



УДК 621.039.516.4

ЯДЕРНЫЙ ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ*

Б.В. Никипелов

Минатом, г. Москва

Как бы продолжая пример “Первой в мире АЭС”, ядерный топливный цикл (ЯТЦ) Минатома РФ во многих аспектах вышел на первые позиции в мире.

Одновременно имеется целый ряд нерешенных вопросов, даже проблем, решать которые предстоит работникам отрасли.

Во многом взаимосвязанный, являясь по сути и целям единой корпорацией, ЯТЦ только условно можно разделить на четыре части:

- комплекс, обеспечивающий ЯТЦ природным сырьем (уран, Zr, Nb, РЗЭ, спец-сталь);
- изотопный обогатительный комплекс;
- ядерный топливный комплекс;
- комплекс обращения с отработавшим топливом (ОЯТ).

(Нам представляется, что будущие реакторы БН, как сжигатели долгоживущих нуклидов, будут одновременно относиться как к подотрасли ядерной энергетики, так и к ЯТЦ).

Первые две части ЯТЦ Минатома, как части ядерного промышленного комплекса, начали создаваться задолго до “Первой в мире”. Поэтому в СССР был развитый и технологически и по мощностям урандобывающий комплекс, имевший возможность добывать до 15 тыс. т урана в год. Переход на основных месторождениях на метод подземного кислотного выщелачивания с достаточным качеством оборудования, позволил иметь низкую себестоимость получаемого урана. Обвинения после выхода на мировой рынок наших предприятий в демпинге были несправедливыми, и диктовались лишь конкурентной борьбой на этом рынке.

После распада СССР основные урансодержащие провинции остались вне России. Здесь остался лишь Приаргунский ГОК, с возможностью добычи 2,5 - 3 тыс. т урана в год. Из-за только шахтного метода добычи бедных руд, здесь высокая себестоимость получаемого урана. В России есть несколько неосвоенных месторождений, пригодных для подземного выщелачивания, но, к сожалению, самые крупные из них в Сибири в зоне постоянно низких температур в выщелачиваемых слоях. Тем не менее, в Минатоме осталась научная и производственная база, продолжается на практике освоение бактериологического выщелачивания, поэтому возможно разумное расширение урандобывающего комплекса, в первую очередь, с целью снижения средней себестоимости добычи. По-видимому, можно ориентироваться на постепенное повы-

© **Б.В. Никипелов, 1999**

* Доклад на X Международной конференции Ядерного общества России (Обнинск, 28 июня-2 июля 1999 г.)



ЯДЕРНОЕ ОБЩЕСТВО РОССИИ

шение объема добычи с 2,5 до 4,5 - 6 тыс. т в течение 10 - 15 лет с достижением средней себестоимости не выше 30 долл. США за 1 кг урана.

Подчеркивая единство ЯТЦ, общей его задачей для Минатома является экономия природного урана на последующих циклах, к чему уже давно стремятся за рубежом.

В Минатоме РФ остался весь масштабный комплекс заводов по разделению изотопов урана и других стабильных изотопов с большим резервом по мощности для оказания услуг зарубежным партнерам. Переход от газодиффузионного метода обогащения урана к газовому центробежному, перманентное совершенствование оборудования этого метода позволили России иметь наиболее конкурентную подотрасль ЯТЦ в мире, именно это позволило заключить взаимно выгодный договор по ВΟΥ-НОУ, что ныне поддерживает отрасль и страну в целом.

Техническое состояние и имеющаяся мощность изотопного обогатительного производства уже сейчас позволяет извлекать предприятиям изотоп урана-235 из природного урана на 90%, а не на 57 - 65, как на зарубежных заводах. При этом в отвалах остается 0,05-0,06% урана-235 при удовлетворительной себестоимости производств. Это позволяет перерабатывать отвалы прошлых лет, как отечественные, так и зарубежные. Однако последнее мы считаем нежелательным без осуществления переработки до конечной закиси-окиси отвального урана, подготовленной к длительному хранению, или захоронению. Конечно, помогать и своим партнерам, и конкурентам нужно, только с полной оплатой услуг законченного производства без ущерба для себя.

Поддержка технологического уровня изотопного комплекса, его конкурентной способности, совершенствование техники и технологию - постоянная задача отрасли.

Комплекс изготовления "свежего" ядерного топлива для АЭС создавался с шестидесятых годов. Его основа ныне в Минатоме РФ - заводы в городах Электростали (АО "Машиностроительный завод") и Новосибирске (АО "Химконцентрат"). Постоянно развиваясь, производство находится на мировом уровне с достаточной мощностью, хотя требуется создание замещающих мощностей взамен оставшихся за рубежом после распада СССР.

В настоящее время безотказность ТВС для топлива энергоблоков ВВЭР-1000 и ВВЭР-440 (В-213) примерно одинакова с зарубежными. Например, и для него, и для PWR (США, Франция) она составляет $2-3,5 \cdot 10^{-5}$ в год. С образованием ОАО "ТВЭЛ" возможность предоставления максимально полного пакета услуг потребителю помогает обеспечить конкурентную способность на рынке (по лицензированию, поставкам, сопровождению эксплуатации ядерного топлива, включая предоставление гарантий по эксплуатации активных зон реактора АЭС).

Сохранение и расширение рынков сбыта - важнейшая задача ОАО "ТВЭЛ".

Поставки российского топлива осуществляются:

- на все объекты российского рынка;
- на традиционные зарубежные: Украину, Армению, Литву, Болгарию, Словакию, Чехию, Финляндию;
- на осваиваемые рынки: в Германию, Китай, Швейцарию, Индию и Иран.

Одновременно уменьшение урановой базы высветило отставание отечественной реакторной технологии и, в частности, топлива от зарубежных параметров, связанных с экономией сырья: глубина выгорания топлива, удельный расход природного урана, использование выгорающих поглотителей. Не снимается задача улучшения качества по безотказности до величин ниже 10^{-5} в год и задача замены дефектных ТВЭЛ



ЯДЕРНОЕ ОБЩЕСТВО РОССИИ

кассет на новые и т.д. Необходимо обеспечивать желания потребителя по режимам переменной нагрузки АЭС. Нельзя не видеть, что в мире не найдено серийной экономической технологии получения уран-плутониевого топлива, особенно для тепловых реакторов. Перспективная идея (по крайней мере, для энергоблоков БН) изготовления виброуплотненных твэлов с металлическим геттером требует более интенсивных усилий и дополнительного подтверждения. Необходимо усовершенствование и традиционных направлений применительно к уран-плутониевому топливу.

Наконец, снижение себестоимости на всех переделах изготовления топлива остается важнейшей задачей топливной подотрасли.

Конечная стадия ЯТЦ - обращение с ОЯТ. “Конец - всему делу венец” - говорит русская пословица. Ныне это применимо к конечной стадии ЯТЦ.

Хотя более 90% радиоактивности находятся в реакторах и в первичных приреакторных хранилищах, в глазах общественного мнения именно судьба ОЯТ с содержащимися в них РАО определяет в конечном счете судьбу ядерной энергетики. За прошедшие 45 лет, по мнению общества, ни одна из двух основных концепций обращения с ОЯТ не доказала своих неоспоримых преимуществ: захоронение ОЯТ без переработки, лишь только после определенного времени хранения и ампулирования, технически возможно и доказывается специалистами на основе стабильности месторождений нефти и газа в течение миллионов лет. Однако техногенный характер захоронений ОЯТ со значительными радиационными и тепловыми нагрузками при больших объемах захоронений (в США планируется мощность в 90 тыс. т “тм” в одном регионе Юкки-Маунтин), невозможность выбора пригодных мест для каждой из более чем тридцати стран с АЭС, тем более при продолжении развития и эксплуатации ядерной энергетики, по крайней мере, в ближайшее столетие не дает возможность гарантированного решения на сотни тысяч лет этой задачи. Практически ни одна страна еще не приступила к осуществлению захоронения, и даже передовая в этом направлении страна Швеция осуществляет подготовку только к первой стадии - длительного подземного хранения ампулированных ОЯТ.

Переработка ОЯТ с целью извлечения только урана и плутония, решая проблему сырья для ядерной энергетики, не решает принципиально проблему гарантированного захоронения долгоживущих ВАО, лишь облегчая ее по сравнению с захоронением ОЯТ.

Кроме того, непригодность большинства эксплуатируемых ядерных энергоустановок на тепловых нейтронах к использованию МОХ-топлива приводит к избытку невостребованного в настоящий момент всего выделяемого плутония (на складах России хранится 30 т энергетического плутония, на складах Франции - около 50 т). Значительные успехи первых двух частей ЯТЦ в России и в мире, снизившие цены на уран и на услуги по его изотопному обогащению, более низкие, чем предполагались ранее темпы развития ЯЭ и особенно с реакторами на быстрых нейтронах, отложили необходимость переработки ОЯТ, но не сняли ее вовсе.

В итоге, на настоящий момент в мире переработано только около 10% общего объема ОЯТ. (Нужно обратить внимание на то, что в России переработано более 3 тыс. т “тм” в ОЯТ, что составляет 25 % от объема топлива, выгруженного из энергоустановок России и хранящихся на сегодняшний день).

При распределении стран мира на три группы: ориентирующихся на захоронение ОЯТ, на их переработку (среди них Россия), или на отложенное решение этой проблемы через 40 - 50 лет, фактически все страны ныне осуществляют длительное хра-



ЯДЕРНОЕ ОБЩЕСТВО РОССИИ

нение либо большей части (перерабатывающие страны), либо всего топлива (все остальные).

Поэтому и для отрасли Минатома становится важнейшей “технология выдержки” - длительного “сухого” хранения ОЯТ (до 50 -60 лет), надежного, экологически приемлемого, упрощающего и удешевляющего последующую переработку ОЯТ и захоронение РАО.

Перспективы ЯТЦ в России. Решая экологическую приемлемость замкнутого ядерного цикла, различные авторы выступили с предложением об осуществлении при обращении с ОЯТ принципа радиационной эквивалентности. Принцип состоит в достижении равенства радиоактивности, извлеченной из земли при добыче урана, с радиоактивностью, навечно захораниваемой в землю в отходах после переработки. Как любое принципиально новое предложение, этот принцип не нашел еще достаточно-го количества сторонников и требует дальнейшей разработки. Однако необходимо сказать о принципиальной правильности выбранного авторами пути совершенствования ЗЯТЦ: этот цикл должен быть переориентирован с переработки для решения сырьевых энергетических проблем ЯЭ, на комплексную переработку со “сжиганием” плутония и долгоживущих радионуклидов в реакторах БН, в первую очередь, трансурановых элементов. Это позволит окончательно захоранивать отходы на срок, приемлемый для гарантированной надежности сохранения целостности техногенных сооружений, т.е. на срок в 300 - 500 лет. Еще было бы надежнее уйти от захоронения высокоактивных отходов, превратив их за счет переработки и выдержки в среднеактивные. Речь при этом не идет о трансмутации таких нуклидов, как цезий или стронций, их нужно максимально использовать в малой и средней ядерной энергетике и снизить затем их радиоактивность за счет хранения на Земле.

Для осуществления такой стратегии необходимо выполнить, во-первых, модернизацию заводов по переработке в России, как действующего РТ-1, так и проекта завода РТ-2, во-вторых, создать производство уран-плутониевого топлива с мощностью не менее 5 т плутония в год, и в-третьих, построить и ввести в эксплуатацию четыре энергетические установки БН-800 на Белоярской и Южно-Уральской АЭС. При этом необходимо обосновать величину коэффициента воспроизводства этих реакторов БН, чтобы не допускать слишком больших складских запасов плутония (энергетического и военного), и обосновать срок ввода в эксплуатацию в связи с этим завода РТ-2 после доработки его проекта.

Парадокс развития ЯТЦ состоит в необходимости первоочередного развития ЯЭ с плутониевым топливом, и лишь вслед этому последует количественный и качественный рост ЗЯТЦ, в том числе переработка ОЯТ и от зарубежных АЭС и от АЭС РБМК, одновременно с улучшением экономичности и обеспечения охраны окружающей среды. Но это будет реализовываться через 25 - 30 лет хранения этого топлива. При этом несмотря на требуемую экономию урана, наверное, придется отказаться от переработки ОЯТ РБМК с извлечением регенерированного урана, а может быть и для ОЯТ ВВЭР с глубоким выгоранием (около 70 мВт. сут. т). В связи с удлинением технологической выдержки, необходимостью получения фракций долгоживущих нуклидов, получения вместо уран-плутониевого “америций-уран-плутониевого” топлива, отказа от извлечения регенерированного урана из топлива с низким содержанием урана-235 и т.д. необходимо совершенствование технологии водной переработки и разработка альтернативного, не водного метода регенерации ОЯТ. Необходима и разработка процессов получения топлива с минорными актинидами и поглотителей с Тс, Нр, I.



ЯДЕРНОЕ ОБЩЕСТВО РОССИИ

Сейчас вполне очевидно, что перспективы развития ЯЭ и ее ЯТЦ - только в единстве их целей и структур, при обязательном решении проблем ее отходов в приемлемое для человечества время (300-600 лет), без существенного сдвига природного равновесия, при решении национальных проблем при международном сотрудничестве, при выполнении режима нераспространения ядерных материалов.

ЯТЦ России и решение проблем отходов и радиоактивных загрязнений прошлых лет. Ядерный топливный цикл в России создавался на территории и на основе предприятий, ранее участвовавших в оборонной ядерной деятельности.

Поэтому часть его проблем - это проблемы переработки и локализации РАО прошлой оборонной деятельности, реабилитации территорий, загрязненных в результате ее, разгрузка и демонтаж промышленных и транспортных ядерных установок, а также реабилитация населения, пострадавшего от военных программ.

В табл.1 представлены данные о накопленной в различных видах отходов радиоактивности в кюри и объемах этих отходов в России и для сравнения с США, накопленных в результате военных программ (не включая ОЯТ транспортных установок).

При примерно равной общей радиоактивности качественный состав отходов труднее для локализации в России. Кроме того, нужно отметить большое количество солей в растворах ВАО при относительно малой активности в них. Это дает возможность при совместной переработке ОЯТ с прошлыми отходами подготовить их к захоронению ВАО практически без увеличения объема.

В России было составлено 18 целевых ядерно-радиационных программ, из них более половины относились к локализации отходов. Только на период 1996-2005 гг. для ликвидации отходов, реабилитации территорий и населения финансовые затраты требовались в объеме около 6 млрд. долл. США. При этом соотношение предполагаемых средств в России и США даже с учетом значительно меньшей в нашей стране зарплат было равно 1 к 50.

В планировавшейся Федеральной программе на период 1996 - 2005 гг. предусматривалось работ на 1,75 млрд. долл. США, но было выделено в 1996 г. 37% от плана, в 1997 г. - 19% от плана, а в 1998 - менее 30% от плана.

Таблица 1

Сравнение РАО оборонной промышленности в России и США (по состоянию на 1993-1995 гг.)

	Радиоактивные отходы	Активность, Ки		Объем, м ³	
		США	Россия	США	Россия
1	Высокоактивные РАО в емкостях, требуется переработка	$1 \cdot 10^9$	$0,57 \cdot 10^9$	$4 \cdot 10^5$	$2,5 \cdot 10^7$
2	Хранящиеся РАО с трансурановыми элементами	$1 \cdot 10^6$		$6 \cdot 10^7$	
3	Низкоактивные РАО в открытых водоемах и специальных бассейнах		$0,7 \cdot 10^9$		$4 \cdot 10^8$
4	Низкоактивные РАО в хранилищах и захоронениях	$4,2 \cdot 10^7$	$1,2 \cdot 10^7$	$2,7 \cdot 10^6$	
5	В подземных полостях-коллекторах		$0,8 \cdot 10^9$		$4,6 \cdot 10^7$
6	Отходы в окружающей среде	$1,6 \cdot 10^4$	$>2 \cdot 10^6$		
	ВСЕГО	$1,1 \cdot 10^9$	$1,3 \cdot 10^9$		



Разгрузка и переработка ОЯТ реакторов подводных лодок возможна только при продолжающейся помощи со стороны США, Норвегии и средств отрасли за счет проекта ВОО -НОУ. С другими работами по решению проблем прошлых лет без того, чтобы зарабатывать средства на международном рынке, отрасль и государство не справится.

Участие России в международном сотрудничестве при обращении с ОЯТ.

Анализ опыта работы заводов по оказанию услуг по переработке ОЯТ, как во Франции и Англии, так и в России, указывает на необходимость расширения комплекса таких услуг. В противном случае объем услуг будет падать, а принимаемые каждой отдельной страной решения будут не оптимальными.

Во-первых, расширение практики длительного хранения ОЯТ перед переработкой или определением их окончательной судьбы требует, чтобы и международные региональные центры могли бы обеспечивать такое хранение. Доказано и расчетами, и практикой, что масштабные проекты много выгоднее, чем малые по объему, поэтому оказание таких услуг выгодно и потребителю, и продавцу.

Во-вторых, многие АЭС не могут использовать регенерированный плутоний из своих ОЯТ, а некоторые хотели бы минимизировать возвратные ВАО и по объему, и по качеству (например, с минимизацией периода полураспада суммы нуклидов. Небольшое количество стран не имеют вообще возможности захоронения ВАО, а могут лишь обеспечить таковое для САО. С позиции нераспространения, учитывая нежелательность хранения плутония во всех имеющих АЭС странах, а также нежелательность и длительного хранения (и даже захоронения) ОЯТ, как материалов, содержащих плутоний, нужно, чтобы международные центры оказывали комплекс необходимых услуг. Законодательная международная база возможности такого комплекса заложена в Объединенной конвенции о безопасности обращения с отработавшим топливом и безопасности обращения с радиоактивными отходами в статье хі) (Вена, Австрия, 4 сентября 1998 г.)

Важно также понимание мировой общественностью, что нежелательно рассеивание мелких радиоактивных захоронений в мире, тем более рассеивание захоронений ОЯТ, ибо наиболее приемлемые и экологически надежные места для этого располагаются природой независимо от границ государств, установленных людьми. Общественность должна понять, что нужна не борьба против отраслей, а борьба вместе с отраслями за их экологическую приемлемость.

Российскому ЯТЦ повышение уровня и объема услуг для зарубежных стран не будет мешать экологическим мерам, а будет только помогать им, либо практически очень мало влияя на увеличение объема захоронений, либо не увеличивая его вовсе.

Поэтому и для отрасли Минатома России и для ее ЯТЦ борьба за экологическую приемлемость, за надежность и безопасность, а поэтому - и за экономичность, за участие на мировом рынке в международном разделении труда есть и будет главной целью их деятельности.

Поступила в редакцию 27.05.99.