

В. ВЕСЕЛЫ
ЧССР

МА
74
89

Отработавшее топливо чехословацкой атомной энергетики

АННОТАЦИЯ

Переработка отработавшего топлива в экономическом отношении выгодна, так как она позволяет понизить себестоимость электроэнергии. Для энергетики, основанной на водо-водяных реакторах, окупается перерабатывать топливо уже на установках производительностью свыше 2 т/с. Полученная в результате регенерации урановая изотопная смесь сама способна покрывать расходы на регенерацию, так что плутоний является побочным продуктом, который получается практически бесплатно, что стимулирует развитие системы быстрых реакторов. Если в ЧССР не нужна постройка перерабатывающего завода для топлива тепловых реакторов, то для системы быстрых бридеров она станет необходимостью.

ВВЕДЕНИЕ

После энергетического использования в реакторе атомное топливо еще содержит определенное количество делящихся материалов и других ценных составляющих и поэтому его нельзя рассматривать как обременяющий отвал. Последнее в большей мере относится к отработавшему топливу водо-водяных реакторов, которые должны быть на долгое время преобладающим типом реакторов в чехословацкой атомной энергетике. Позже, когда первая генерация реакторов будет заменена реакторами на быстрых нейтронах, отработавшее топливо станет главным источником расщепляющегося материала и его заслугой атомная энергетика начнет постепенно избавляться от зависимости от природного сырья.

Таким образом существуют важные причины, по которым промышленное использование продуктов из отработавших топлив по праву занимает главное место в проблемах топливно-энергетического баланса и по которым переработка отработавших топлив должна учитываться в планах развития топливно-энергетической базы. В соответствии с переработкой отработавших топлив нашей атомной энергетике нам будет необходимо тщательно взвесить, с какого момента регенерация топлива будет для нас экономически оправдана. Это будет зависеть главным образом от стоимости переработки по заказу на заводе, строительство которого намечается в рамках СЭВ. Важным будет также дальнейшее развитие мощностей по переработке, особенно в стадии развития энергетике на базе реакторов на быстрых нейтронах.

ОЖИДАЕМОЕ КОЛИЧЕСТВО ОТРАБОТАВШИХ ТОПЛИВ В ЧССР

Официальной основой для дальнейших рассуждений и анализов нашей ситуации в будущем является модель чехословацкой атомной энергетике, опубликованная представителями Чехословацкой комиссии по атомной энергии /1/, которая уточняет ситуацию до 1990 года. До этого времени должны почти без исключения строиться советские водо-водяные реакторы. Однако данная модель не решает вопрос, при помощи каких реакторов должен покрываться рост мощностей после 1990 года. Данный вопрос будет очевидно зависеть от созданного запаса плутония, в соответствии с которым должна будет решаться и проблематика быстрых бридеров. Анализ ожидаемых проблем должен сопровождаться рядом дальнейших предположений, особенно в случае характеристик топлив тех типов реакторов, о которых пока не имеется конкретных информации. Основой для рассуждений являются опубликованные в разных источниках данные, которые включены в таблицу № 1 /2,3,4/.

Если за основу анализа ситуации до 2000 года взять годовой прирост мощностей равный 2000 Мвт после 1990 года и для введения реакторов на быстрых нейтронах плутоний, полученный из собственных источников, то мы получим вероятный рост количества отработавшего топлива, который приведен в таблице № 2 и в таблице № 3 /5/. Однако, это только один из возможных вариантов. Изменения могут произойти, например, в случае запаздывания развития реакторов на быстрых нейтронах, что в свою очередь поведет к повышенному спросу на урановое сырье. Если бы мы захотели в какой-то степени уменьшить неблагоприятное развитие уранового баланса, то мы должны какую-то часть роста мощностей реализовать за счет лучших конверторов, чем водо-водяные реакторы. Если, наоборот, развитие реакторов на быстрых нейтронах будет ускорено и для них не будет достаточно плутония, то экономически выгодной будет их эксплуатация сначала на обогащенном уране /6/. Существуют, однако, и другие возможности. Во всех этих случаях объемы отработавших топлив особенно в девяностых годах существенно изменятся.

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ПЕРЕРАБОТКИ

Что касается экономического интереса к регенерации топлива, то он пока зависит в основном от концентрации оставшегося урана-235 и условно также от содержания плутония, прежде всего его расщепляющихся изотопов. О том, является ли выгодной регенерация только урана, решает сравнение стоимости переработки и стоимости эквивалентного количества урана и работы обогащения, необходимых для получения продукта одинакового обогащения. Что касается плутония, то для него ситуация пока более сложная. Это зависит от различного использования

плутония в тепловых и быстрых реакторах. В реакторах на быстрых нейтронах плутоний используется в большей степени, но несмотря на это, в настоящее время в некоторых развитых капиталистических странах, главным образом в США, планируется или уже подготавливается плутониевое обогащение топлив для тепловых реакторов. На данные соображения, однако, необходимо смотреть как на запасное решение или как на компромиссный выход из ситуации, которая в противном случае может привести к еще большим потерям. Данная, на первый взгляд с точки зрения экономики, несколько курьезная ситуация, является результатом первенства данных государств в атомной энергетике и связанных с этим растущих запасов плутония, а с другой стороны постоянного запаздывания развития коммерческих реакторов на быстрых нейтронах. Если плутоний не будет использоваться, то в нем будет уложен мертвый капитал, который не принесет никакой прибыли. При общепринятых семипроцентных налогах его цена за десять лет вырастет в два раза. Это могло бы быть приемлемым, если бы существовала гарантия, что быстрые реакторы будут способны использовать плутоний в полной мере до того времени.

На данное состояние чувствительно реагирует мировой рынок, на котором в настоящее время для плутония создалась не очень благоприятная ситуация. Например: в 1972 году /7/ один грамм плутония стоил 7 долларов и менее, что является малой долей еще до недавнего времени действительной официальной цены КАЭ США - 43 доллара. Ожидается дальнейшее снижение цены до 4 - 5 долларов, что будет продолжаться до того времени, когда рынок будет оживлен потребностями быстрых реакторов. В течение одной ночи, как говорится, плутоний стал обыкновенным торговым сырьем (как перед этим и уран). Везде, где в настоящее время накапливаются или где уже существуют более старые запасы и нет надежд, что реакторы на быстрых нейтронах будут работать в скором времени, существует объективное экономическое давление на хотя бы частичное использование плутония. Этот факт является также главной причиной того, что плутонием должны обогащаться топлива для тепловых реакторов, хотя это решение не является самым подходящим с точки зрения энергетического использования. Перед данным вопросом в настоящее время очутились конкретно Соединенные Штаты Америки. Однако, с другой стороны существуют и другие государства (Великобритания или ФРГ), в которых преобладает оптимизм в вопросе реализации реакторов на быстрых нейтронах в ближайшее время, и весь плутоний резервируется для них. В остальных государствах, которые не находятся на такой высокой степени развития атомной энергетике и которым не грозит экономическое давление плутониевых запасов, существуют опасения обратного характера, а именно: стоит вопрос будет ли достаточно плутония ко времени актуальных нужд, чтобы не дошло к нежелательному замедлению темпа развития реакторов на быстрых нейтронах. В данной ситуации экономические рассуждения сосредоточиваются пока только на переработку урана.

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ВЫГОДЫ ПЕРЕРАБОТКИ ТОПЛИВ ВВЭР

Вопрос о том, когда экономически выгодно перерабатывать топлива, становится ясным из равенцы расходов, затраченных на переработку, и прибыли от произведенных продуктов. Нельзя при этом не учитывать расходы на транспортировку топлива с электростанции на завод по регенерации, которые составляют приблизительно 5 - 15 % стоимости переработки. Экономический эффект далее зависит от стоимости продуктов и сырья, которое этими продуктами может быть эквивалентно заменено. Это относится к оставшемуся урану - 235, а также к плутонию. Ориентировочные данные для наших условий можно получить из таблицы № 1, из которой видно, что в 1 кг отработавшего топлива ВВЭР содержится столько урана - 235, сколько его содержится в 2 кг природного сырья и кроме того еще 0,4 эквивалента работы разделения (рассчитано при отвале 0,3% урана - 235).

Если мы будем оценивать топливо водо-водяных энергетических реакторов с точки зрения содержания урана - 235 на основе сегодняшнего уровня цен в США, а результат сравнить с ценой исходного свежего сырья и работы разделения, которую мы бы были должны затратить для производства такого топлива, то мы получим цену приблизительно 1300 крон чехословацких за килограмм. Это очень интересный результат, из которого следует, что только уран способен покрыть издержки производства уже при заводе производительностью 2 т/сутки, или другими словами плутоний должен получаться даром. Это на самом деле очень важная действительность, влияние которой проявляется уже при относительно малой мощности завода. Не

была бы пренебрежительной и экономия естественного урана, этого в будущем все более ценного сырья, которая бы должна в девяностых годах составлять более 1000 тонн в год.

Если мы будем, наоборот, оценивать ситуацию только с точки зрения плутония и пренебрежем выходом урана, то и в этом случае мы получим выразительный экономический эффект. Из отработавшего топлива ВВЭР можно получить плутоний по цене, которая является только частью сегодняшней и так уже низкой цены на мировом рынке. Если к этому прибавить еще почти в два раза больший энергетический эффект плутония по сравнению с ураном - 235 в реакторах на быстрых нейтронах, то мы получим в четыре раза меньшую цену топливного материала на основе рециклированного плутония, чем на основе урана - 235, что в свою очередь положительно проявится на топливной составляющей электроэнергии, производимой в реакторах на быстрых нейтронах.

ОТРАБОТАВШЕЕ ТОПЛИВО ИЗ АКТИВНЫХ ЗОН РЕАКТОРОВ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ

Предыдущие рассуждения касались топлив водо-водяных реакторов или топлив из периферийных зон реакторов на быстрых нейтронах, которые можно перерабатывать без особых осложнений экстракционными процессами. До сих пор не выяснено, можно ли поступать подобным образом и в случае переработки топлива из активных зон быстрых реакторов - размножителей с выгоранием минимально 80 000 Мвт сутки/тону и со значительным остаточным содержанием плутония. Все еще можно встретиться с рассуждениями, которые стараются оправдать применимость жидкостных экстракционных процессов и для переработки такого топлива (например после смешивания с топливом из размножающей оболочки). Несмотря на это, начинают преобладать взгляды, что данную проблематику могут решить сухие процессы (особенно фтор-процесс), для которых большая радиоактивность не является значительным препятствием. Вопреки всем надеждам, связанным например с сокращением времени контактирования при экстракции, не представляется возможной переработка топлива с кратковременным охлаждением с таким успехом как с помощью фторидного метода, что с точки зрения минимализации времени удвоения расщепляющегося материала рассматривается как серьезный недостаток.

Интерес к максимальному сокращению циркуляции плутония вероятнее всего заставит перерабатывать топливо в непосредственной близости с энергетическим реактором. Транспортировка топлива с такой большой радиоактивностью и с большой остаточной тепловой мощностью явилась бы настолько сложной и дорогой, что регенерация на большом заводе вероятнее всего была бы менее экономична. Необходимо будет искать компромисс между величиной местной перерабатывающей установки и техническими возможностями транспортировки. На экономический эффект переработки вблизи электростанции должна положительно повлиять особенно большая концентрация реакторной мощности, которая обычно характерна для реакторов на быстрых нейтронах. Так например, для комплекса электростанций с общей мощностью 4000 Мвт установка для регенерации топлива обойдется в 700 миллионов крон, а стоимость единицы продукции должна находиться в диапазоне 3000 - 4000 крон/кг урана или плутония /8/.

ПЕРЕРАБОТКА И РАСХОДЫ НА ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Регенерация отработавших топлив хотя и является сложным и трудоемким процессом, то ее влияние на производственные расходы по производству электроэнергии не является существенным /9/. Как показывает таблица № 4 капиталовложения в завод по переработке являются только малой частью капиталовложений, которые необходимо затратить на атомные электростанции, для которых завод по переработке предназначен (принимая 6 миллиардов крон для введения 1000 Мвт электрической мощности).

Топливная составляющая для реакторов ВВЭР должна находиться в диапазоне 5 - 5,5 геллеров/квтчас. На данные расходы не должна влиять регенерация топлива даже при использовании только регенерированной урановой изотопной смеси. В случае переработки на заводе производительностью 5 тонн/сутки только прибыль за уран даст экономию 4%.

Еще большую экономию можно получить при учете прибыли за плутоний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Переработка отработавшего топлива является одним из возможных вариантов снижения себестоимости электроэнергии из атомных источников. Это относится в большей мере к топливу ВВЭР, где остаточное обогащение топлива еще достаточно высокое, поэтому переработка такого топлива для регенерации только урана рентабельна уже на установках производительностью 2 т/сутки. Вполне очевидно, что общий завод, построенный в рамках СЭВ, будет иметь более высокую производительность.

В заключение необходимо подчеркнуть, что в расходы по переработке в настоящее время не включаются трудно определяемые расходы на захоронение радиоактивных отходов, концентрированной смеси продуктов расщепления, которая является потенциальной угрозой для десятков следующих поколений. Пока данная проблематика не будет достаточно изучена и технически надежно гарантирована, переработка (а тем самым и целая атомная энергетика) не может считаться полностью обеспеченной. Вероятнее всего вопрос о том, где должен быть построен завод по переработке отработавшего топлива из тепловых атомных реакторов, будет решаться с точки зрения экологии. Если маловероятно, что завод по переработке отработавшего топлива ВВЭР будет построен у нас, то переработка топлива реакторов на быстрых нейтронах может оказаться реальной, если будет необходимо максимально ускорить рециклирование плутония. Это наверняка не обойдется без регенерации топлива хотя бы из активных зон вблизи источника, а для этого нам будет необходимо подготовиться в области методов по ликвидации отходов и выбора подходящих площадок.

Данная проблема столь важна, что о ней нельзя забывать уже в стадии выбора площадок для строительства атомных электростанций. Те площадки, которые дадут возможность реализации производства нескольких тысяч мегаватт электроэнергии, должны быть проверены также с точки зрения пригодности для строительства завода по переработке.

Таблица 1. Предполагаемая характеристика отработавших топлив /2,3,4/.

Тип реактора	Годовой обмен топлива /т/	Чистая годовая продукция плутония /т/	Эквивалент естественного урана /т/ ⁺	Эквивалент работы разделения /т ЕРР/ ⁺
ВВЭР 440	13	0,1	26	5
ВВЭР 1000	20	0,16	40	8
БР 1000	периферийные зоны 25	0,3	-	-
	активная зона 10			

⁺ при отвале 0,3% урана - 235

Таблица 2. Предполагаемый долговременный баланс отработавшего топлива чехословацкой атомной энергетики.

Год	Введенная мощность		Отработавшее топливо		Урановая смесь		Общее кол. плутония /т/
	/Мвтэ/		/т/		/т/ ⁺		
	ВВЭР	БР	ВВЭР + периф.зоны БР	Активные зоны БР	Эквивалент ест. урана	Эквивалент работы разд.	
1980	1320	-	40	-	80	16	0,1
1985	4400	-	380	-	760	150	1,6
1990	9500	2000	1200	30	2300	460	6,5
1995	16000	5000	3100	180	5200	1000	20,0
2000	20000	12000	6200	580	9400	1900	44,0

⁺ при отвале 0,3% урана - 235

Таблица 3. Возможный рост продукции отработавших топлив.

Год	Введенная мощность		Отработавшее топливо		Урановая смесь		Общее кол. плутония /т/
	/Мвтэ/		/т/		/т/ ⁺		
	ВВЭР	БР	ВВЭР+периф.зоны БР	Активные зоны БР	Эквивалент ест. урана	Эквивалент работы разделения	
1980	1320	-	13	-	26	5	0,1
1985	4400	-	104	-	210	42	0,5
1990	9500	2000	235	10	400	80	1,4
1995	16000	5000	450	40	700	140	3,5
2000	20000	12000	720	110	900	180	5,8

⁺ при отвале 0,3% урана-235

Таблица 4. Вероятные экономические результаты переработки отработавших топлив.

Мощность завода /т/сутки/	Обслуживаемая мощность реакторов /Мвтэ/	Капиталовложения		Отношение капиталовложений /%/	Стоимость переработки и транс. /квч/кг/урана	Сост. стоим. от перераб. /гелл./	Экономия себест.при рецирк. урана /квтчас/
		в электро-станции /млрд квч/	в заводы по переработке				
2	30000	180	1,5	0,8	1200-1300	0,5	0,0
5	75000	450	2,2	0,4	700-800	0,3	0,2

ЛИТЕРАТУРА

- /1/ Я. Нойманн, К. Варабас: Опыт, полученный в ЧССР при строительстве атомной энергетики, *Jaderná energie* 17, No 12, 1971.
- /2/ Проект электростанции В 1, Энергопроект, Прага, 1972.
- /3/ V.P. Denisov: Die Entwicklung von Kernkraftwerken mit Wasser-Wasser-Reaktoren in der Ud SSR, *Kernenergie* 15, No. 11, 1972.
- /4/ З. Тлuchгорж: Современное состояние и перспективы развития быстрых реакторов в мире, Информация ЦИВЯП 3/69.
- /5/ В. Пешек: Прогноз обеспечения атомной энергетики топливом, Работа ИЯТ 200.
- /6/ В. Веселы, В. Пешек: Проблематика эффективного использования естественного урана в чехословацкой атомной энергетике, *Jaderná energie* 19, No 3, 1973.
- /7/ W.D. Müller, R. Hossmer: Jahrbuch der ATW 1973 Düsseldorf, Handelsblatt Verlag, 1973.
- /8/ R. Faugeras: Traitement des combustibles hautement irradiés, Proc. 4th UN Conf., Geneva, Vienna: МААЕ, 1972.
- /9/ В. Веселы, Й. Лочек: Экономическая проблематика переработки отработавших ядерных топлив, Работа ИЯТ 234.