

4. В режиме частичной перегрузки активной зоны при вычислении затрат на топливо вместо истинного срока службы твэлов (кампании) следует использовать более короткое время микрокампании. В результате уменьшится эффективный рост стоимости за счет ее задержки в производстве.

Учет полученных результатов должен привести к заметному снижению расчетной стоимости электроэнергии на АЭС по сравнению с тем, что дает ныне применяемая методика. Как следствие, улучшится конкурентоспособность ядерной энергетики по сравнению с обычной. Естественно, что все это справедливо, если исходить из принятого основного тезиса: стоимость продукции должна всецело и однозначно отвечать затратам труда на ее выработку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основные методические положения технико-экономических расчетов в энергетике. Государственный научно-технический комитет Совета Министров СССР. М., 1959.
2. Методика определения экономической эффективности ГЭС. М.: Госэнергоиздат, 1961.
3. Казачковский О.Д. Основы рациональной теории стоимости. М.: Энергоатомиздат, 2000.
4. Батов В.В., Корякин Ю.И. Экономика ядерной энергетики. М.: Атомиздат, 1969.
5. Макаров А.А., Волкова Е.А., Браилов В.П. Долгосрочный прогноз развития ТЭК России и место атомной энергетики в нем. Доклад на X конф. Ядерного общества России «От Первой в мире АЭС к атомной энергетике XXI века». Обнинск, июнь 1999.

Поступила в Редакцию 2.03.01

УДК 621.039.519

ЯДЕРНАЯ ИНИЦИАТИВА ПРЕЗИДЕНТА РОССИИ (ПОПЫТКА АНАЛИЗА И ДЕТАЛИЗАЦИИ)

Работнов Н.С. (Минатом), Ганев И.Х., Лопаткин А.В. (НИКИЭТ)

В выступлении президента России на саммите тысячелетия предложены инициативы по совершенствованию ядерной энергетики [1, 2] с проведением работ в рамках международной программы [3, 4]. В частности, предлагается «...исключение из использования в мирной ядерной энергетике обогащенного урана и плутония» в «...интересах кардинального повышения эффективности нераспространения ядерного оружия» [1, 2]. В этом контексте для ближайшего времени подразумевается не вообще обогащенный уран и плутоний, а высокообогащенный уран с содержанием ^{235}U 20—90% и материал, например, природный или обедненный уран с высоким (выше 20%) содержанием плутония, т.е. материалы, пригодные для использования в качестве ядерных боеприпасов.

Конечно, не предлагается сразу же исключить использование в ядерной энергетике низкообогащенного урана с содержанием 3—5% ^{235}U . Однако в будущем после исчерпания запасов дешевого природного урана двухкомпонентная ядерная энергетика, включающая, например, разрабатываемый естественно-безопасный быстрый реактор БРЕСТ-1200 [3] и ВВЭР-1000, сможет после окончания этапа развития работать только на плутонии без обогащенного урана и операции обогащения урана как таковой.

Исключить использование плутония в перспективной крупномасштабной и длительно действующей ядерной энергетике нельзя, так как он является топливом быстрых реакторов, составляющих основу такой энергетике. Быстрые реакторы питаются обедненным ураном, превращая его в продукты деления, плутоний и некоторые другие актиноиды. Масса наработанного плутония превышает массу споровшего плутония,

что позволяет быстрым реакторам с $K_B > 1$ снабжать топливом тепловые реакторы, выполняющие иные функции, например, атомное теплоснабжение, высокотемпературная энергетика.

Таким образом, слова президента об обогащенном уране и плутонии следует понимать как высокообогащенный уран в настоящее время и чистый или с высоким содержанием в обедненном уране плутоний.

Место высокообогащенного урана и чистого плутония в ядерной энергетике. Высокообогащенный уран применяется или применялся в исследовательских и транспортных реакторах. По инициативе МАГАТЭ в исследовательских реакторах в 70-х годах обогащение урана было снижено до 20%, т.е. до уровня, безопасного с точки зрения использования такого топлива для оружия. При этом нейтронно-физические показатели реакторов ухудшаются, и, возможно, для некоторых уникальных исследовательских реакторов вопрос об использовании 90%-ного урана еще будет подниматься. В транспортных реакторах нельзя обойтись без среднеобогащенного урана. Однако исследовательские и транспортные реакторы не входят непосредственно в ядерную энергетику, о которой говорил президент, и их можно считать особой точкой в данном рассмотрении, требующей собственного анализа.

Непосредственно в ядерной энергетике высокообогащенный уран не используется. Что касается чистого плутония, то он появляется на работающих в настоящее время заводах по переработке отработавшего ядерного топлива во Франции, Великобритании, России и некоторых других стран. Плутоний выделяется на технологических линиях завода по переработке, перевозится на склад переработанного топлива, хранится и далее может использоваться для изготовления свежего топлива тепловых реакторов. Такое применение плутония не является оптимальным. Лучшим вариантом является его длительное хранение и использование в будущем при развитии перспективной крупномасштабной ядерной энергетики для начальных загрузок быстрых реакторов.

Другим видом является плутоний, выделяемый из оружия и хранящийся на складах России и США. Этот материал наименее активен и наиболее опасен с точки зрения хищения.

Пути исключения чистого плутония или материалов с высоким содержанием плутония. Выделение, перевозки и длительное хранение плутония опасны с точки зрения хищения в целях изготовления оружия. Имеет смысл изменить технологию переработки облученного топлива. Перед переработкой необходимо знать подробности дальнейшего использования основных материалов переработки — урана и плутония. Имеются три основные возможности их использования — в качестве топлива начальной загрузки, подпитки тепловых реакторов или топлива начальной загрузки быстрых. Все эти варианты представляют собой смесь ^{238}U в виде обедненного или природного урана с плутонием, причем содержание плутония близко к 3—5% в тепловых и 10% в быстрых реакторах.

Как можно получить эти продукты из облученного топлива в настоящее время? Выделенные при переработке чистые уран и плутоний хранятся до появления потребности в топливе, затем смешиваются в нужной пропорции. Что может следовать из слов президента? Отработавшее топливо следует хранить без переработки до появления конкретной потребности в свежем топливе. Затем в процессе переработки изготавливать нужную смесь урана и плутония. Для этого из очищенной от продуктов деления смеси урана с небольшим количеством плутония, характерным для отработавшего топлива тепловых легководных реакторов (регенерата), следует химическими методами постепенно отводить уран до получения нужного состава смеси. Ограничение технологического процесса можно связать с участком, где приближение к заданному уровню подкритичности будет вызывать оповещение и остановку процесса.

Если владелец отработавшего топлива не знает, где будут применяться продукты переработки, то он должен либо хранить отработавшее топливо без переработки, либо ему может быть выдан ядерно безопасный полуфабрикат, состоящий в основном из ^{238}U и $\sim 10\%$ делящегося плутония. Из этого полуфабриката при появлении потребности можно изготовить нужный вид топлива путем разбавления ^{238}U и снижения содержания делящегося $^{239,241}\text{Pu}$ до $< 10\%$. Если чистый плутоний уже есть и хранится на складе, его можно денатурировать путем смешения с ^{238}U и доведения содержания плутония до $10\text{--}15\%$, т.е. переводом в материал, который нельзя использовать для создания оружия без дополнительных технологических операций. Чистый плутоний может быть оружейным ($95\% \text{ } ^{239}\text{Pu}$ и $5\% \text{ } ^{240}\text{Pu}$) или энергетическим, содержащим помимо ^{239}Pu ($60\text{--}70\%$) другие изотопы плутония. Оружейный плутоний также следует денатурировать смешением с ^{238}U и хранить до использования, например, в качестве начальных загрузок будущих быстрых реакторов. Заметим, что критическая масса, необходимая для взрыва, по мере уменьшения содержания плутония в ^{238}U устремляется к бесконечности, что делает невозможным военное использование хранящегося в разбавленном виде оружейного плутония.

Исключение операций по получению чистого плутония при работе крупномасштабной ядерной энергетики с быстрыми и питаемыми ими тепловыми реакторами. Если коэффициент воспроизводства делящегося плутония в активной зоне быстрого реактора меньше единицы, то необходимо смешать регенерат урана и плутония активной зоны и боковой зоны воспроизводства, затем химическими методами отвести уран (^{238}U) до повышения обогащения по плутонию до нужного в активной зоне уровня. Отведенный уран станет свежим топливом боковой зоны воспроизводства, полученный регенерат — свежим топливом активной зоны.

Если необходимо перевести в топливо теплового реактора, работающего, например, в ториевом цикле, ^{233}U из ториевой торцевой зоны воспроизводства быстрого реактора, то можно смешать эти регенераты и химическим путем отвести нужное количество тория. Торий станет свежим топливом торцевой зоны воспроизводства, полученный регенерат — свежим топливом теплового реактора.

«Окончательное решение проблемы радиоактивных отходов» [1]. Поясним слова президента следующими рассуждениями. В перспективной крупномасштабной ядерной энергетике необходимо модифицировать добычу урана, ввести трансмутационный замкнутый топливный цикл и улучшить упаковку (матрицу и оболочку) наиболее опасных нуклидов из числа отходов перед их окончательным захоронением.

Добычу урана следовало бы в будущем проводить без разрушения подстилающих пород, на которых размещено месторождение, без его обводнения и с рекультивацией, необходимой для размещения отходов ядерного топливного цикла. Таким образом, отходы будут размещаться в естественном радиоактивном месте, созданном природой.

Радиоактивность отходов следует приблизить к такой же по вредному воздействию на человека активности извлеченного природного урана за счет введения замкнутого трансмутационного топливного цикла. При этом ядерная энергетика в определенном смысле становится безотходной.

Замкнутый цикл необходим для длительного действия крупномасштабной ядерной энергетики. Если считать, что в недрах России есть 300 тыс. т доступного по стоимости природного урана, то для энергетики в 300 ГВт при расходе 200 т урана на $1 \text{ ГВт} \cdot \text{год}$ этого урана хватит на 5 лет. При этом в открытом цикле сжигается $0,5\%$ природного урана. В замкнутом цикле в первом приближении можно считать, что сжигается 100% природного урана, т.е. в 200 раз больше, и время действия энергетики повышается до 1000 лет.

Простой замкнутый цикл, где из отработавшего топлива выделяется только уран и плутоний, необходимо развить до трансмутационного [5], в котором вместе с природным ураном извлекают и разрушают (трансмутруют) ^{226}Ra и ^{230}Th , трансмутируют путем рециклирования Pu, Am и Cm (последний после выдержки 100 лет), извлекают для полезного использования или хранения Sr, Cs и Np и для трансмутации I и Tc, проводят длительную (200 лет) контролируемую выдержку отходов и их упаковку перед окончательным захоронением. В трансмутационном цикле можно добиться выполнения радиационного баланса эквивалентной активности отходов (или их потенциальной биологической опасности) и сырья — природного урана, тогда как в открытом цикле при приемлемом времени выдержки нельзя.

Итак, окончательное решение проблемы долгоживущих компонентов высокоактивных отходов состоит в снижении их активности за счет применения операций трансмутационного ядерного топливного цикла и окончательного размещения в сохраненных при добыче урана структурах рекультивированных урановых рудников, т.е. в естественном радиоактивном природном месте с соблюдением баланса активности отходов и сырья.

Концепция вводит в ядерную энергетику:

более высокий уровень безопасности (исключение аварий, требующих эвакуации населения);

новую технологию обращения с ядерными и радиоактивными материалами для решения проблем экологии (достижение радиационной эквивалентности отходов и сырьевых материалов);

техническое решение нераспространения делящихся материалов (исключение выделения в чистом виде плутония, $^{233,235}\text{U}$);

приемлемый уровень экономичности (стоимость реакторов нового поколения не должна превышать стоимость современных LWR).

Не исключается и окончательное захоронение отходов после их длительной контролируемой выдержки в глубинных геологических хранилищах.

Перечисленные решения и мероприятия, включая разработку естественно-безопасного быстрого реактора, могут быть дополнительно и более основательно проработаны в международной программе МАГАТЭ, в качестве основы которой предлагается принять проект [3].

В целом реализация этих задач решит проблему длительного и безопасного энергообеспечения за счет атомной энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Выступление Президента РФ В.В. Путина на саммите тысячелетия. Нью-Йорк, ООН, сентябрь 2000.
2. Пресс-релиз «Инициатива Президента РФ по энергетическому обеспечению устойчивого развития человечества, кардинальному решению проблем нераспространения ядерного оружия и экологическому оздоровлению планеты Земля». Нью-Йорк, ООН, сентябрь 2000.
3. Terms of Reference for the International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles. Vienna: IAEA, Oct. 2000.
4. Baradei M. El. Statement to the Forty-Fourth Regular Session of the IAEA General Conference. Vienna: IAEA, 18 Sept. 2000.
5. Адамов Е.О., Ганев И.Х., Лопаткин А.В. и др. Трансмутационный топливный цикл в крупномасштабной ядерной энергетике России. М., НИКИЭТ, 1999.