

Новые направления в развитии ядерной энергетики

Ж. Тавернье*

На Третьей европейской ядерной конференции, состоявшейся в Брюсселе 26–30 апреля с.г., выявились существенные различия в подходе стран Северной Америки, Европы и Японии к конечному этапу ядерного топливного цикла. Около тысячи специалистов атомной промышленности из 25 стран присутствовали на конференции, посвященной новым тенденциям в развитии ядерной энергетики и прежде всего ядерного топливного цикла.

Различия в подходе к вопросу о топливном цикле обуславливаются тем фактом, что Северная Америка располагает значительными собственными энергетическими ресурсами, в то время как Западная Европа и Япония их почти не имеют. Этим объясняется политическая позиция США в отношении к разработке быстрых реакторов. Однако представители США изложили на конференции широкий план ввода в эксплуатацию таких реакторов до 2000–2010 гг. (включая завершение строительства быстрого реактора в Клинт Ривере). В Канаде стратегические исследования также привели к выводу, что усовершенствованный топливный цикл не может стать экономически выгодным раньше 2010 г. Западная Европа уже приступила к строительству промышленных установок по переработке и хранению отходов, в то время как Северная Америка находится еще на стадии подготовительных работ.

На конференции отмечалось, что имеется положительный опыт эксплуатации атомных электростанций во всех 23 странах, имеющих программы по ядерной энергетике. Однако статистика по коэффициенту использования и эксплуатационным расходам показывает, что можно сократить время простоя при перегрузке и время на ремонт и проверку, а также усовершенствовать оборудование и работу оператора. После аварии на Три Майл Айленд в США был создан Институт операций по ядерной энергетике (INPO) для разработки более совершенных норм эксплуатации атомной электростанции. Владельцы атомных электростанций всех заинтересованных стран могут присоединиться к работам этого института и установить тем самым взаимный обмен информацией по опыту эксплуатации, включая аварии и аварийные ситуации.

* Г-н Тавернье был председателем Третьей европейской ядерной конференции, пятой из серии конференций, совместно проводимых Американским ядерным обществом и Европейским ядерным обществом. Он — административный Генеральный директор фирмы Belgonucleaire, rue du Champ de Mars 25, B-1050 Brussels, Belgium.

На этапе обращения с отработавшим топливом имеются два пути: постоянное хранение или переработка, возможно, после временного хранения. На конференции было показано, что технически осуществимы оба пути, и потому политика в этой области должна определяться на основе факторов сравнительной экономики и сохранения энергии. Если выбирается переработка, то извлекаемый плутоний лучше использовать в реакторах-размножителях. Так как завод на мысе Аг работает надежно и запланировано строительство других заводов по переработке облученного топлива, то, по-видимому, до того времени, когда быстрые реакторы будут пущены в коммерческую эксплуатацию, появятся излишки плутония. Это приведет к повторному использованию плутония в водяных реакторах.

Быстрый реактор, который, как предполагается, должен удовлетворять значительную часть наших будущих потребностей в энергии, демонстрируется в настоящее время в нескольких странах. Во всех случаях используются одни и те же основные решения: натриевый теплоноситель, окисное топливо и тот же, что и для легководных реакторов, метод переработки. Если единственным критерием считать конкурентоспособность, то до 2000 г. быстрые реакторы не найдут промышленного применения. Но, по мнению участников конференции, следует брать в расчет не только экономические критерии; в некоторых промышленно развитых европейских странах разработка коммерческого реактора не может более откладываться из-за стремлений к энергетической независимости и опасений по поводу возможной нехватки дешевого урана. Время, необходимое для коммерческого внедрения быстрого реактора, составляет примерно 25 лет, что приблизительно соответствует тому времени, в течение которого будут исчерпаны запасы урана. В настоящее время усилия должны быть сконцентрированы на повышении конкурентоспособности быстрых реакторов. Для этого необходимо развивать международное сотрудничество.

Использование ядерной энергии — одно из разумных решений проблемы энергообеспечения для большинства промышленно развитых стран. Однако развитие ядерной энергетики требует широкого признания ее общественностью. Конференция пришла к выводу, что необходима разработка согласованного минимума норм и что следует избегать ненужного дублирования и излишних мер по безопасности. Как и в прошлом, надежность станции и безо-

пасность населения должны обеспечиваться при разумных затратах путем соблюдения надлежащих норм. По соображениям нераспространения ядерного оружия ядерная деятельность во всем мире должна находиться под контролем МАГАТЭ; необходимо укрепить Агентство специалистами, совершенствовать его инспекционное оборудование и увеличивать бюджет.

Обеспечение топливом и его производство

В результате сокращения числа вводимых в эксплуатацию атомных электростанций увеличились запасы природного и обогащенного урана. С этим положением, которое сохранится и после 1990 г., отчасти связано продолжающееся застойное состояние уранового рынка. Аналогичное положение может возникнуть и на рынке услуг по обогащению урана, если электроэнергетические предприятия попытаются продавать свои излишки. В 90-е годы предполагается начать коммерческое использование новых методов изотопного разделения, таких как возбуждение лазером и применение урановой плазмы. В этом плане метод центрифужного обогащения, используемый в настоящее время в США, может рассматриваться как временное решение.

По мнению участников конференции, особый интерес представляет производство плутониевого топлива для легководных реакторов в связи с тем, что в течение последующих лет накопятся значительные количества плутония в ряде европейских стран в результате переработки отработавшего топлива. Из представленных докладов видно, что приобретенный этими государствами, и прежде всего Бельгией и ФРГ, опыт показывает возможность производства топливных элементов из плутония в промышленном масштабе; в настоящее время общая стоимость плутониевых топливных сборок примерно такая же, как и топливных сборок из обогащенного урана. Исходным материалом могут служить порошковые окисные смеси U-Pu. В ФРГ такие смеси получают путем кальцинирования промежуточного продукта. U-Pu получают путем осаждения карбонатов из нитратов урана и плутония. Этот процесс, уже используемый в производстве топлива из обогащенного урана, имеет следующие преимущества: топливо полностью растворяется в азотной кислоте на первой стадии переработки, и при производстве таблеток возникает значительно меньше пыли. Другие процессы находятся еще в стадии разработки, например, метод гелеобразования для производства микросфер из оксидов урана и плутония, о котором сообщили докладчики из Швейцарии и Бельгии. Значительный опыт приобретен в производстве топливных элементов для быстрых реакторов.

Использование активной зоны

Существующая практика использования топлива направлена на продление рабочего цикла и усовершенствование схем, регулирующих положение топливных элементов, для достижения более высокой степени выгорания. Эти тенденции вызваны необхо-

димостью обеспечить наилучшее использование урановых запасов и стремлением сократить стоимость производства электроэнергии. При этом ожидается также замещение частоты извлечения топлива из реакторов для временного хранения, что позволит уравновесить недостаток мощностей по переработке, который будет чувствоваться на протяжении следующего десятилетия.

По-видимому, эти цели будут достигнуты, т.к. целостность топливных стержней легководных реакторов находится на уровне 99,9 %, а данные показывают на приемлемость увеличенной степени выгорания выгружаемого топлива. Помимо того, что улучшились рабочие характеристики топлива, повысилась надежность компонентов активной зоны в результате усовершенствования технической оснастки топливных сборок и регулирующих стержней.

Теперь общепризнано, что топливные сборки и регулирующие стержни относятся к числу наиболее надежных компонентов современных атомных электростанций и что возможно повышение степени выгорания (в среднем до 40 МВт·день/кг).

Увеличение продолжительности рабочего цикла предполагает использование выгорающих поглотителей. На конференции было показано состояние дел в этой области. Уже используемым в кипящем реакторе выгорающим поглотителем является гадолиний в виде CO_2O_3 в смеси с ураном. На коммерческих реакторах с водой под давлением выгорающие поглотители (пирексовые стержни) используются пока только в первом цикле; экономическая оптимизация не проводилась. Значительные усилия прилагаются в настоящее время для определения новых выгорающих поглотителей для реакторов с водой под давлением, включая гадолиний и B_4C . Достигнуты успехи в использовании гадолиния: в нескольких докладах описывались работы по облучению в энергетических реакторах стержней, содержащих гадолиний. Собрано много экспериментальных данных, в процессе проверки находятся методы расчета. В недалеком будущем предполагается использовать гадолиний в повторных загрузках реакторов с водой под давлением. Выгорающие поглотители значительно усовершенствованы благодаря использованию стержней с $\text{B}_4\text{C} - \text{Al}_2\text{O}_3$ и циркаловым покрытием.

Существуют и другие тенденции. К ним относится использование аксиальных зон воспроизводства из смеси природного урана и его окиси (10–15 см толщиной), помещаемых на обоих концах топливной сборки и имеющих целью уменьшить потребности в разделительной работе и тем самым сократить расходы по топливному циклу. Прототипы узлов топливных сборок с аксиальными зонами воспроизводства подвергаются в настоящее время облучению на энергетических установках США.

В некоторых докладах указывались рабочие характеристики топлива для реакторов-размножителей (в основном для французских реакторов „Рассолин” и „Феникс”): в „Рассолин” были облучены 30 000 стержней с выгоранием до 25 %, в „Фениксе” — более 100 000 стержней (около 6 % из них —

Перерабатывающий завод в Ла-Хагуа, Франция. Хотя плутоний, извлекаемый в процессе переработки отработавшего топлива, лучше использовать в быстрых реакторах, его можно использовать повторно, как отмечалось на конференции, и в водяных реакторах.



экспериментальные) с максимальным выгоранием 12 %. На основе полученных результатов был увеличен предел выгорания топлива в реакторе „Феникс” с 5 до 10 % (максимальное выгорание таблеток).

Политика в области переработки облученного топлива

Участники конференции указывали на важность переработки облученного топлива не только как средства улучшения использования мировых энергетических ресурсов, но и как пути сокращения объема высокоактивных отходов, подлежащих хранению. На конференции говорилось о том, что в США администрация Рейгана выступает за переработку, но требует определения роли промышленности и Федерального правительства в этой обла-

сти. Барнуэльский завод по переработке облученного топлива легководных реакторов, возможно, будет введен в эксплуатацию в 1987 г., но потребуются еще вложить 730 млн. долларов в лабораторию обработки отходов и плутониевых хвостов. Осуществляется программа исследований по переработке топлива для реакторов-размножителей. Она имеет целью разработать к 1990 г. автоматическую установку по переработке; особое внимание при этом уделяется разработке технологии дистанционного проведения ремонта и использованию бессоле-вых реагентов.

Во Франции переработка топлива легководных реакторов достигла коммерческой стадии. Переработка топлива от реакторов-бридеров приобретает опыт промышленного производства: на уста-

Прототип быстрого реактора в Дунрее, Шотландия.



новках в Маркуле и на мысе Аг уже переработано более 11 тонн такого топлива; для реакторов „Рассодия” и „Феникс” установлен замкнутый цикл; разрабатывается завод по переработке топлива от быстрых реакторов производительностью 130 т/год (он сможет перерабатывать топливо от шести станций типа „Суперфеникс”, а также от реакторов „Феникс” и SNR-300). В ФРГ осуществляется научно-исследовательская и опытно-конструкторская программа по топливу для реакторов-бридеров, а промышленная программа ограничивается топливом для легководных реакторов. В Центре ядерных исследований в Карлсруэ работает первая полупромышленная установка по переработке топлива от реакторов-размножителей; разрабатывается вторая установка производительностью 50 кг/день.

Если бельгийский парламент примет решение снова открыть завод, то „Еврокемик” приступит к переработке рециклированного топлива. Изучение возможностей адаптации технологической схемы и оборудования завода к условиям нового производства показало, что не требуется никаких фундаментальных изменений, за исключением начальной зоны и зоны плутониевых хвостов. Мнение бельгийских электроэнергетических предприятий по конечным стадиям топливного цикла таково, что переработка облученного топлива необходима. Это было подтверждено на конференции описанием исследовательской установки „Гермес”, которая предназначена для начальной переработки окисного топлива реакторов-размножителей.

Все операции по переработке, о которых сообщалось на конференции, основаны на пюрекс-процессе, за исключением способа, изложенного в докладе от Совета Экономической Взаимопомощи (СЭВ), по переработке топлива быстрых реакторов. Этот способ, использующий расплавление покрытия стержней с последующей флуоринацией в газовой фазе, должен скоро пройти проверку во время переработки отработавшего топлива из реактора BOR-60.

Хранение отработавшего топлива

Временное хранение отработавшего топлива является в настоящее время важным звеном в обращении с таким топливом ввиду задержек с его переработкой и отсутствия четкой политики в отношении конечных стадий топливного цикла. Уже в течение нескольких лет проводится значительная работа по поиску оптимального решения проблем хранения. Хотя хранение отработавшего топлива под водой является испытанной технологией и широко используется на атомных электростанциях и на установках по переработке топлива, методы сухого хранения дают существенные технические и экономические преимущества в отношении пассивных систем охлаждения, модулярной конструкции и т.д. Хранение под водой надежно и безопасно в

течение нескольких десятилетий; период предварительного охлаждения топлива при таком хранении может потребоваться перед долговременным сухим хранением. Хранилище, расположенное за пределами реакторной площадки, более экономично, чем строительство новых бассейнов на самой площадке, за исключением площадок с шестью и более реакторами. В Швеции, например, строится подземное промежуточное хранилище, позволяющее хранить 3000 тонн урана с последующим увеличением до 9000 тонн. Уплотнение топливных стержней может привести к сокращению на 50 % как площади хранения, так и операций по обращению с транспортными контейнерами. Увеличение степени выгорания топлива оказывает благоприятное влияние на хранение отработавшего топлива, поскольку сокращается его объем. Кроме того, не предполагается, что оно окажет влияние на поведение топлива при его хранении под водой. Постоянное хранение отработавшего топлива без его переработки технически осуществимо, но требует проверки.

Обращение с отходами

Политика ФРГ по обращению с отходами исходит из того, что переработка является обязательным шагом. Однако земля Нижняя Саксония требует изучения альтернативного решения — хранения отработавшего топлива. В Горлебене строится крупный бассейн для отработавшего топлива и ведутся поиски трех возможных площадок для заводов по переработке. Исследования показали, что каменная соль является хорошей средой для захоронения отходов. В Бельгии работы в области обращения с радиоактивными отходами направлены на достижение максимального сокращения их объема, стабилизацию концентратов, выбор подходящей среды для их захоронения с учетом выполнения этих операций при разумных затратах. Особое внимание привлекли проблемы химического и физического кондиционирования радиоактивных отходов. Уже применяются битумирование отходов и процесс концентрации и фиксации реакторных эфлуентов.

Великобритания считает переработку отработавшего топлива важной частью стратегии в области обращения с отходами и продолжает разработку установки THORP. Между тем, в Уиндскейле был построен крупный бассейн для хранения. Хорошим решением считается захоронение низкоактивных отходов в океане. Отходы средней активности хранятся в траншеях глубиной 30–40 м. Альфа- и высокоактивные отходы предполагается хоронить в геологических формациях. Английское правительство считает уже доказанной осуществимость такого захоронения, и дальнейшие работы в этой области в ближайшем будущем проводиться, видимо, не будут.

Во Франции топливо перерабатывается. Низкоактивные отходы хранятся на установке в Ла-Манше, отходы средней активности будут храниться на новой площадке, а высокоактивные — в граните. Швейцария очень серьезно изучает возможность использования гранитных формаций для хранения отходов высокой и средней активности. В Дании были проведены исследования проблем хранения отходов высокой и средней активности в соляных шахтах. Комиссия европейских сообществ подтвердила, что она будет поддерживать программу исследований в области переработки и захоронения отходов.

Входит в практику остекловывание высокоактивных отходов. Отмечается также прогресс в изучении новых матричных материалов для удержания высокоактивных отходов при долговременном захоронении в глубоких геологических формациях: матрица сульфит никеля/графит или синтетическая горная порода, содержащая минералы, могут в бу-

дущем явиться альтернативой процессу остекловывания.

Демонтаж установок топливного цикла

Рассматривались все аспекты демонтажа ядерных установок: методы, анализ безопасности, правила, расходы, очистка площадки и требования к будущим исследованиям и разработкам. На конференции указывались работы по дезактивации и демонтажу конкретных установок: дезактивация, демонтаж и упаковка технологического оборудования, загрязненного плутонием и обогащенного ураном, на американской установке по производству окисного и карбидного топлива для легководных реакторов и реакторов-размножителей и осуществление программы по дезактивации и частичному демонтажу оборудования на заводе по переработке топлива фирмы „Еврокемик” в Бельгии (работа потребовала 150 000 человеко-часов). В результате дезактивации стал возможным доступ к технологическим камерам и оборудованию.