с долгосрочным планом развития энергетики 1995 г.⁹ и всеобъемлющим планом развития атомной энергии¹⁰ основным типом реакторов останутся РВД, и после завершения четырех реакторов КТУР в 1999 г. дополнительного строительства реакторов этого типа не будет. В исследовании предполагается, что в 2016 –

⁹ *Long-term Power Development Plan (1995–2010)*, MOCIE, South Korea, December 1995 (на корейском языке).

¹⁰ *Comprehensive Nuclear Energy Promotion Plan*, MOST, South Korea, June 1997 (на корейском языке).

2030 г.г. в основном будут разворачиваться реакторы с электрической мощностью 1,0 и 1,4 ГВт, за исключением нового реактора КТУР мощностью 0,7 ГВт (эл.) для замены выводимого из строя реактора в 2017 г. После этого прогноз установленных мощностей атомных электростанций подгонялся за счет разворачивания РВД с электрической мощностью 1,0 и 1,4 ГВт и реактора КТУР с электрической мощностью 0,7 ГВт в 2016 – 2030 г.г. Предполагалось, что длительность эксплуатации всех реакторов равнялась 40 годам, хотя проектная длительность эксплуатации УЭР1400 равна 60 годам¹¹, за исключением первого реактора КТУР, которая предполагалась равной 30 годам¹².

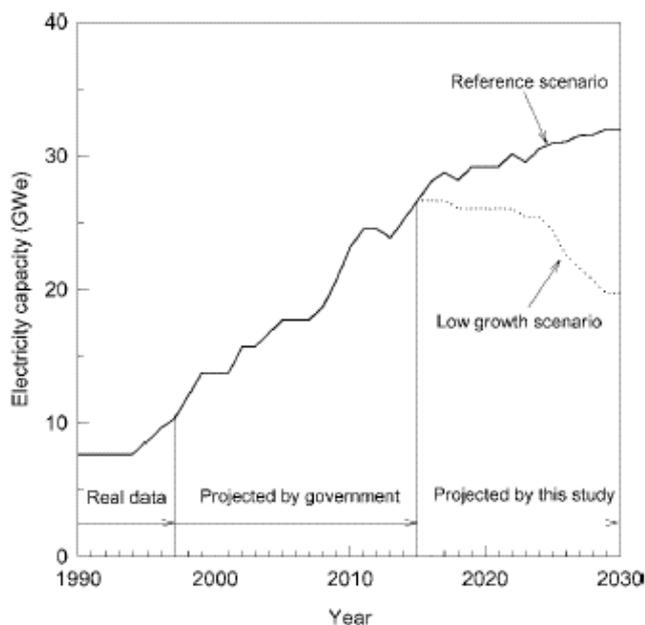


Рисунок 2: Установленная мощность реакторов в Южной Корее (1990 – 2030 г.г.). Сплошной линией показан референтный сценарий, а пунктирной линией показан сценарий низкого роста.

Сценарий низкого роста

Сценарий низкого роста предполагает, что после 2016 г. не будет разворачиваться никаких новых реакторов. Прогноз установленных мощностей атомных электростанций в 2016 – 2030 г.г. для этого сценария показан на рис. 2 пунктирной линией. В 2030 г. установленные мощности атомных электростанций составят 19,7 ГВт.

ПРОГНОЗ ПРОИЗВОДСТВА ОТРАБОТАННОГО ТОПЛИВА

Запасы отработанного топлива в Южной Корее

К концу 2001 г. из реакторов РВД и КТУР были выгружены 5 406 тонн начального тяжелого металла (тТМ) отработанного топлива, хранящиеся в расположенных вблизи реакторов установках для хранения отработанного топлива на четырех площадках атомных электростанций в Южной Корее: 2 697 тТМ отработанного топлива РВД и 2 709 тТМ отработанного топлива КТУР. В табл. 4 показаны подробности о запасах отработанного топлива в Южной Корее. В настоящее время в Южной Корее имеются четыре площадки атомных электростанций: Кори, Енгванг, и Улчин для РВД, и Волсонг для КТУР. На рис. 3 показано их расположение.

Таблица 3: Установленные мощности атомных электростанций в Южной Корее до 2030 г. (референтный сценарий).

¹¹ S. H. Chang et al., “Korea looks beyond the next generation,” *Nuclear Engineering International*, vol. 42, no. 511, 1997, pp. 12–16.

¹² *The First Power Supply Plan (2002–2015)*, MOCIE, South Korea, August 2002 (на корейском языке).

Год	А	Б	В	Г	Д	Е	Ж
1978	587				587		587
1979					587		587
1980					587		587
1981					587		587
1982					587		587
1983	650	679			1 237	679	1 916
1984					1 237	679	1 916
1985	950				2 187	679	2 866
1986	1 900				4 087	679	4 766
1987	950				5 037	679	5 716
1988	950				5 987	679	6 666
1989	950				6 937	679	7 616
1990					6 937	679	7 616
1991					6 937	679	7 616
1992					6 937	679	7 616
1993					6 937	679	7 616
1994					6 937	679	7 616
1995	1 000				7 937	679	8 616
1996	1 000				8 937	679	9 616
1997		700			8 937	1 379	10 316
1998	1 000	700			9 937	2 079	12 016
1999	1 000	700			10 937	2 779	13 716
2000					10 937	2 779	13 716
2001					10 937	2 779	13 716
2002	2 000				12 937	2 779	15 716
2003					12 937	2 779	15 716
2004	1 000				13 937	2 779	16 716
2005	1 000				14 937	2 779	17 716
2006					14 937	2 779	17 716
2007					14 937	2 779	17 716
2008	1 000				15 937	2 779	18 716
2009	2 000				17 937	2 779	20 716
2010	2 400				20 337	2 779	23 116
2011	1 400				21 737	2 779	24 516
2012					21 737	2 779	24 516
2013				679	21 737	2 100	23 837
2014	1 400				23 137	2 100	25 237
2015	1 400				24 537	2 100	26 637
2016	1 400				25 937	2 100	28 037
2017		700			26 937	2 800	28 737
2018			587		25 350	2 800	28 150
2019	1 000				26 350	2 800	29 150
2020					26 350	2 800	29 150
2021					26 350	2 800	29 150
2022	1 000				27 350	2 800	30 150
2023			650		26 700	2 800	29 500
2024	1 000				27 700	2 800	30 500
2025	1 400		950		28 150	2 800	30 950
2026	2 000		1 900		28 250	2 800	31 050
2027	1 400		950		28 700	2 800	31 500
2028	1 000		950		28 750	2 800	31 550
2029	1 400		950		29 200	2 800	32 000
2030					29 200	2 800	32 000

А – новые РВД, Б – новые КНУР, В – отключенные РВД, Г – отключенные КНУР, Д – всего РВД, Е – всего КНУР, Ж – общая мощность (в электрических МВт).

План поставок ядерного топлива в Южной Корее

Прогнозы выгрузки отработанного топлива из реакторов в основном зависят от плана поставок ядерного топлива. В соответствии с текущим планом, более 60% РВД будут загружаться топливными сборками Вэнтедж 5Н (V5H) фирмы Вестингауз в период 1997 – 2009 г.г., а после 2010 г. все РВД будут загружаться корейскими топливными сборками нового поколения (KNG)¹³. Топливные сборки V5H имеют ту же самую структуру решетки топливных стержней и содержат примерно такое же количество урана (461,5 кг на сборку)¹⁴, как типичная топливная сборка РВД, описанная в табл. 5. Ожидается, что среднее выгорание отработанного топлива V5H будет равно 43 – 48 тысяч МВт-сутки на тонну тТМ, а у отработанного топлива KNG оно составит 55 тысяч МВт-сутки на тонну тТМ¹⁵. Для реакторов КТУР планируется, что примерно с 2005 г. будет производиться загрузка гибкого топлива КТУР (CANFLEX)¹⁶. Это топливо, в котором будет использоваться уран, обогащенный до 1,2 весовых процента, обладает значительно большим потенциалом выгорания по сравнению с обычным топливом КТУР, приблизительно равным 21 600 МВт-сутки на тонну тТМ¹⁷. Количество урана, содержащегося в топливе CANFLEX (18,6 кг на сборку)¹⁸, примерно такое же, как в типичной сборке топлива КТУР.



Рисунок 3: Площадки атомных электростанций в Южной Корее.

¹³ C. S. Rim, "Korean Nuclear Fuel Program," *Journal of Nuclear Science and Technology*, vol. 35, no. 7, July 1998, pp. 467–472.

¹⁴ Частное сообщение, Korea Nuclear Fuel Company, Ltd. (KNFC), South Korea, дек. 1998 г.

¹⁵ Там же.

¹⁶ C. S. Rim, "Korean Nuclear Fuel Program," *Journal of Nuclear Science and Technology*, vol. 35, no. 7, July 1998, pp. 467–472.

¹⁷ K. M. Wasywich, *Characteristics of Used CANDU Fuel Relevant to the Canadian Nuclear Fuel Waste Management Program*, AECL-10463, COG-91-340, May 1993.

¹⁸ Частное сообщение, Korea Nuclear Fuel Company, Ltd. (KNFC), South Korea, дек. 1998 г.

Таблица 4: Запасы отработанного топлива в Южной Корее на конец 2001 г. (в тТМ; РВД в первых трех столбцах и КТУР в четвертом).

Кори	Енганг	Улчин	Волсонг
1 246	819	632	2 709

Годовой отчет за 2001 год по обращению с излучением на корейских атомных электростанциях, Корейская корпорация по электроэнергии (КЕРСО), Южная Корея, 2002 (на корейском языке).

Выгрузка отработанного топлива в референтном сценарии

Технические достижения в обеспечении целостности топлива и улучшенные методы обращения с топливом вероятно приведут к увеличению степени выгорания по сравнению с текущими значениями. На основании плана поставки ядерного топлива в настоящем исследовании предполагается два варианта степени выгорания для прогноза выгрузки отработанного топлива до 2030 г. Одним из них является «вариант современной степени выгорания», основанный на современных уровнях выгорания вплоть до 2030 г. Второй «вариант увеличенной степени выгорания» предполагает увеличение уровней выгорания при разгрузке, с 2010 г. для РВД, и с 2005 г. для КТУР, соответственно.

Таблица 5: Характеристики типичных топливных сборок РВД и КТУР.

Характеристика	РВД	КТУР
Решетка топливных стержней	17 x 17	—
Число топливных стержней в сборке	264	37
Общий вес сборки, кг	657,9	23,6
Масса урана в сборке, кг	461,4	18,8
Масса UO ₂ в сборке, кг	523,4	21,3

J. W. Roddy et al., Physical and Decay Characteristics of Commercial LWR Spent Fuel, ORNL/TM-9591/V1, October 1985. K. M. Wasywich, Characteristics of Used CANDU Fuel Relevant to the Canadian Nuclear Fuel Waste Management Program, AECL-10463, COG-91-340, May 1993.

Вариант современного сценария с текущей степенью выгорания

На основании прогноза установленных ядерных мощностей в таблице 3, выгрузка отработанного топлива из РВД и КТУР до 2030 г. может быть оценена для текущей степени выгорания. Исторические запасы отработанного топлива, приведенные в табл. 4, комбинируются с этими прогнозами для получения оценки накапливающихся запасов отработанного топлива. В оценках предполагается, что топливный цикл является одноразовым, без переработки топлива.

Средние уровни выгорания при выгрузке для отработанного топлива коммерческих реакторов в 1996 году составляли примерно 43 000 и 7 100 МВт-сутки на тонну тТМ для РВД и КТУР, соответственно¹⁹. Вариант с текущим выгоранием предполагает такие же значения выгорания в период 1997 – 2030 г.г. Оценки ежегодной выгрузки отработанного топлива приведены в сноске²⁰. В настоящее время средняя тепловая эффективность южнокорейского

¹⁹ Y. E. Lee, M. J. Song, "Expansion of Spent Fuel Interim Storage Capability in Association with Back-End Fuel Cycle Policy in Korea," *Proceedings of the Symposium on Waste Management 97*, Tucson, U.S.A., 1997.

²⁰ Ежегодная разгрузка отработанного ядерного топлива определяется следующим образом:

$$SF_t = \frac{NC_t \times 365 \times CF_t}{TE_t \times BU_t}$$

где SF_t – годовое количество отработанного ядерного топлива, выгруженного в год t, NC_t – общая мощность атомных электростанций в год t, CF_t – коэффициент мощности в год t, эффективность преобразования тепловой энергии в электрическую в год t, и TE_t – средняя степень выгорания выгруженного топлива в год t. *International Symposium on Nuclear Fuel Cycle*

коммерческого ядерного топлива для реакторов РВД и КТУР соответственно равна 34,9% и 33,7%²¹. Предполагалось, что в 1997 – 2030 г.г. коэффициенты факторы загрузки реакторов РВД и КТУР будут постоянны и равны 80%.

На рис. 4 показаны прогнозы ежегодной выгрузки отработанного топлива для референтного сценария с текущим выгоранием. На рис. 5 и в табл. 6 показаны прогнозы накапливающихся запасов отработанного топлива. Эти результаты включают отработанное топливо, выгруженное из выключенных реакторов. Приблизительно 43% накопившегося к 2030 г. отработанного топлива будет выгружено из реакторов КТУР, несмотря на то, что доля электрической мощности этих реакторов от общей мощности атомных электростанций будет составлять в 2030 г. всего лишь 8%²².

Сценарий с увеличенным выгоранием

На основании плана поставок ядерного топлива в Южной Корее, в варианте увеличенного выгорания предполагается, что средняя степень выгорания отработанного топлива РВД увеличится до 55 000 МВт·сутки на тонну тТМ после 2010 г., а для отработанного топлива КТУР – до 21 600 МВт·сутки на тонну тТМ после 2005 г. На рис. 6 показан прогноз выгрузки отработанного топлива в референтном сценарии с увеличенным выгоранием. На рис. 7 и в табл. 7 показаны соответствующие прогнозы накопленных запасов выгруженного отработанного топлива. Вариант с увеличенным выгоранием показывает сокращение накопленного к 2030 г. топлива РВД примерно на 15% по сравнению с вариантом текущего выгорания, и для реакторов КТУР – сокращение примерно на 47%.

Выгрузка отработанного топлива для сценария с низким ростом

В сценарии с низким ростом предполагается, что после 2016 г. не будет разворачиваться новых реакторов, за исключением нового реактора КТУР для замены выведенного их эксплуатации в 2017 г. В табл. 8 показан прогноз накопленного отработанного топлива для сценария низкого роста с текущим и увеличенным выгоранием. Сценарий низкого роста показывает уменьшение накопленного отработанного топлива РВД до 2030 г. на примерно 10% и 9% для вариантов текущего и увеличенного выгорания, соответственно, по сравнению с соответствующими вариантами референтного сценария.

ПРОГНОЗ ЕМКОСТИ ХРАНИЛИЩ ОТРАБОТАННОГО ТОПЛИВА

Состояние емкости хранилищ отработанного топлива вблизи реакторов

Все отработанное топливо, выгруженное из реакторов РВД и КТУР, хранится в расположенных вблизи реакторов бассейнах для хранения отработанного топлива, или, для некоторых реакторов КТУР, в хранилищах для сухого хранения на площадке реактора. В табл. 9 показано состояние емкости хранилищ отработанного топлива вблизи реакторов на четырех площадках атомных электростанций в Южной Корее. Предполагается, что емкость бассейна для каждого планируемого РВД составляет 461 тТМ²³, такая же емкость предполагается

and Reactor Strategy Adjusting to New Reality, Key Issue Papers, International Atomic Energy Agency IAEA, Vienna, 1997.

²¹ *White Book of Nuclear Safety*, Korea Institute of Nuclear Safety (KINS), South Korea, August 1998 (на корейском языке).

²² Теплота распада на единицу массы отработанного топлива КТУР с выгоранием 7 100 МВтд/тТМ (охлажденного в течение нескольких лет) равно примерно одной десятой от отработанного топлива РВД с выгоранием is approximately one-tenth that of spent PWR fuel of 43 000 МВтд/тТМ (смотри табл. 17 в Приложении). В табл. 6, the 12 350 тТМ отработанного топлива КТУР эквивалентно примерно 1 235 тТМ топлива РВД по генерацию теплоты распада, примерно 7% от тепла, выделяющегося при общей выгрузке отработанного топлива РВД до 2030 года.

²³ Однако, эта емкость хранилища может увеличиться при хранении отработанного топлива с максимальной плотностью. Максимальная плотность хранения определяется максимальным отношением площади ячеек хранения к площади бассейна, и примерно равна 92% в бассей-

для бассейнов Енганг 5 и 6 (стандартные корейские ядерные энергетические установки), и для нового планируемого реактора КТУР емкость равна 579 тТМ.

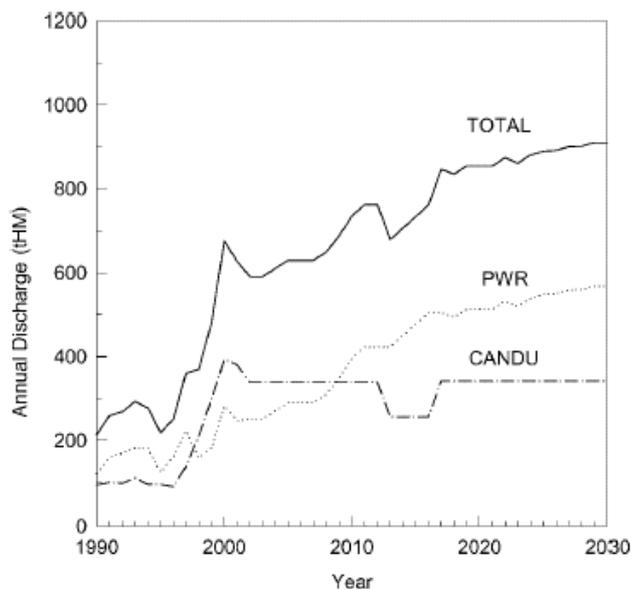


Рисунок 4: Годовая выгрузка отработанного топлива в Южной Корее (1990 – 2030 г.г.) (референтный сценарий с текущим выгоранием). Пунктирная линия соответствует выгрузке из ВРД, штрих-пунктирная линия – выгрузке из КТУР, а сплошная линия – суммарному количеству.

Таблица 6: Накопленные запасы отработанного топлива в Южной Корее (1990 – 2030 г.г.) (референтный сценарий с текущим выгоранием).

Тип	К 2010 г.	К 2020 г.	К 2030 г.
ВРД	5 400	10 120	15 580
КТУР	5 760	8 830	12 250
<i>Всего</i>	<i>11 160</i>	<i>18 950</i>	<i>27 830</i>

нах ВРД. J. Y. Jung, "Status of Onsite Spent Fuel Storage," *Nuclear Industry*, Korea Atomic Industrial Forum, November 1998, pp. 56–75 (Korean). Для хранения одной сборки отработанного топлива ВРД требуется 497,8 см² бассейна, поскольку поперечное сечение топливной сборки ВРД равно 21,4x21,4 см². J. W. Roddy et al., *Physical and Decay Characteristics of Commercial LWR Spent Fuel*, ORNL/TM-9591/V1, October 1985. Максимальное количество топливныхборок ВРД на 1 м² бассейна равно 20, что соответствует 9,2 тТМ отработанного топлива на квадратный метр, считая массу в 0,4614 тТМ на топливную сборку ВРД (смотри табл. 6). Длина и ширина бассейнов в Енганге 5 и 6 равны 902 см и 743 см, а глубина равна 1204 см. Частное сообщение, Korea Power Engineering Co., Inc (КОРЕС), март 1999 г. Поэтому каждый бассейн в Енганге 5 и 6 может принять примерно 545 тТМ отработанного топлива ВРД, с запасным хранилищем для одной активной зоны в 76,3 тТМ для аварийных случаев. Поскольку бассейн для хранения отработанного топлива находится вне защитного корпуса реактора, размеры бассейнов будущих реакторов не будут ограничиваться любыми другими ограничениями, помимо экономики хранения отработанного топлива.

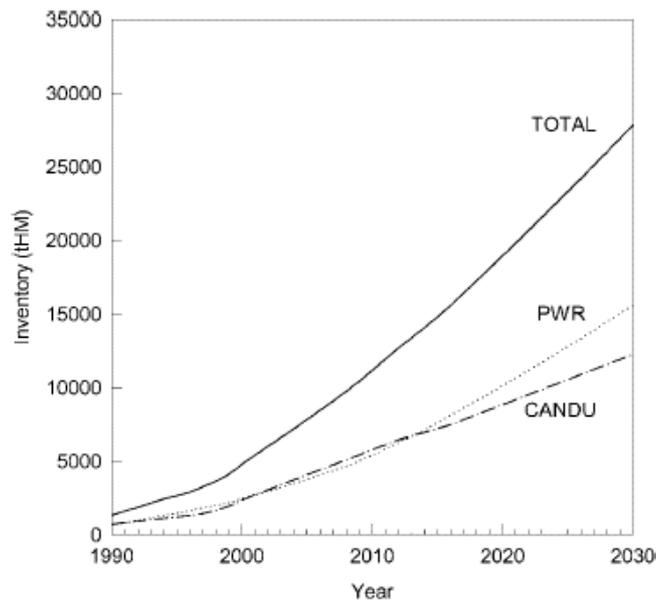


Рисунок 5: Накопленные запасы выгруженного отработанного топлива в Южной Корее (1990 – 2030 г.г.) (референтный сценарий с текущим выгоранием). Пунктирная линия соответствует запасам для ВРД, штрих-пунктирная линия – запасам для КТУР, а сплошная линия – суммарному количеству.

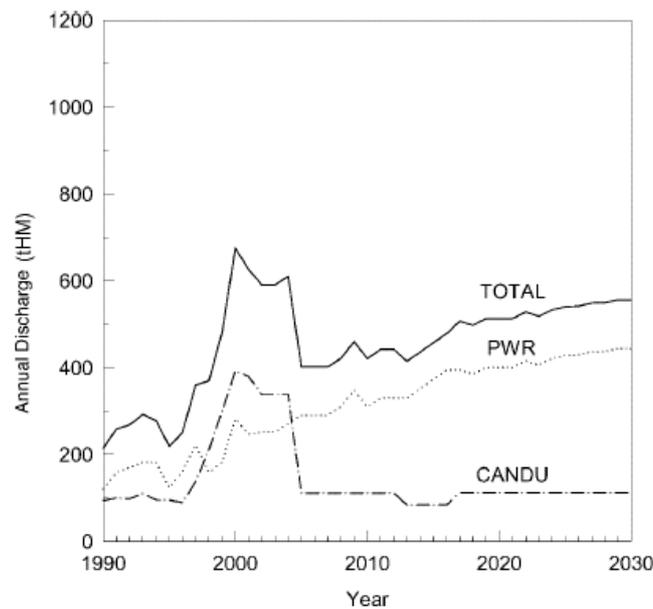


Рисунок 6: Годовая выгрузка отработанного топлива в Южной Корее (1990 – 2030 г.г.) (референтный сценарий с увеличенным выгоранием). Пунктирная линия соответствует выгрузке из ВРД, штрих-пунктирная линия – выгрузке из КТУР, а сплошная линия – суммарному количеству.

Таблица 7: Накопленные запасы отработанного топлива в Южной Корее (1990 – 2030 г.г.) (референтный сценарий с увеличенным выгоранием).

Тип	К 2010 г.	К 2020 г.	К 2030 г.
ВРД	5 310	9 010	13 270
КТУР	4 400	5 400	6 530
<i>Всего</i>	<i>9 710</i>	<i>14 410</i>	<i>19 800</i>

Таблица 8: Накопленные запасы отработанного топлива в Южной Корее (1990 – 2030 г.г.) (сценарий низкого роста).

Тип	К 2010 г.	К 2020 г.	К 2030 г.
Вариант текущего выгорания			
РВД	5 400	9 950	14 040
КТУР	5 760	8 490	11 050
<i>Всего</i>	<i>11 160</i>	<i>18 440</i>	<i>25 100</i>
Вариант увеличенного выгорания			
РВД	5 310	8 890	12 070
КТУР	4 400	5 290	6 130
<i>Всего</i>	<i>9 710</i>	<i>14 180</i>	<i>18 200</i>

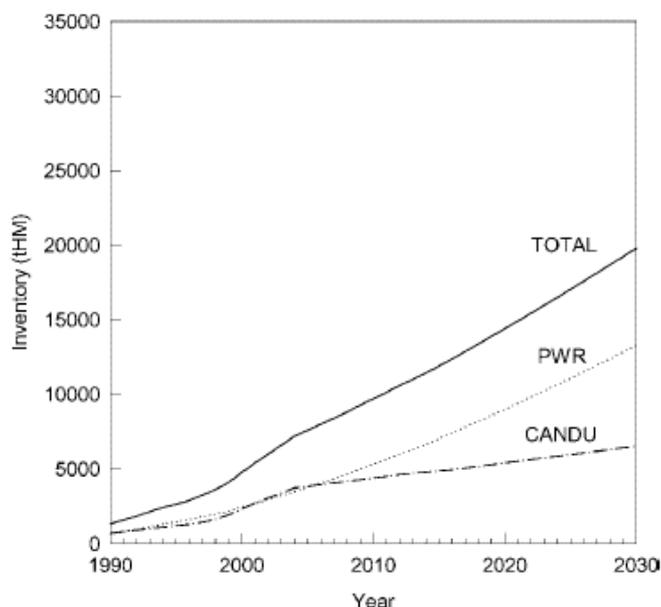


Рисунок 7: Накопленные запасы выгруженного отработанного топлива в Южной Корее (1990 – 2030 г.г.) (референтный сценарий с увеличенным выгоранием). Пунктирная линия соответствует запасам для ВРД, штрих-пунктирная линия – запасам для КТУР, а сплошная линия – суммарному количеству.

Дополнительная емкость хранилищ отработанного топлива для референтного сценария

Требования к дополнительным хранилищам отработанного топлива оценивались после этого для двух случаев: (1) перевозки между площадками запрещаются; (2) перевозки между площадками разрешаются. В обоих случаях предполагается, что отработанное топливо не перерабатывается и не отправляется за пределы страны в указанный период времени.

Референтный сценарий без перевозок между площадками

В случае без перевозки между площадками предполагается, что передача отработанного топлива с площадки на площадку не разрешается, но перевозка топлива между блоками на одной и той же площадке разрешена. Реактор, бассейн которого заполнен, может разгружать свои топливные сборки в бассейн другого реактора, емкость которого больше. Для отработанного топлива, выгружаемого из выведенных из эксплуатации реакторов, предполагается, что для перемещения всего отработанного топлива из бассейнов в другие бассейны

для хранения на той же площадке после закрытия блока потребуется пять лет²⁴.

Таблица 9: Состояние емкости хранилищ отработанного топлива вблизи реакторов в Южной Корее (А – установленная мощность в МВт (эл.); Б – состояние; В – управляемая емкость бассейна в тТМ)^а.

Блок	Тип	А	Б	В
Кори-1	ВРД	587	Действ.	151
Кори-2	ВРД	650	Действ.	328
Кори-3	ВРД	950	Действ.	1 189 ^б
Кори-4	ВРД	950	Действ.	652 ^б
Энгванг-1	ВРД	950	Действ.	652 ^б
Энгванг-2	ВРД	950	Действ.	652 ^б
Энгванг-3	ВРД	1 000	Действ.	383 ^в
Энгванг-4	ВРД	1 000	Действ.	383 ^в
Энгванг-5	ВРД	1 000	Строящ.	461 ^в
Энгванг-6	ВРД	1 000	Строящ.	461 ^в
Улчин-1	ВРД	950	Действ.	744 ^б
Улчин-2	ВРД	950	Действ.	448 ^б
Улчин-3	ВРД	1 000	Действ.	383 ^в
Улчин-4	ВРД	1 000	Строящ.	383 ^в
Улчин-5	ВРД	1 000	Планир.	461 ^в
Улчин-6	ВРД	1 000	Планир.	461 ^в
Волсонг-1	КТУР	679	Действ.	643
Волсонг-2	КТУР	700	Действ.	579
Волсонг-3	КТУР	700	Действ.	579
Волсонг-4	КТУР	700	Строящ.	579+1436 ^г

^а Эти величины предполагают, что одна полная зона хранилища резервируется для экстренных случаев.

^б Включая увеличенную емкость бассейна за счет переустройства стеллажей.

^в Включая планируемое увеличение емкости бассейна за счет переустройства стеллажей.

^г Действующее сухое хранилище отработанного ядерного топлива емкостью 1 436 тТМ на площадке Волсонга.

* Частное сообщение, KNFC, Южная Корея, декабрь 1998 г.; частное сообщение, технический центр ядерного контроля (TCNC), декабрь 1998 г.; годовой отчет, форум корейской атомной индустрии (KAIF), Южная Корея, 1998 г. (на корейском языке); частное сообщение, технический центр ядерного контроля (TCNC), август 2002 г.

В табл. 10 показаны годы, в которые ожидается переполнение хранилищ для отработанного топлива на площадках в Кори, Энгванге, Улчине, и Волсонге для референтного сценария без перевозок между площадками для обоих вариантов выгорания. В случае увеличенного выгорания времена насыщения емкости бассейнов продлеваются только на несколько лет из-за позднего начала повышенного выгорания для реакторов ВРД и КТУР по сравнению

²⁴ Когда реактор выключается, имеется два варианта для отработанного топлива, поддерживать бассейны в рабочем состоянии, или перевезти все отработанные топлива в другие хранилища. Однако, после выключения реакторов на площадках поддержание бассейнов после выключения приводит к значительным расходам. Эксплуатация одного бассейна после выключения, по оценкам, будет стоить примерно \$3,7 миллиона (в ценах 1989 г.), при вместимости бассейна в 595 тТМ. S. R. Rod, *Cost Estimates of Operating Onsite Spent Fuel Pools after Final Reactor Shutdown*, PNL-7778, August 1991. Для сухого хранения отработанное топливо ВРД должно сначала охлаждаться в бассейне по крайней мере в течение 5 лет после извлечения из реактора. *Disposal and Storage of Spent Nuclear Fuel Finding the Right Balance. A Report to Congress and the Secretary of Energy*, U.S. Department of Commerce, March 1996.

с вариантом текущего выгорания.

В табл. 11 показаны кумулятивные дополнительные емкости хранения, необходимые в референтном сценарии без перевозок между площадками для обеих вариантов выгорания. Случай увеличенного выгорания показывает сокращение требований к дополнительной емкости хранения отработанного топлива к 2030 г. примерно на 29% и 67% для реакторов РВД и КТУР, соответственно, по сравнению с вариантом текущего выгорания.

Таблица 10: Годы, в которые ожидается переполнение хранилищ для отработанного топлива на площадках атомных электростанций (референтный сценарий без перевозок между площадками).

Площадка	Текущее выгорание	Увеличенное выгорание
Кори	2019	2021
Енгванг	2019	2022
Улчин	2021	2024
Волсонг	2004	2004
СВ	–	–

Таблица 11: Требования к дополнительной емкости хранилищ для накопленных запасов отработанного топлива в Южной Корее (1990 – 2030 г.г.) (референтный сценарий без перевозок между площадками).

Тип	К 2010 г.	К 2020 г.	К 2030 г.
Вариант текущего выгорания			
РВД	0	50	4 100
КТУР	1 950	5 180	8 590
<i>Всего</i>	<i>1 950</i>	<i>5 230</i>	<i>12 690</i>
Вариант увеличенного выгорания			
РВД	0	0	2 930
КТУР	580	1 750	2 870
<i>Всего</i>	<i>580</i>	<i>1 750</i>	<i>5 800</i>

Референтный сценарий с разрешенными перевозками между площадками

В варианте с перевозками между площадками предполагается, что разрешается перемещение отработанного топлива между площадками атомных электростанций с одним типом реакторов. В табл. 12 показаны кумулятивные дополнительные емкости хранения, необходимые в референтном сценарии с перевозками между площадками для обеих вариантов выгорания. Если перевозки между площадками разрешаются, то даже в варианте текущего выгорания дополнительных емкостей хранилищ для отработанного топлива РВД не понадобится даже в 2029 г.

Емкость дополнительных хранилищ отработанного топлива для сценария с низким ростом

Для сценария с низким ростом без транспортировки между площадками времена заполнения бассейнов на площадках атомных электростанций и требуемые кумулятивные емкости дополнительного хранения не изменятся по сравнению с референтным сценарием, приведенным в табл. 10 и 11. С перевозкой между площадками времена заполнения бассейнов сокращаются и кумулятивные емкости дополнительных хранилищ увеличиваются по сравнению с референтным сценарием, поскольку после 2016 г. емкость бассейнов РВД перестает увеличиваться. Однако, даже в этом случае, дополнительной емкости хранилищ отработанного топлива РВД не потребуется до 2023 г. для текущего выгорания и до 2027 г. для увеличенного выгорания, соответственно.

Таблица 12: Требования к дополнительной емкости хранилищ для накопленных запасов отработанного топлива в Южной Корее (1990 – 2030 г.г.) (референтный сценарий с перевозками между площадками).

Тип	К 2010 г.	К 2020 г.	К 2030 г.
Вариант текущего выгорания			
РВД	0	0	1 060
КТУР	1 950	5 180	8 590
<i>Всего</i>	<i>1 950</i>	<i>5 180</i>	<i>9 650</i>
Вариант увеличенного выгорания			
РВД	0	0	0
КТУР	580	1 750	2 870
<i>Всего</i>	<i>580</i>	<i>1 750</i>	<i>2 870</i>
Примечание: для варианта текущего выгорания емкости хранения отработанного топлива на площадках РВД будут заполнены в 2030 г., а для варианта с увеличенным выгоранием нехватки не будет.			

Таблица 13: Требования к дополнительной емкости хранилищ для накопленных запасов отработанного топлива в Южной Корее (1990 – 2030 г.г.) (сценарий низкого роста с перевозками между площадками).

Тип	К 2010 г.	К 2020 г.	К 2030 г.
Вариант текущего выгорания			
РВД	0	0	4 140
КТУР	1 950	5 510	8 070
<i>Всего</i>	<i>1 950</i>	<i>5 510</i>	<i>12 210</i>
Вариант увеличенного выгорания			
РВД	0	0	2 170
КТУР	580	2 310	3 150
<i>Всего</i>	<i>580</i>	<i>2 310</i>	<i>5 320</i>
Примечание: для варианта текущего выгорания емкости хранения отработанного топлива на площадках РВД будут заполнены в 2023 г., а для варианта с увеличенным выгоранием в 2027 г.			

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ СООБРАЖЕНИЯ

Варианты хранения отработанного топлива

До 2015 г., когда бассейны заполнятся, дополнительное отработанное топливо должно храниться на площадке в хранилищах для сухого хранения. После этого имеются шесть альтернативных вариантов.

Вариант 1: Сухое хранение на площадках атомных электростанций

В варианте 1 используется сухое хранение на площадке²⁵ для обеспечения дополнительной емкости хранения для отработанного топлива из реакторов РВД и КТУР.

²⁵ Сухое хранение считается безопаснее, чем хранение в бассейне. U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Waste Confidence Decision Review. 55," Federal Register 38508, September 18, 1990.

Вариант 2: Перевозки между площадками, начинающиеся в 2016 г.²⁶

В варианте 2 разрешается перевозка между площадками отработанного топлива, выгружаемого из РВД реакторов с продолжением сухого хранения на площадке топлива, выгружаемого из реакторов КТУР.

Вариант 3: хранилище временного хранения за пределами площадок реакторов, начинающее работать с 2016 г.

В варианте 3 отработанное топливо, выгруженное из реакторов РВД и КТУР, перевозится в хранилище временного хранения за пределами площадок реакторов, начинающее работать с 2016 г.

Вариант 4: хранение за границей, начиная с 2016 г.

В варианте 4 выгруженное из РВД отработанное топливо, начиная с 2016 г., направляется за границу по крайней мере до 2030 г.²⁷, в то время как топливо из реакторов КТУР продолжает храниться сухим способом на площадках.

Вариант 5: переработка за границей после 2016 г.²⁸

В варианте 5 все выгруженное из РВД отработанное топливо, начиная с 2016 г., направляется за границу для хранения в течение 10 лет, после чего топливо будет переработано и весь выделенный плутоний будет включен в топливо со смесью окислов (МОХ). МОХ-топливо будет после этого возвращено в Южную Корею и использовано в РВД. Все топливо из реакторов КТУР будет продолжать храниться сухим способом на площадках.

Вариант 6: непосредственное использование отработанного топлива РВД в реакторах КТУР (топливный цикл DUPIC²⁹) после 2016 г.

²⁶ Согласно докладу на 249-м совещании корейской КАЭ в сентябре 1998 года, все отработанное выгружаемое топливо будет храниться на площадках своих АЭС до ввода в строй централизованного промежуточного хранилища. Это вариант 3 нашего исследования.

²⁷ British Nuclear Fuels Ltd. (BNFL) предложила, чтобы отработанное топливо из-за рубежа хранилось на заводе Thermal Oxide Reprocessing Plant (THORP) в Селлафилде в северной Англии по крайней мере в течение 10 лет, с переработкой как вариантом после окончания периода хранения. BNFL Inc. "Issues for BNFL's Congressional Staff Tour," August 1995. Имеются также предложения хранения за рубежом в России и в Австралии. В соответствии с одним предложением отработанное топливо из Южной Кореи может быть послано в Россию для хранения по цене в 700 \$/кгТМ, с возможным окончательным захоронением за дополнительную цену в 1 000 \$/кгТМ. Переработка отработанного топлива может быть вариантом по выбору потребителя *Nuclear Fuel*, February 22, 1999 and March 18, 1999.

²⁸ Совместная декларация о безъядерной зоне на Корейском полуострове 1991 года обязывает Корею не иметь установок для переработки отработанного топлива или обогащения. Y. M. Choi, "Meaning and Organization of International Nuclear Non-Proliferation Regime," *Nuclear Industry*, KAIF, February 1998, pp. 50–56.

²⁹ Основная идея топливного цикла DUPIC заключается в повторном изготовлении отработанного топлива РВД, которое все еще содержит вдвое больше делящегося материала, чем природный уран, в топливо для реакторов на тяжелой воде, без выделения плутония. J. Kang, A. Suzuki, "Analysis on DUPIC Fuel Cycle in Aspect of Overall Radioactive Waste Management," *Journal of Nuclear Fuel Cycle & Environment*, vol. 4, no. 1, 1997, pp. 19–27. Дополнительное выгорание в топливе DUPIC происходит из-за увеличения реактивности, связанного с удалением некоторых продуктов деления, включая весь цезий, в процессе изготовления топлива DUPIC, и дополнительного увеличения реактивности из-за большей нейтронной эффективности тяжелой воды. C. A. Bollmann et al., *Environmental and Economic Performance of Direct Use of PWR Spent Fuel in CANDU Reactors*, MIT-NFC-TR-014, Massachusetts Institute of Technology, June 1998. Отработанное топливо РВД охлаждается в течение 10 лет при выгорании 43 000 МВтд/тТМ производит свежее топливо DUPIC которое после отработки будет иметь выгорание 16 300 МВтд/тТМ, в то время как отработанное топливо РВД с выгоранием 55 000 МВтд/тТМ дает отработанное топливо DUPIC с выгоранием 12 500 МВтд/тТМ. При выгорании 12 500 МВтд/тТМ, будет ежегодно выгружаться примерно

В варианте 6 предлагается после 2016 г. использовать топливный цикл DUPIC для отработанного топлива из реакторов РВД. Отработанное топливо РВД, излишнее для потребностей загрузки топлива DUPIC в реакторы КТУР, не будет перерабатываться в топливо DUPIC и будет храниться на площадке в сухих хранилищах.

Анализ расходов

Для каждого из вариантов мы рассматривали только те расходы, которые относятся к управлению отработанным топливом, выгруженным после того, как бассейны были заполнены. Поэтому общие расходы, показанные в табл. 15, не включают расходов на управление бассейнами, включая расходы на их переоборудование. Мы не рассматриваем также расходы на процессы утилизации или переработки отработанного топлива после 2030 г. Оценки расходов для всех вариантов приводятся в терминах долларов США 2001 года без учета инфляции и для этой цели использовалась чистая приведенная стоимость (NPV)³⁰ с учетной ставкой в 5 и 10%. Все расчеты основаны на прогнозе выгрузки отработанного топлива и дополнительной емкости хранилищ отработанного топлива для референтного сценария, использованного в данном исследовании. Предположения о штучной цене для стадий компонентов, использованные в данном исследовании, подытожены в табл. 14.

В табл. 15 и 16 показано сравнение дополнительных кумулятивных расходов для шести вариантов, описанную в терминах приведенных и неприведенных расходов. Общие приведенные расходы рассчитывались посредством распределения постоянных долларовых потоков, согласующегося с временным графиком, и пересчета этих денежных потоков с учетными ставками 5 и 10%. Все расходы приведены в долларах США 2001 года.

Как показано в табл. 15 и 16, вариант 2 является наименее дорогим. Для учетной ставки в 5% дополнительные сводные расходы к 2030 г. для варианта 2 приблизительно на 23% и на 41% меньше, чем для вариантов 1 и 3, соответственно, для текущего выгорания, и соответственно на 39% и на 55% меньше в случае увеличенного выгорания. Это сокращение в основном связано с тем фактом, что вариант 2 позволяет максимально использовать существующее хранение отработанного топлива. Другие варианты еще дороже, и их стоимость превосходит стоимость варианта 2 от 5 до 11 раз для случая текущего выгорания, и от 9 до 27 раз в случае увеличенного выгорания для учетной ставки в 5%.

55 тТМ отработанного топлива DUPIC, что будет примерно на 30% больше, по сравнению с приблизительно 42 тТМ в год для выгорания 16 300 МВтд/тТМ. H. Choi et al., "Parametric Analysis of the DUPIC Fuel Cycle," *Proceedings of the 1994 Nuclear Simulation Symposium*, October 12–14, 1994, Pembroke, Ontario, pp. 71–80. Более высокое выгорание отработанного топлива РВД менее привлекательно для топливного цикла DUPIC.

³⁰ (Ежегодные денежные расходы с учетной ставкой) = (сумме без учетной ставки value)/(1+(учетная ставка))ⁿ, where n = (году расхода) – 2001. Величина NPV является соответствующим индексом расходов для сравнения конкурирующих вариантов, потому что она отражает временную стоимость денег.

Таблица 14: Предполагаемые штучные цены (в долларах США 2001 г.; А – топливо РВД UO₂; Б – топливо КТУР UO₂; В – топливо МОХ; Г – топливо DUPIC).

Компонент	А	Б	В	Г
Покупка урана (\$/кгU)	33,0 ^а	31,7 ^а	–	–
Конверсия (\$/кгU)	8,8 ^б	8,2 ^б	–	–
Обогащение (\$/SWU)	129,7 ^а	–	–	–
Изготовление (\$/кгТМ)	219,8 ^б	38,5 ^а	1648,4 ^б	613-3000 ^а
Перевозка (\$/кгТМ)	61,0 ^в	15,9 ^{б/г}	57,9 ^б	57,9 ^в
Хранение (\$/кгТМ)	142,1 ^г	38,5 ^а	142-187 ^г	135,7 ^г
Переработка (\$/кгТМ)	1098,9 ^б	–	–	–

Перевозка отработанного топлива РВД UO₂ за границу (\$/кгТМ) = 131,0^д

Перевозка свежего МОХ топлива за границу (\$/кгТМ) = 261,9^д

Перевозка остеклованных высокоактивных отходов за границу = 131,0^д

Хранение остеклованных высокоактивных отходов (\$/кгТМ в исходном отработанном топливе) = 35,5 – 106,6^г

Примечание: все значения в табл. 14 представляют собой модифицированные значения, отражающие дефляцию ВВП США¹.

^а Значения цен 1996 г. закупки урана, обогащения, изготовления топлива КТУР UO₂, изготовления топлива DUPIC и хранения отработанного топлива КТУР равны 30\$/кгU, 118\$/SWU, 35\$/кгU, 558\$/кгТМ and 35\$/кгТМ, соответственно². Из-за неопределенности стоимости изготовления топлива DUPIC за максимальное значение цены принято 3000\$/кгТМ³.

^б Значения цен 1996 г. на конверсию урана, изготовлении топлива РВД UO₂, изготовление топлива МОХ и переработку были равны соответственно 8\$/кгU, 200\$/кгU, 1,500\$/кгТМ and 1,000\$/кгТМ⁴.

^в Значения цен 1991 г. на перевозку отработанного топлива РВД и КТУР соответственно равны 50\$/кгТМ и 13\$/кгТМ⁵. Цена перевозки отработанного топлива МОХ и DUPIC предполагалась равной отработанному топливу РВД⁶.

^г Цена хранения отработанного топлива РВД в 1989 г. равнялась 108\$/кгТМ⁷. Считалось, что цена хранения отработанного топлива МОХ в 1 – 1,3 раза выше из-за большего тепловыделения⁸. Цена хранения отработанного топлива DUPIC предполагалась равной цене для отработанного топлива РВД⁹. Цена хранения остеклованных высокоактивных отходов предполагалась равной 0,25-0,75 от цены хранения отработанного топлива РВД UO₂¹⁰.

^д Значения цен перевозки за границу отработанного топлива РВД UO₂ 1992 г., остеклованных высокоактивных отходов, связанных с этим количеством исходного отработанного топлива, и свежего топлива МОХ соответственно составляли 110\$/кгТМ, 110\$/кгТМ and 220\$/кгТМ¹¹.

1. <<http://www.bea.doc.gov/>>, U.S. Department of Commerce, Bureau of Economic Analysis.

2. Economic Assessment of New Technology of Nuclear Fuel Cycle, KAERI/RR-1831/97, KAERI, South Korea, June 1998 (Korean).

3. Private communication, Professor Frank von Hippel, Center for Energy and Environmental Studies, Princeton University, March 1999.

4. K. A. Williams et al, A Comparative Assessment of the Economics of Plutonium Disposition Including Comparison with Other Nuclear Fuel Cycles, U.S. Department of Energy, CONF-970613-1, May 1997.

5. The Economics of the Nuclear Fuel Cycle, OECD/NEA, Paris, 1994.

6. According to the reference at footnote 7, the same transport cost was used for PWR UO₂ spent fuel and DUPIC spent fuel.

7. Estimated cost ranges of AR storage costs using metal casks would appear to be \$40,000–\$50,000 for a PWR assembly, i.e., 87–108 \$/kgHM, (1989 U.S. \$). E. R. Johnson, "Choosing At-Reactor Spent Fuel Storage Technologies," Proceedings of the International Topical Meeting on High Level Radioactive Waste Management, Las Vegas, Nevada, April 8–12, 1990, pp. 1030–1036.

8. Private communication, Harold Feiveson, Center for Energy and Environmental Studies, Princeton University, March 1999. However, the MOX spent fuel is assumed to be stored in the pools of reactors until 2030.

9. The reference at footnote 7 uses nearly the same (94%) storage cost DUPIC spent fuel as for PWR UO₂ spent fuel.

10. Private communication, Harold Feiveson, Center for Energy and Environmental Studies, Princeton University, March 1999.

11. Overseas transportation between Europe and Japan, J. Takagi et al., Comprehensive Social Impact Assessment of MOX Use in Light Water Reactors, Citizens' Nuclear Information Center, November 1997.

Таблица 15: Сравнение дополнительных накопленных расходов для вариантов в случае текущего выгорания в 2030 г. (в млн. долларов США 1998 г.).

Вариант	Учетная ставка 0 %			Учетная ставка 5 %			Учетная ставка 10 %		
	РВД	КТУР	Всего	РВД	КТУР	Всего	РВД	КТУР	Всего
<i>Вариант 1</i>									
Хранение на площадке	583	331	914	167	156	323	52	85	137
<i>Всего (с округлением)</i>	<i>583</i>	<i>331</i>	<i>914</i>	<i>167</i>	<i>156</i>	<i>323</i>	<i>52</i>	<i>85</i>	<i>137</i>
<i>Вариант 2</i>									
Транспорт (внутри страны)	186	0	186	56	0	56	18	0	18
Хранение на площадке	151	331	482	37	156	192	10	85	95
<i>Всего</i>	<i>336</i>	<i>331</i>	<i>667</i>	<i>93</i>	<i>156</i>	<i>248</i>	<i>28</i>	<i>85</i>	<i>113</i>
<i>Вариант 3^a</i>									
Хранение на площадке	0	131	131	0	86	86	0	59	59
Транспорт (внутри страны)	250	83	333	72	29	101	22	11	33
Хранение вне площадки	583	200	783	167	70	237	52	27	78
<i>Всего</i>	<i>834</i>	<i>414</i>	<i>1247</i>	<i>239</i>	<i>184</i>	<i>423</i>	<i>77</i>	<i>96</i>	<i>170</i>
<i>Вариант 4^b</i>									
Хранение на площадке	0	331	331	0	156	156	0	85	85
Транспорт из Кореи в Европу	399	0	399	120	0	120	39	0	39
Хранение за границей	3043	0	3043	918	0	918	298	0	298
<i>Всего</i>	<i>3422</i>	<i>331</i>	<i>3773</i>	<i>1038</i>	<i>156</i>	<i>1193</i>	<i>337</i>	<i>85</i>	<i>422</i>
<i>Вариант 5^b</i>									
Хранение на площадке	0	331	331	0	156	156	0	86	86
Транспорт из Кореи в Европу	399	0	399	120	0	120	39	0	39
Переработка	3344	0	3344	1008	0	1008	328	0	328
Изготовление МОХ-топлива	220	0	220	41	0	41	8	0	8
Транспорт из Европы в Корею	529	0	529	70	0	70	14	0	14
Хранение за границей	324	0	324	57	0	57	11	0	11
<i>Всего</i>	<i>4816</i>	<i>331</i>	<i>5147</i>	<i>1296</i>	<i>156</i>	<i>1452</i>	<i>400</i>	<i>86</i>	<i>485</i>
<i>Вариант 6^c</i>									
Хранение на площадке	229	140	369	57	91	147	15	61	76
Транспорт внутри страны	152	0	152	53	0	53	20	0	20
Изготовление топлива DUPIC (миним.)	0	1126	1126	0	391	391	0	148	148
Изготовление топлива DUPIC (максим.)	0	7083	7083	0	2460	2460	0	933	933
Хранение (отр. топливо DUPIC)	0	331	331	0	112	112	0	41	41
<i>Всего (миним.)</i>	<i>381</i>	<i>1597</i>	<i>1798</i>	<i>110</i>	<i>594</i>	<i>704</i>	<i>35</i>	<i>250</i>	<i>285</i>
<i>Всего (максим.)</i>	<i>381</i>	<i>7554</i>	<i>7935</i>	<i>110</i>	<i>2663</i>	<i>2773</i>	<i>35</i>	<i>1035</i>	<i>1070</i>

Примечание:

^a Стоимость хранения вне площадки отработанного топлива из реакторов РВД и КТУР предполагалась такой же, как для хранения на площадке¹.

^b В этом исследовании предполагается, что топливо, посланное для хранения за границей, не возвращается. Предполагалось, что стоимость хранения отработанного топлива равна 1000 долларов США за килограмм тяжелого металла.

^c Предполагалось, что стоимость хранения за границей до переработки включена в стоимость переработки. Расходы, относящиеся к утилизации извлеченного урана, отходов промежуточного уровня, и отходов низкого уровня, предполагаются включенными в стоимость переработки. Расходы на транспортировку извлеченного плутония на завод изготовления МОХ-топлива предполагается включенным в стоимость изготовления МОХ-топлива. При расчете стоимости изготовления МОХ-топлива учитывался кредит для МОХ-топлива².

^d Предполагалось, что завод по изготовлению топлива DUPIC будет построен на площадке реактора КТУР, так что расходы на транспортировку свежего топлива DUPIC на реакторы КТУР не рассматривается. При расчете стоимости изготовления топлива DUPIC учитывался кредит для топлива DUPIC³. Все расходы, относящиеся к топливному циклу DUPIC предполагаются включенными в стоимости топливного цикла КТУР.

^e Расходы на изготовление МОХ-топлива и расходы на транспортировку из Европы в Южную Корею включают расходы на изготовление МОХ-топлива и расходы на транспортировку свежего МОХ-топлива и отходов высокого уровня после 2030 г., до тех пор, пока они все не будут возвращены.

^f Для стоимости хранения остеклованных отходов высокого уровня использовалась стоимость в 106,6 доллара США за кг тяжелого металла для исходного отработанного топлива. Общие дополнительные накопленные расходы для варианта 5 будут равны 4 715; 1 397; и 474 миллиона долларов при учетных ставках, соответственно равных 0; 5 и 10%, для стоимости хранения остеклованных отходов высокого уровня в 35,5 доллара США за кг тяжелого металла.

¹ Расходы на строительство хранилища отработанного топлива вне площадки будет зависеть от типа хранения, например, от сухого или влажного хранения. Однако, если южнокорейское правительство построить хранилище сухого типа вне площадки, то стоимость строительства для хранения того же самого количества отработанного топлива будет такой же, как стоимость сухого хранилища на площадке.

² Для простого расчета расходов на производство 1 кг топлива из обогащенной UO_2 , эквивалентного по характеристикам выгорания такому же количеству МОХ-топлива, не предполагалось никакого цикла заказа и никакой величины потерь при приобретении урана для изготовления топлива из UO_2 . Топливо из UO_2 , обогащенное U-235 до 3,5% весовых процента, имеет степень выгорания в 43 000 МВт·день/тТМ. Кроме того, для изготовления 1 кг МОХ-топлива требуется примерно 6,1 кг охлажденного в течение 4 лет топлива из UO_2 со степенью выгорания в 43 000 МВт·день/тТМ. Plutonium Fuel: An Assessment, OECD/NEA, 1989. Общая стоимость производства 1 кг топлива из обогащенной UO_2 является суммой расходов на покупку урана, преобразование, обогащение и изготовление, т.е. $33,0 \times 7,5 + 8,8 \times 7,5 + 129,7 \times 5,2 + 219,8 = 1207,7$ долларов США. Коэффициенты 7,5 и 5,2 обозначают соответственно поправочные коэффициенты для природного урана и работы по обогащению, соответственно. Поэтому 1 кг МОХ-топлива должен получить кредит в 1131 доллар для компенсации стоимости изготовления 1 кг топлива из обогащенной UO_2 .

³ Для загрузки топлива для реактора КТУЗ с электрической мощностью 0,7 ГВт требуется 42,3 т тяжелого металла в топливе DUPIC, когда свежее топливо изготавливается из отработанного топлива РВД с выгоранием 43 000 МВт·день/тТМ, охлаждаемого в течение 10 лет. H. Choi et al., "Parametric Analysis of the DUPIC Fuel Cycle," Proceedings of the 1994 Nuclear Simulation Symposium, October 12–14, 1994, Pembroke, Ontario, pp. 71–80. Реактор КТУР с электрической мощностью 0,7 ГВт требует загрузки топлива на природном уране весом 85,4 т урана в год. Общая стоимость производства 1 кг топлива из природного урана предполагает сложение расходов на приобретение урана, преобразование и изготовление топлива КТУР, т.е. $33,0 + 8,8 + 38,5 = 80,3$ доллара. Следовательно, для 1 кг топлива потребуется кредит в 162,1 доллара ($80,3 \times 85,4/42,3$) для компенсации стоимости производства 1 кг топлива из естественного урана.

Таблица 16: Сравнение дополнительных накопленных расходов для вариантов в случае увеличенного выгорания в 2030 г. (в млн. долларов США 1998 г.).

Вариант	Учетная ставка 0 %			Учетная ставка 5 %			Учетная ставка 10 %		
	РВД	КТУР	Всего	РВД	КТУР	Всего	РВД	КТУР	Всего
<i>Вариант 1</i>									
Хранение на площадке	416	111	527	111	51	162	32	27	59
<i>Всего (с округлением)</i>	<i>416</i>	<i>111</i>	<i>527</i>	<i>111</i>	<i>51</i>	<i>162</i>	<i>32</i>	<i>27</i>	<i>59</i>
<i>Вариант 2</i>									
Транспорт (внутри страны)	179	0	179	48	0	48	14	0	14
Хранение на площадке	0	111	111	0	51	51	0	27	27
<i>Всего</i>	<i>179</i>	<i>111</i>	<i>289</i>	<i>48</i>	<i>51</i>	<i>99</i>	<i>14</i>	<i>27</i>	<i>41</i>
<i>Вариант 3</i>									
Хранение на площадке	0	41	41	0	26	26	0	18	18
Транспорт (внутри страны)	179	29	208	48	10	58	14	4	18
Хранение вне площадки	416	70	486	111	25	136	32	10	41
<i>Всего</i>	<i>595</i>	<i>139</i>	<i>734</i>	<i>159</i>	<i>81</i>	<i>220</i>	<i>46</i>	<i>31</i>	<i>77</i>
<i>Вариант 4</i>									
Хранение на площадке	0	111	111	0	51	51	0	27	27
Транспорт из Кореи в Европу	384	0	384	102	0	102	29	0	29
Хранение за границей	2928	0	2928	782	0	782	224	0	224
<i>Всего</i>	<i>3312</i>	<i>111</i>	<i>3422</i>	<i>883</i>	<i>51</i>	<i>934</i>	<i>254</i>	<i>27</i>	<i>281</i>
<i>Вариант 5</i>									
Хранение на площадке	0	111	111	0	51	51	0	27	27
Транспорт из Кореи в Европу	384	0	384	102	0	102	29	0	29
Переработка	3218	0	3218	858	0	858	247	0	247
Изготовление топлива МОХ-	212	0	212	35	0	35	6	0	6
топлива									
Транспорт из Европы в Корею	519	0	519	79	0	79	14	0	14
Хранение за границей	312	0	312	49	0	49	8	0	8
<i>Всего</i>	<i>4635</i>	<i>111</i>	<i>4746</i>	<i>1123</i>	<i>51</i>	<i>1184</i>	<i>304</i>	<i>27</i>	<i>331</i>
<i>Вариант 6</i>									
Хранение на площадке	62	44	105	15	28	43	4	18	22
Транспорт внутри страны	152	0	152	53	0	53	20	0	20
Изготовление топлива DUPIC (миним.)	0	1126	1043	0	391	391	0	148	148
Изготовление топлива DUPIC (максим.)	0	7083	7106	0	2460	2460	0	935	935
Хранение (отр. топливо DUPIC)	0	331	331	0	112	112	0	41	41
<i>Всего (миним.)</i>	<i>214</i>	<i>1501</i>	<i>1715</i>	<i>68</i>	<i>531</i>	<i>599</i>	<i>24</i>	<i>207</i>	<i>231</i>
<i>Всего (максим.)</i>	<i>214</i>	<i>7458</i>	<i>7672</i>	<i>68</i>	<i>2600</i>	<i>2668</i>	<i>24</i>	<i>994</i>	<i>1018</i>

Примечание: в этом исследовании предполагается, что отработанное топливо с увеличенным выгоранием, выгружаемое из реакторов РВД и КТУР, будет храниться в бассейнах до 2030 г.

ИНСТИТУЦИОНАЛЬНЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ

В вариантах 2, 3, и 6 предусматриваются перевозки отработанного топлива внутри страны. Для варианта 2 перевозка составит 215 тТМ в год для отработанного топлива РВД с 2016 по 2030 г. Для вариантов 3 и 6 перевозки соответственно составят 238 тТМ и 166 тТМ отработанного топлива РВД в год, для референтного сценария и текущего выгорания. Для варианта 3 еще потребуется перевозка отработанного топлива КТУР по 347 тТМ в год в течение того же периода.

До сих пор KAERI перевозила только ограниченное количество отработанного топлива, в основном для исследовательских целей³¹. Две перевозки были проделаны между соседними энергетическими реакторами на площадке Кори. Для этой цели были созданы стандартные корейские контейнеры и было показано, что в них можно безопасно перевозить отработанное топливо³². Внутренние перевозки отработанного топлива регулируются министерством по науке и технике (MOST) в соответствии с южнокорейским законом об атомной энергии³³. Южнокорейский закон об атомной энергии разрешает такие перевозки при условии, что предприятия гарантированно обеспечат адекватную безопасность отработанного топлива. История перевозок отработанного топлива в США и других странах показывает возможность таких перевозок³⁴.

Внутренние перевозки отработанного топлива могут проводиться по автомобильным и железным дорогам, или по морю. Последнее возможно, поскольку все южнокорейские площадки энергетических реакторов расположены на морском побережье. Какой бы транспорт не использовался, предприятие должно предпринять соответствующие меры для перевозки отработанного топлива, основанные на анализе маршрута, в котором учитывается общая опасность для населения и результаты консультаций с относящимися к делу местными властями.

В вариантах 4 и 5 требуются перевозки отработанного топлива за границу. Для таких перевозок требуется согласие США, Канады, и Австралии, которые являются членами группы ядерных поставщиков (NSG) и поставляют уран в Южную Корею. Правительство Южной Кореи имеет двусторонние соглашения по ядерному сотрудничеству с этими странами³⁵.

В вариантах 5 и 6 требуется переработка и повторное использование отработанного топлива РВД, которые требуют предварительного согласия США, Канады и Австралии в соответствии с теми же двусторонними соглашениями по ядерному сотрудничеству³⁶.

³¹ До сих пор не было срочной необходимости в перевозках больших количеств отработанного топлива.

³² *International Cooperation at the OECD/NEA on the Geological Disposal of Radioactive Waste*, OECD/NEA, Paris, 1998.

³³ См. статью 86 Закона Южной Кореи по атомной энергии, статью 235 Постановления об атомной энергии, и статью 99 Правил, дополняющих Закон об атомной энергии.

³⁴ Более 1300 тонн отработанного топлива было перевезено в США в 1979–1995 годах, и до 1986 года в Великобритании было произведено более 7 000 перевозок отработанного топлива по железной дороге. Не произошло никаких аварий, связанных с выбросом радиоактивности. M. Holt, *Transportation of Spent Nuclear Fuel*, Congressional Research Service Report for Congress 97–403, May 29, 1998.

³⁵ Правительство Южной Кореи заключило двусторонние соглашения по ядерному сотрудничеству с США, Канадой, и Австралией, соответственно в 1972, 1976, и 1979 годах <<http://203.230.61.4/>> (Subtitle: Status of nuclear cooperation agreements, MOST, South Korea (на корейском языке). В соответствии с двусторонними соглашениями по ядерному сотрудничеству с этими странами, передача специальных материалов, произведенных при использовании материалов, перемещенных в Южную Корею, другим странам, требует предварительного согласия правительств этих стран. K. S. Lee, "Concept and Major Factors of Nuclear Cooperation Agreement," *Nuclear Industry*, KAIF, February 1998, pp. 57–64 (Korean).

³⁶ Изменение формы или содержания специального материала, полученного при использовании материалов, или технологии, переданной Южной Корее, требует предварительного согласия правительств государств, предоставивших их, т.е. США, Канады и Австралии. K. S.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Если перевозки между площадками энергетических реакторов будут запрещены, то для референтного сценария и текущего выгорания оцениваемая накопленная нехватка емкости хранилищ отработанного топлива к 2030 г. возрастет до примерно 3900 т для отработанного топлива РВД и 8200 т для отработанного топлива КТУР. На существующих площадках бассейны будут заполнены в период между 2006 и 2022 г.г. Даже при увеличенном выгорании времена заполнения бассейнов будут продлены только на 3 года (для площадки Кори на 1 год). Если перевозки между площадками будут разрешены, то даже при текущей степени выгорания необходимости в дополнительных емкостях хранилищ отработанного топлива РВД не возникнет до 2027 г.³⁷. Экономическая оценка шести вариантов, рассмотренных в этом исследовании, показывает, что перевозка между площадками будет наиболее выгодным решением проблемы хранения дополнительного отработанного топлива в Южной Корее.

Для сценария малого роста, в случае отсутствия появления новых бассейнов после 2016 г., если перевозки между площадками атомных электростанций будут запрещены, то времена заполнения бассейнов на площадках и суммарные требования к дополнительной мощности хранилищ будут такими же, как в референтном сценарии. Если перевозки между площадками будут разрешены, то даже в случае сценария низкого роста бассейны на площадках РВД не будут заполнены до 2023 и 2027 г.г. соответственно, в случаях текущего и увеличенного выгорания.

Перевозка между площадками представляется наиболее непосредственным и экономичным путем для решения проблемы дополнительных емкостей для хранения отработанного топлива РВД перед окончательной утилизацией, если будет введена перевозка отработанного топлива внутри страны. Если перевозка между площадками не сможет быть реализована из-за опасений по транспортировке отработанного топлива, или по другим причинам, то следующей наиболее экономичной альтернативой будет сухое хранение на площадке.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор хотел бы поблагодарить всех тех, кто предоставил информацию, относящуюся к этому исследованию. Они работают в следующих организациях: Корейском исследовательском институте по атомной энергии (KAERI), Корейской компании ядерного топлива (KNFC), Корейской компании энергетического машиностроения (KOPEC), Сеульском национальном университете (SNU), и Техническом центре ядерного контроля (TCNC). Джангмин Канг особенно хотел бы поблагодарить профессоров Фрэнка фон Хиппеля и Харольда А. Фейвесона из Принстонского университета за их очень полезные комментарии и их помощь в его присоединении к Программе науки и всеобщей безопасности (PS & GS). Взгляды и выводы, выраженные в этой статье, не обязательно отражают взгляды и любое одобрение этих организаций или отдельных лиц внутри них.

Lee, "Concept and Major Factors of Nuclear Cooperation Agreement," *Nuclear Industry*, KAIF, February 1998, pp. 57–64 (Korean).

³⁷ Текущая политика Южной Кореи для отработанного топлива КТУР такова, что отработанное топливо КТУР должно храниться в сухих хранилищах на площадке Волосонг до тех пор, пока оно не будет окончательно захоронено в геологическом хранилище. Частное сообщение, Professor C. S. Kang, Department of Nuclear Engineering, Seoul National University, South Korea, апрель 1999 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ

В этом приложении показана теплота распада, выраженная в ваттах на тонну тяжелого металла, для нескольких типов отработанного топлива и высокоактивных отходов в зависимости от времени охлаждения, приведенные в табл. 17 и на рис. 8. Теплота распада была рассчитана при помощи программы ORIGEN2³⁸³⁸.

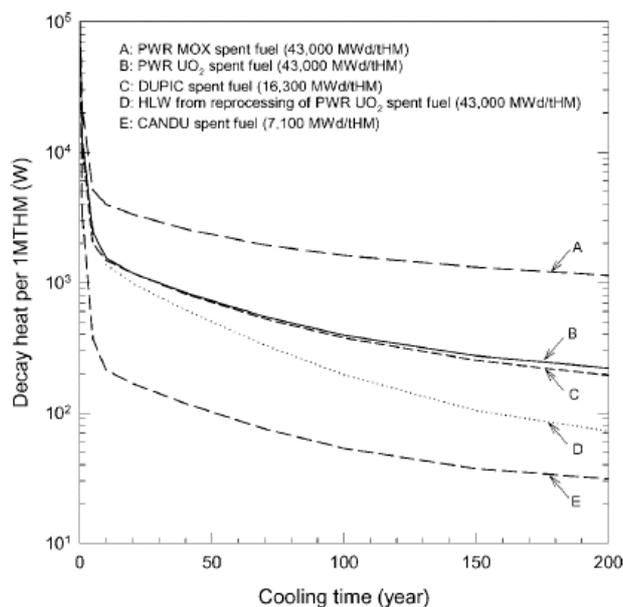


Рис. 8: Теплота распада, выраженная в ваттах на тонну тяжелого металла, для отработанного топлива и высокоактивных отходов в зависимости от времени охлаждения.

A – отработанное MOX-топливо РВД (43000 МВтд/тТМ)

B – отработанное UO₂-топливо РВД (43000 МВтд/тТМ)

C – отработанное топливо DUPIC (16300 МВтд/тТМ)

D – высокоактивные отходы от переработки отработанного UO₂-топлива РВД (43000 МВтд/тТМ)

E – отработанное топливо КТУР (7100 МВтд/тТМ)

³⁸ A. G. Croff, *A User's Manual for the ORIGEN2 Computer Code*, ORNL/TM-7175, July 1980.

Табл. 17: Теплота распада (в ваттах на тонну тяжелого металла) для отработанного топлива и высокоактивных отходов в зависимости от времени охлаждения.

Позиция	При выгрузке	Через 1 год	Через 10 лет	Через 100 лет
Отработанное топливо РВД UO ₂				
Актиниды	$1,22 \times 10^5$	$8,87 \times 10^2$	$3,65 \times 10^2$	$2,73 \times 10^2$
Продукты деления	$2,00 \times 10^6$	$1,16 \times 10^4$	$1,17 \times 10^3$	$1,21 \times 10^2$
Всего	$2,12 \times 10^6$	$1,24 \times 10^4$	$1,54 \times 10^3$	$3,94 \times 10^2$
Высокоактивные отходы				
Актиниды	N/A	N/A	$2,02 \times 10^2$	$7,52 \times 10^1$
Продукты деления	N/A	N/A	$1,16 \times 10^3$	$1,21 \times 10^2$
Всего	N/A	N/A	$1,37 \times 10^3$	$1,96 \times 10^2$
Отработанное топливо РВД MOX-				
Актиниды	$1,09 \times 10^5$	$8,37 \times 10^3$	$3,06 \times 10^3$	$1,52 \times 10^3$
Продукты деления	$1,88 \times 10^6$	$1,26 \times 10^4$	$9,18 \times 10^2$	$9,25 \times 10^1$
Всего	$1,99 \times 10^6$	$2,10 \times 10^4$	$3,98 \times 10^3$	$1,61 \times 10^3$
Отработанное топливо КТУР				
Актиниды	$1,05 \times 10^5$	$2,63 \times 10^1$	$2,32 \times 10^1$	$3,25 \times 10^1$
Продукты деления	$1,36 \times 10^6$	$3,31 \times 10^3$	$1,90 \times 10^2$	$2,09 \times 10^1$
Всего	$1,47 \times 10^6$	$3,33 \times 10^3$	$2,13 \times 10^2$	$5,34 \times 10^1$
Отработанное топливо DUPIC				
Актиниды	$9,48 \times 10^4$	$4,02 \times 10^3$	$6,82 \times 10^2$	$2,90 \times 10^2$
Продукты деления	$1,27 \times 10^6$	$6,64 \times 10^3$	$8,02 \times 10^2$	$8,53 \times 10^1$
Всего	$1,36 \times 10^6$	$1,07 \times 10^4$	$1,48 \times 10^3$	$3,76 \times 10^2$
<p>^а При выгорании 43 000 МВтд/тТМ.</p> <p>^б Высокоактивные отходы производятся в результате химической переработки охлажденного в течение 10 лет отработанного топлива РВД с UO₂ с выгоранием 43 000 МВтд/т, содержащие все, что находилось в отработанном топливе, за исключением летучих элементов и 99.5% урана и плутония¹.</p> <p>^в Свежее MOX-топливо изготавливается из плутония, извлеченного из охлажденного в течение 10 лет отработанного топлива РВД с UO₂ с выгоранием 43 000 МВтд/т с использованием обедненного урана².</p> <p>^г При выгорании 7 100 МВтд/тТМ.</p> <p>^д Свежее топливо DUPIC изготавливается из охлажденного в течение 10 лет отработанного топлива РВД с UO₂ с выгоранием 43 000 МВтд/т и выгружается при выгорании 16 300 МВтд/т.</p> <p>1. A. G. Croff et al., Graphical and Tabular Summaries of Decay Characteristics for Once-Through PWR, LMFBR, and FFTF Fuel Cycle Materials, ORNL/TM-8061, January 1982.</p> <p>2. Plutonium Fuel: An Assessment, OECD/NEA, Paris, 1989.</p>				