

## КОРРОДИРУЮЩЕЕ ТОПЛИВО СЕВЕРНОЙ КОРЕИ

Дэвид Олбрайт

Недавно из северокорейского реактора тепловой мощностью 25 МВт было выгружено примерно 8000 стержней облученного или "отработанного" топлива. В условиях бассейнов отработанного топлива вблизи реактора безопасное хранение этих стержней затруднено. Магнийевый сплав покрытия этих стержней корродирует. Если при коррозии в оболочке появятся отаерстия, то радионуклиды могут выйти наружу. Кроме того, может начаться коррозия урана под оболочкой, которая может сопровождаться образованием гидрида урана, способного самопроизвольно воспламениться на воздухе.

Если не будут улучшены условия хранения, то КНДР может использовать риск коррозии как аргумент для переработки топлива и нарушения своего обещания США заморозить свою ядерную программу в июне 1994 года. Однако, КНДР может предпринять некоторые меры по значительному снижению скорости коррозии. При использовании известных методов можно продлить время безопасного хранения до месяцев или даже до лет.

Автор работает в Институте по научной и международной безопасности, Вашингтон, О.К.

### ВВЕДЕНИЕ

США и другие западные правительства настаивали на том, чтобы КНДР не перерабатывала облученное топливо из своего небольшого газо-графитового реактора. США хотели бы, чтобы КНДР направила свое топливо в другую страну для хранения или переработки. Поскольку этот вид топлива трудно хранить безопасно, КНДР может посчитать сложным отказаться от переработки, даже если она не захочет выделять плутоний. Переработка этих стержней нарушит обещание Северной Корее от июня 1994 года о замораживании ядерной программы.

Стержни облученного или отработанного топлива "Маянок", выгруженные из северокорейского реактора с электрической мощностью 5 МВт летом 1994 года не могут безопасно храниться в течение длительного времени в текущих условиях в бассейнах около реактора. Покрытие металлических урановых стержней из магниевого сплава корродирует и радионуклиды могут выйти из уранового топлива в окружающую среду. Кроме того, может корродировать и само урановое топливо. При некоторых условиях металлический уран может самопроизвольно самовозгораться при контакте с воздухом, что может привести к серьезной радиационной аварии.

Представляется, что до сих пор КНДР предпринимала мало усилий для того, чтобы замедлить коррозию покрытия топлива, или даже для достаточной очистки воды в бассейне для визуальной инспекции топлива с целью проверки коррозии покрытия. США и другие западные правительства предлагали КНДР помощь для замедления коррозии покрытия. Западная помощь может позволить продлить срок безопасного хранения в бассейнах на много месяцев или даже на несколько лет, но работы должны начаться быстро.

Из западного опыта известно, что при оптимальных условиях хранения в воде топливо типа, используемого в КНДР, может храниться в бассейнах отработанного топлива сроком до двух лет. Хранение сроком до пяти лет возможно при использовании специальных контейнеров, помещаемых в бассейны для отработанного топлива. Поскольку в КНДР топливо хранится в плохих условиях, начиная с мая-июня 1994 года, столь длительное хранение этого топлива может оказаться невозможным, даже если начать его немедленную очистку. Но пока возможно продлить срок хранения до одного года, или даже до нескольких лет (при использовании специальных контейнеров).

С конца сентября 1994 года КНДР отвергает любую западную помощь, утверждая, что она может справиться с ситуацией самостоятельно. Несмотря на то, что до сих пор существенной деградации покрытия не обнаружено, кажется, что КНДР не применяет совокупности методов, необходимых для обе-

спечения безопасного длительного хранения.

Хотя топливо, находящееся в бассейнах, может быть высушено и помещено в сухие хранилища, этот метод сложен, длителен и непроверен. Безопасная реализация этого метода может оказаться также за пределами возможностей северокорейских специалистов без существенной западной помощи.

В КНДР есть небольшая площадка сухого хранения для поврежденных топливных элементов, но она не обслуживается адекватным образом для предотвращения продолжающейся коррозии и возможности серьезного пожара. В хорошо обслуживаемых сухих хранилищах отработанное топливо, никогда не находившееся в воде, может храниться в течение десяти или более лет без заметной коррозии или риска загорания.

### СИТУАЦИЯ В СЕВЕРНОЙ КОРЕЕ

В мае и июне 1994 года КНДР выгрузила около 8 000 стержней отработанного топлива (около 50 тонн) из реактора с электрической мощностью 5 МВт. Топливный стержень представляет собой цилиндр из природного металлического урана, помещенный в оболочку из магниевого сплава с примесью циркония. Длина каждого стержня около 50 см, а диаметр (с оболочкой) около 3,0 см. На стержне крепятся направляющие, кольца и другие детали для установки стержня в топливном канале реактора.

Согласно западным экспертам, после выгрузки операторы реактора поместили 8 000 стержней примерно в 200 металлических корзин, примерно по сорок в каждую. Каждая корзина была помещена в бетонный контейнер и перемещена по рельсам 50-метрового туннеля из реакторного зала в здание бассейнов отработанного топлива. В этом здании находятся помещение проверки, два соединенных бассейна отработанного топлива и сухое хранилище.

В помещении проверки операторы осматривают топливные стержни каждой корзины, чтобы определить повреждения. Если повреждений не видно, то корзина перемещается краном в один из двух соединенных бассейнов глубиной около 7,5 метров. Поскольку повреждено немного стержней, почти все топливо было помещено в бассейны (корзины располагались одна над другой в три ряда).

Если стержень казался поврежденным, то вся корзина направлялась в сухое хранилище. Всего туда было направлено около 300 стержней для хранения рядом с другими поврежденными 300 стержнями, извлеченными из реактора между 1989 годом и последней выгрузкой.

Полагают, что процедуры визуального осмотра не способны выявить все поврежденные стержни, и поэтому некоторая часть направленного в бассейн

топлива может оказаться поврежденной и подверженной ускоренной коррозии.

#### Бассейны отработанного топлива

Кажется, что перед отправкой топлива на переработку в КНДР его выдерживали несколько месяцев для распада короткоживущих элементов, таких, как иод-131. Однако, текущие условия в топливном бассейне не способствуют продолжительному безопасному хранению, и КНДР предпринимало немного технических усилий для замедления коррозии.

Реальная скорость коррозии топлива в бассейнах неизвестна. МАГАТЭ сообщало, что инспекторы видели, что вода часто кажется непрозрачной и грязной, и что в бассейнах нет адекватной системы очистки или фильтрации. Опубликованная МАГАТЭ в 1992 году видеозапись показывает, что бассейны отработанного топлива позеленели от водорослей.

Более важно, сообщило МАГАТЭ, что в КНДР не проводится детального химического анализа воды в бассейнах. Они не контролируют уровни некоторых примесей, в особенности, хлоридов и сульфатов, которые могут значительно ускорить коррозию покрытия. Если содержание этих примесей в воде повышено, то возможна значительная коррозия покрытия в течение нескольких месяцев. Для уменьшения содержания этих примесей в западных бассейнах отработанного топлива "Магнок" применяется дистиллированная вода.

#### Площадки сухого хранения

Сухое хранилище также несовершенно, в особенности, если учесть, что оно расположено слишком близко к бассейнам, и что в нем хранятся поврежденные стержни. Представитель МАГАТЭ описал его как "сырое". Во влажном воздухе может происходить коррозия как покрытия, так и самого топлива из металлического урана. Иногда коррозия металлического урана может привести к самопроизвольному возгоранию при комнатной температуре, в особенности, если кто-нибудь прикаснется к нему. Кроме того, гамма-излучение отработанного топлива в сухом хранилище представляет опасность для всех, кто находится вблизи бассейна, затрудняя инспекции и очистку бассейнов.

#### РИСК КОРРОЗИИ

И магний, и уран подвержены коррозии при контакте с водой или влажным воздухом<sup>1</sup>. Коррозия может привести к утечке большого количества радиоактивных материалов в бассейны и, после этого, в воздух или в ближайшие грунтовые воды. Первичная реакция - это окисление с участием воды и последующим выделением водорода. Избыточный водород может реагировать с металлическим ураном, образуя гидрид урана, коричнево-черный или коричнево-серый порошок, самовозгорающийся на воздухе при комнатной температуре.

#### Коррозия покрытия

Два основных вида коррозии покрытия из магниевых сплавов - это общая поверхностная коррозия и локальная коррозия ("пятнами"). В северокорейской ситуации большие опасения вызывает локальная коррозия, из-за того, что возможное присутствие примесей в воде может значительно ускорить коррозию этого типа по сравнению с общей коррозией.

Общая коррозия зависит от температуры и величины pH воды в бассейне. В идеальном случае вода должна охлаждаться примерно до 15 °C и обладать щелочной реакцией с pH = 11,5 - 12. Сообщают, однако, что вода в бассейнах КНДР этим

летом нагревалась до 30 °C, а значение pH было близко к 11.

Локальная коррозия начинается в трещинах, задирах или царапинах покрытия. Неосторожное обращение с отработанным топливом во время выгрузки может породить много затравочных точек для начала локальной коррозии, которая может ускориться из-за присутствия хлоридов или сульфатов в воде, или отложенный углерода в топливе.

После того, как коррозия разъест покрытие насквозь, растворимые радиоактивные элементы могут выходить из топлива, диффундировать в воде бассейна и мигрировать на поверхность. Наибольшую непосредственную опасность представляет цезий-137, испускающий проникающее гамма-излучение, представляющее опасность для любого, кто находится около бассейна.

#### Коррозия урана и образование гидрида

При контакте с водой металлический уран реагирует с ней с образованием окислов урана и водорода. Хотя можно было бы ожидать, что слой окислов урана закроет металл и предотвратит дальнейшую коррозию, основной образующийся окисел - двуокись урана - не может служить защитным слоем. По мере утолщения слоя окисла он отваливается и открывает свежий металл для дальнейшей коррозии.

Водород, образующийся при окислении (или каким-либо другим способом) взаимодействует с металлом с образованием гидрида урана. Нередко порошок гидрида покрывается слоем окисла, что предотвращает его самовозгорание. Однако при нарушении слоя окисла, что может случиться при обращении с топливом, гидрид может тлеть или вспыхивать, что может привести к загоранию металлического урана и к выбросу радиоактивности на отработанного топлива.

Условиями, способствующими высокой концентрации гидрида урана, являются высокая относительная влажность, отсутствие свободного кислорода и высокая концентрация водорода. Такие условия могут возникнуть внутри поврежденного уранового стержня в бассейне отработанного топлива, где вода может проникнуть в небольшое отверстие в покрытии, а водород, образующийся при окислении урана, не сможет эффективно диффундировать через покрытие наружу.

#### ВЫИГРЫШ ВРЕМЕНИ: ЗАМЕДЛЕНИЕ КОРРОЗИИ ОТРАБОТАННОГО ТОПЛИВА

Учитывая условия в северокорейском хранилище, основной задачей Запада следует считать достижение безопасного хранения отработанного топлива в бассейнах и сухом хранилище в течение многих месяцев или даже лет. Методы достижения такой цели были проверены в Великобритании и Франции, имеющими обширный опыт хранения своего топлива в магниевых оболочках.

#### Бассейны отработанного топлива

Контроль за коррозией оболочек требует строгого и непрерывного наблюдения за состоянием воды в бассейнах. Даже сравнительно небольшие отклонения от рекомендуемых условий могут привести к значительному ускорению коррозии. К счастью, организация таких наблюдений может быть осуществлена быстро.

*Улучшение химических свойств воды.* Продолжительность хранения топлива в бассейнах может быть увеличена на несколько месяцев очисткой воды, повышением уровня pH и понижением концентрации некоторых ионов, в особенности, хлоридов и сульфатов. Поскольку топливо уже хранилось

в течение нескольких месяцев, чтобы эти действия были эффективными, их надо провести так быстро, как это возможно.

Согласно последним западным исследованиям, следующие шаги могут удешевить продолжительность хранения топлива на несколько месяцев, или, может быть, на год:

1) Применять в бассейне только дистиллированную воду для улучшения прозрачности и уменьшения концентрации примесей. Концентрация ионов хлора не должна превышать 0,5 грамма на кубометр, концентрация сульфатов не должна превышать 0,2 грамма на кубометр, а концентрация карбонатов не должна превышать 3 килограммов на кубометр. Дистиллированная вода должна непрерывно заменяться (не менее, чем 10 процентов в день) для поддержки чистоты воды и поддержания концентрации примесей в указанных пределах.

2) Поднять уровень pH примерно до 11,5 и поддерживать его добавлением чистого едкого натра.

3) Регулярно измерять и фиксировать уровень pH, концентрации ионов хлоридов и сульфатов и других примесей.

4) Поддерживать температуру воды на уровне 15 °C при помощи передвижных охладителей для улучшения чистоты воды, задержки роста водорослей и уменьшения скорости коррозии магния.

5) Если возможно, удалить слой продуктов коррозии топлива "Магнокс", который мог осесть на дне бассейна.

*Специальные контейнеры для топлива "Магнокс".* Скорость коррозии может быть дополнительно уменьшена (с увеличением длительности хранения до 5 лет) повышением уровня pH вокруг топлива до 13 и поддержанием концентрации сульфидов и хлоридов на уровне менее 0,5 грамма на кубометр. Однако, такой уровень pH не может быть достигнут в открытом бассейне из-за того, что поглощение углекислоты из воздуха будет снижать его.

Для решения этой задачи в Великобритании был разработан "Контейнер топлива Магнокс", который позволяет поддерживать вокруг топлива в контейнере уровень pH, равный 13, при загрузке его в бассейн отработанного топлива. Контейнер изолирует воду от бассейна при помощи газовой пробки и клапана предохранительного клапана, который предназначен для снижения концентрации образующегося при остаточной коррозии покрытия или урана водорода до приемлемого уровня.

Газовая пробка над водой сначала заполняется азотом, который со временем заменяется водородом от продолжающейся коррозии (активности). Кроме того, к водороду медленно присоединяется кислород, диффундирующий из воды. Опыт эксплуатации в Великобритании показывает, что газовая пробка может сохраняться, не рассасываясь, до пяти лет.

Масса каждого контейнера составляет около 5 тонн и в нем может храниться до нескольких сотен топливных стержней (точное количество зависит от внешних элементов конструкции стержня). Контейнеры могут устанавливаться в бассейне один над другим до трех штук в ряд. Недостатком является сложность конструкции и необходимость специального оборудования для создания газовой пробки и помещения контейнера в бассейн.

*Радиоактивная очистка.* Запад может поставить в КНДР портативное оборудование для дезактивации радиоактивного загрязнения воды (в частности, цезием). Это уменьшит облучение персонала и инспекторов, понизит вероятность загрязнения окружающей среды и предотвратит крупномасштабное загрязнение бассейна отработанного топлива и его оборудования.

#### Площадки сухого хранения

Несмотря на то, что в этом хранилище находится

немного стержней, оно представляет значительную пожароопасность корродировавшего или поврежденного топлива. Некоторые из предложенных западными экспертами вариантов включают просушку воздуха, или затопление хранилища, превращающего его еще в один бассейн.

#### РАСПОРЯЖЕНИЕ ОТРАБОТАННЫМ ТОПЛИВОМ

Основным вариантом долговременного распоряжения отработанным топливом является его переработка, предпочтительно не в КНДР. Другой вариант предусматривает перенос неповрежденного топлива в сухое хранилище после просушки хранившегося в воде топлива. Этот вариант, однако, никогда не был проверен.

#### Перевозка на переработку за границы

Американские и английские представители заявили, что топливо должно быть вывезено из КНДР в течение шести - девяти месяцев. Безопасных транспортных контейнеров для таких перевозок много, даже поблизости. Например, Япония в течение многих лет перевозит ядерное топливо похожего типа из своего газо-графитового реактора в Токаи на перерабатывающий завод в Великобритании.

В Англии изготавливается контейнер весом около 60 тонн, заполненный водой с pH более 11,5, а вес французского контейнера составляет примерно 50 тонн. В каждом таком контейнере можно разместить до пяти тонн неповрежденного топлива, но, возможно в них нельзя будет разместить такое же количество северокорейского топлива. Потенциально топливо может быть переработано в Великобритании, Франции, России и Китае. Что делать с разделенным плутонием и отходами, пока неясно.

Сообщают, что грузоподъемность крана над бассейнами отработанного топлива в Йойбене составляет всего 36 тонн. Можно либо установить новый кран, либо использовать более легкие контейнеры.

До перевозки надо будет проверить топливо, чтобы выявить поврежденные стержни, поскольку в контейнере не может находиться слишком много поврежденных стержней, способных сильно заразить воду в контейнере. В любом случае необходимо принять меры, необходимые для предотвращения контакта поврежденных стержней с воздухом.

#### Переход от влажного к сухому хранению

Другой способ заключается в выгрузке сырого отработанного топлива из бассейна, просушке его и помещении в хранилище с сухим воздухом. В Великобритании было показано, что хранение топлива с магниевым покрытием в сухом воздухе безопасно и задерживает потребность в переработке на много лет, и, возможно, десятилетий. Однако, такой подход применялся только для топлива, которое никогда не находилось в воде.

Из-за преимуществ сухого хранения Великобритания изучала процесс сушки топлива, хранившегося в бассейнах, и помещения его в сухие хранилища с 1978 года. Изучение этого процесса в британской атомной промышленности с британским топливом "Магнокс" позволило сделать вывод, что переход от влажного к сухому хранению возможен, но труден и дорог. Это исследование рекомендовало такую процедуру только при абсолютной необходимости.

В этом исследовании были выявлены несколько проблем просушки топлива с нетронутым покрытием и его перехода на сухое хранение. Однако топливо с поврежденным покрытием сушить труднее, поскольку вода может проникать через малые отверстия покрытия и образовывать гидрид урана.

1. Обзор проблем коррозии магниевой оболочки сухого топлива - SSEB Experience and Research", in "Appendix 2: The Storage of Mag-  
 The SSEB (Central Electricity Generating Board)

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

КНДР во всех пор не предпринимала шагов по уве-  
 личению длительности хранения своего топлива или  
 перемещения топлива в другую страну. Взагодари  
 техническим обсуждением между КНДР и США,  
 специалистами Северной Кореи знакомы с методами  
 длительного и безопасного хранения. На конец сен-  
 тября 1994 года было неясно, предпринимает ли  
 КНДР такие действия.

ВЫВОДЫ

И-за того, что во время инспекции топлива  
 можно пропустить некоторые поврежденные стрж-  
 ни, рекомендуется одинаково обрабатывать все эле-  
 менты. В исследовании подчеркивается, что необ-  
 ходимо индивидуальное прослушивать каждый эле-  
 мент при повышенной температуре в тигельном  
 подогретой сушильной трубе в специально разра-  
 ботанной установке. Нагретый воздух будет также  
 окислять гирнда урана в топливе, что необходимо  
 для безопасного хранения. Воздух, однако, может не  
 достигать гирнда урана под оболочкой, пос-  
 кольку водород может мигрировать на большое рас-  
 стояние до образования гирнда. И-за этого с топ-  
 ливом надо обращаться осторожно, чтобы не разо-  
 мять его и не допустить контакта гирнда урана с  
 воздухом.  
 Если гирнда урана случайно подвергнется топ-  
 ливу во время сушки, то пламя будет локализовано  
 и замкнутым пространством с ограниченным количе-  
 ством воздуха, так что пожар останется.

1. SSEB (South of Scotland Electricity Board) Res-  
 ponse to Recommendation 17 in the Environment  
 Committee's Report on Radioactive Waste, No-  
 vember 1986. Cm. также глава 7 об уране в C.R.  
 Tipson (ed.), "Reactor Handbook, Volume 1: Ma-  
 terials", New York, Interscience Publishers, Inc.,  
 1960.  
 2. A.H. Speller, E.O. Maxwell, R.J. Pearce, "The  
 Long-Term Dry Storage of Irradiated Magnox  
 Fuel", in Proceedings of BNES Conference on Gas-  
 cooled Reactors Today, Bristol, Britain, Septem-  
 ber 1982, vol. 4, pp. 25 - 30. Воздух предостри-  
 тельнее других инертных газов, потому что ско-  
 рость коррозии магния и урана в воздухе доны-  
 стимо мала, а сырой воздух - более подходящий  
 среда для податливая гирнда урана, чем сырой  
 азот или аргон, два обычных инертных газа.  
 Кислород воздуха ингибирует образование гир-  
 нда урана.  
 3. Cm., например, "The SSEB (Central Electricity  
 Generating Board) / SSEB (South of Scotland El-  
 ectricity Board) Response to Recommendation 17  
 in the Environment Committee's Report on Ra-  
 dioactive Waste", Volume 1, November 1986.  
 Комиссия британского парламента по окружа-  
 ющей среде получила производителям актри-  
 цества на атомных электростанциях исследо-  
 вать возможность только сухого хранения топ-  
 лива "Магнокс" по его геологического захоро-  
 нения без переработки. Эта оценка включает  
 получение процесса сушки топлива "Магнокс".  
 Ранее находившаяся в охлажденном бассейне.  
 Там же, стр. 17, и National Nuclear Corporation,  
 "Dry Storage of Magnox Fuel: A Design Concept  
 Document", report No. C6996/DGD/001, Issue B,  
 Risley, Warrington, Cheshire, National Nuclear  
 Corporation, September 1986.

4.

3.

2.