

# Применение современных методов и технических средств при осуществлении гарантий

А. фон Бекманн\*

Целью международной политики нераспространения является предотвращение расположения ядерного оружия. Для осуществления этой цели в течение последних 25 лет была создана всеобъемлющая система международных соглашений и договоров, в которую входит международная система проверки выполнения государством его обязательств и недопущения переключения ядерной энергии с мирного применения на производство ядерного оружия или других ядерных взрывных устройств. Международному агентству по атомной энергии с момента его образования в 1957 году была поручена задача создания и развития этой системы, которая в настоящее время называется системой гарантий МАГАТЭ. В данной статье рассматривается применение современных методов измерений, а также средств сохранения и наблюдения при осуществлении гарантий МАГАТЭ.

Для производства ядерного оружия или других ядерных взрывных устройств требуется определенное количество урана-233, урана-235 или плутония, а также соответствующая технология. Поскольку контроль за техническими разработками практически не осуществим, система гарантий Агентства строится главным образом на жестком контроле за ядерными материалами. Основным инструментом гарантий является всесторонняя система учета ядерных материалов и мер по сохранению и наблюдению. Учет ядерных материалов основывается на отчетах, предоставляемых операторами ядерных установок, а также на национальных системах учета и контроля за ядерными материалами. Неотъемлемой частью этой системы является независимая проверка этих отчетов в ходе инспекций, осуществляемых МАГАТЭ.

При проведении независимых проверок отчетов о количестве и составе ядерных материалов инспектора Агентства должны уметь производить определенные измерения. С этой целью обычно производится либо отбор представительных проб, которые затем направляются в аналитическую лабораторию, либо неразрушающий анализ на месте. Осуществление обеих процедур связано с определенными присущими им трудностями и требует применения сложных приборов и специальных знаний.

\* Директор Отдела развития и технической поддержки Департамента гарантий Агентства. В основу данной статьи положена лекция, которую г-н фон Бекманн прочитал в сентябре 1980 года на дневном научном заседании Генеральной конференции Агентства.

## Химический анализ

Химический анализ обычно дает очень точные результаты, но является дорогостоящим методом; кроме того, требуется перевозка проб, и готовые результаты можно получить лишь по истечении 3-5 недель. Методы неразрушающего анализа часто оказываются значительно менее точными и менее надежными, однако во многих случаях они обеспечивают немедленное получение результатов. На рис. 1 показана аналитическая лаборатория, предназначенная и оснащенная для проведения химического анализа материалов, содержащих плутоний. В целях предотвращения утечек плутония из перчаточных боксов предусмотрены специальные меры предосторожности. Для работы в таких лабораториях требуются высококвалифицированные, заслуживающие доверия специалисты. Если плутоний содержит высокоактивные продукты деления, необходимо применять боксы со свинцовой экранировкой, оборудованные манипуляторами. После разделения плутония и продуктов деления производится анализ изотопного состава микропроб. На рис. 2 показан полностью автоматизированный термоионизационный масс-спектрометр, используемый для анализа урана и плутония в пробах, отобранных во время инспекций. Этот прибор представляет собой лишь один из примеров возможного применения современной электронной и вычислительной техники в аналитической химии. Все рабочие параметры, такие, как давление, температура, напряженность магнитного и электрического поля и пр., контролируются с помощью программно-управляемых процессоров, и окончательные результаты — с учетом неопределенностей измерений — подсчитываются на мини-ЭВМ путем обработки данных, полученных в нескольких тысячах точек. Правильно разработанная и выполненная программа обеспечения качества позволяет получить надежные результаты. Химический анализ обеспечивает получение почти всей требующейся количественной информации о ядерном материале, поставленном под гарантии, поскольку методы химического анализа используются либо непосредственно для получения результатов, либо для калибровки эталонов, необходимых для проведения неразрушающего контроля.

## Неразрушающий контроль

Во многих случаях отбор проб и химический анализ невозможен, так как ядерный материал заключен в оболочки, содержится в стержнях, топливных сборках, находится в барабанах для UF<sub>6</sub> или других контейнерах, которые не позволяют взять

пробу без нарушения целостности контейнера. Вскрывать топливную сборку стоимостью примерно в 100 000 долл. для того, чтобы выяснить, содержит ли сборка заявленный ядерный материал, конечно, нельзя. Следовательно, в таких случаях необходимо применять методы неразрушающего контроля (МНК), позволяющие инспектору проверить тип и количество ядерного материала без доступа к нему. В измерениях подобного рода радиоактивность урана и плутония является полезным фактором. Практически на процесс непрерывного радиоактивного распада, связанного с характеристическим излучением, воздействовать невозможно; в то же самое время этот процесс позволяет определить тип и количество радиоактивного материала.

Наиболее распространенные методы неразрушающего контроля, используемые для целей гарантий, основаны на измерении гамма-излучения, взаимодействующего с материалом детектора. Электрические импульсы, появляющиеся в результате этого взаимодействия, сортируются по специальным регистрам памяти ЭВМ в соответствии с уровнем их энергии. Приборы, выполняющие такие операции, называются многоканальными анализаторами. Тип материала определяется по уровню энергии, соответствующей наблюдаемым линиям, его количество — по интенсивности этих линий.

На рис. 3 показан тысячеканальный анализатор сложной конструкции, который позволяет определять тип ядерного материала и измерять его количество. С помощью этого прибора можно получить изображение гамма-спектра на экране электронно-лучевой трубки и записать данные спектра на магнитную ленту. Такая индикация позволяет моментально идентифицировать ядерный материал и производить его квазиколичественный анализ. Путем обработки на центральной ЭВМ Агентства данных, записанных на магнитной ленте, можно рассчитать изотопный состав и количество урана и плутония. Показанный на рисунке многоканальный анализатор используется совместно с детектором гамма-излучений, имеющим высокую разрешающую способность. Детектор изготавливается из чистого германия, и во время измерений его необходимо охлаждать жидким азотом.

Благодаря появлению высоконадежных, недорогих и очень компактных твердотельных элементов аппаратура, применяемая при неразрушающем контроле, как и все другие электронные приборы, была значительно усовершенствована. Внедрение еще более совершенных твердотельных компонентов позволит добиться дальнейшего усовершенствования приборов, используемых для неразрушающего контроля, с тем чтобы они производили автоматический контроль качества измерений, полный анализ данных и даже обеспечивали определенную степень диалога с инспектором. Хотя МНК не позволяет непосредственно измерить содержание урана и плутония в высокоактивных облученных твэлах, с его помощью можно измерить спектры гамма-излучения продуктов деления, на основании которых определяется глубина выгорания топлива; по глубине выгорания можно рассчитать величину урановой и плутониевой загрузки в облученных твэлах.

К другому типу приборов, которые применяют инспекторами МАГАТЭ для количественного анализа ядерного материала, в частности плутония, относится высокопоточный нейтронный счетчик совпадений (ВПНСС), показанный на рис. 4. Этот прибор регистрирует нейтроны, испускаемые при самопроизвольном делении определенных изотопов плутония или при вынужденном делении урана-235 или урана-233. Обычно при делении атомного ядра в каждом акте деления испускается от 2 до 3 нейтронов. Поскольку они попадают в детектор одновременно, нейтроны, образовавшиеся в результате деления атомного ядра, можно отличить от "фоновых" нейтронов, которые не коррелированы по времени. Слово "высокопоточный" включено в название прибора ввиду того, что электронное оборудование счета и сортировки имеет особую конструкцию, предназначенную для работы при очень высокой скорости счета — порядка 100 000 единичных отсчетов в секунду. Высокая скорость счета необходима при исследовании килограммовых количеств плутония с высоким содержанием изотопа  $^{240}\text{Pu}$ . ВПНСС подсоединяется непосредственно к малогабаритной программируемой счетной машине (НР-97). Эта система применялась в полевых условиях для анализа плутониевых стержней и пластин, имеющих хорошо известные характеристики; полученные результаты согласуются с техническими данными в пределах 2%.

В последнее время дальнейшее развитие получил очень простой метод проверки содержания топлива в активной зоне исследовательского реактора; усовершенствование этого метода позволило увеличить чувствительность измерений и получать квазиколичественные результаты. Указанный метод основан на использовании хорошо известного эффекта черенковского излучения. При работе исследовательского реактора погружного типа в районе активной зоны реактора можно наблюдать интенсивное свечение Черенкова. Такое интенсивное световое излучение свидетельствует о том, что реактор находится в рабочем режиме; последнее означает, что в реакторе должно находиться минимальное критическое количество ядерного топлива. Во многих случаях это служит достаточно веским доказательством отсутствия переключения ядерного материала в количестве, требующемся для производства хотя бы одного ядерного взрывного устройства. После остановки реактора свечение Черенкова быстро затухает, и через 3-5 месяцев после извлечения топлива из активной зоны свечение Черенкова почти невозможно обнаружить невооруженным глазом. Однако с помощью специальных усилителей света и устройств ночного видения свечение Черенкова можно наблюдать и фотографировать даже после охлаждения реактора в течение десяти и более лет. На рис. 5 показан высокочувствительный усилитель света, который позволяет производить фотографирование. Описанный метод особенно эффективен при проверке предыстории облучения отработанного топлива, находящегося на хранении. В настоящее время разрабатываются приборы с использованием эффекта свечения Черенкова, которые позволят производить квазиколичественные измерения. Хотя с помощью этого метода нельзя определить количество урана и плуто-

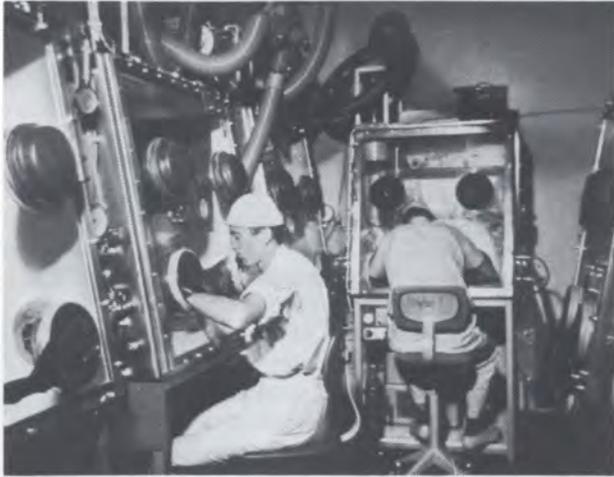


Рис. 1. Лаборатория, предназначенная и оборудованная для проведения химического анализа материалов, содержащих плутоний.

ния в облученном топливе, однако он дает возможность проверить количество твэлов в активной зоне, а также уровни облучения отдельных сборок.

Приведенные сведения о подобных разработках и достигнутом прогрессе не должны создавать неверное впечатление, что методы неразрушающего контроля обеспечивают легкий способ проверки ядерных материалов. Отдельные методы обычно позволяют проверить одну специфическую характеристику материала. Достоверные результаты в определении типа и количества ядерного материала можно получить лишь путем сочетания несколь-

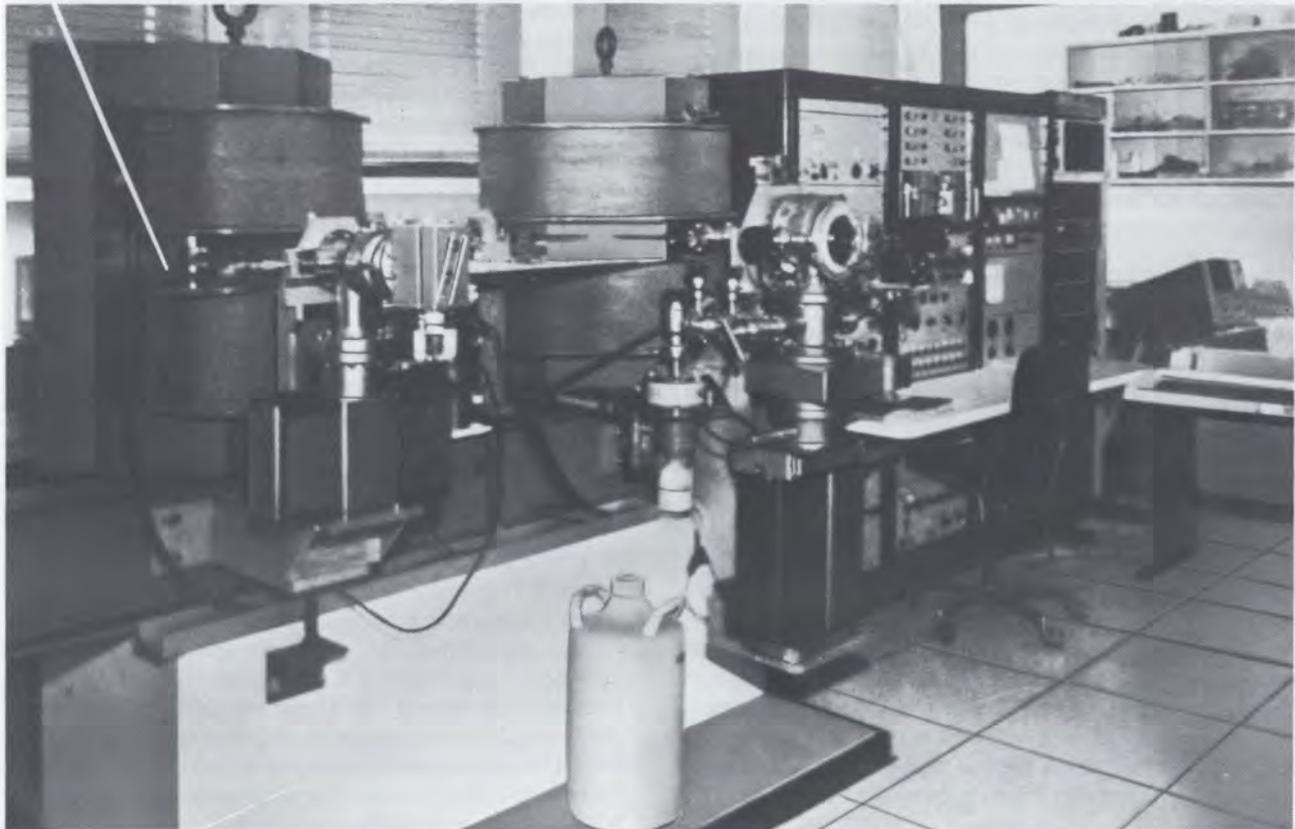
ких различных методов неразрушающего контроля и их взаимной калибровки. Идеальный прибор, используемый для неразрушающего контроля, должен обеспечивать проведение простой, надежной и быстрой проверки типа и количества ядерного материала, содержащегося в топливной сборке, контейнере для хранения  $UF_6$  или в любом другом контейнере, а также в бассейне для хранения облученного топлива. Создание такого прибора будет и впредь оставаться нашей задачей в течение многих лет.

#### Меры по сохранению и наблюдению

Чтобы избежать проведения излишних и дорогостоящих повторных измерений ядерного материала, находящегося в защитной оболочке, Агентство применяет меры по сохранению и наблюдению. Например, очень простым способом контроля сохранности материала, находящегося в контейнере, является опечатывание контейнеров. По истечении определенного срока после опечатывания необходимо лишь проверить целостность контейнера и сохранность печати; осуществление этой операции обычно обходится значительно дешевле и связано с гораздо меньшими трудозатратами, чем проведение повторной проверки материала.

Основной печатью общего назначения, которая в настоящее время применяется МАГАТЭ, является металлическая печать типа Е. Ежегодно инспектора МАГАТЭ используют примерно 8 тысяч таких печатей. В последние два года значительные усилия были затрачены на то, чтобы усовершенствовать печати типа Е и увеличить степень их защищенности от

Рис. 2. Полностью автоматизированный термоионизационный масс-спектрометр, применяемый для анализа урана и плутония в пробах, полученных во время инспекций.



подделок. Эти печати недороги, имеют небольшие размеры, удобны для применения и в настоящее время относительно хорошо защищены от действий, направленных на их подделку. Одним существенным недостатком этих печатей является то, что их целостность не может быть проверена на месте. К новым печатям общего назначения, разработка которых ведется в настоящее время, относятся печати, допускающие возможность их проверки на месте с помощью ультразвука, печати из волоконной оптики и электронные печати. Для контроля передвижений топлива из бассейнов для хранения облученного топлива на реакторных станциях или перерабатывающих заводах Агентство часто использует кинокамеры или замкнутые телевизионные системы, работающие в режиме периодического включения. Чтобы извлечь облученное топливо из такого бассейна, в помещение необходимо привезти тяжелый контейнер, используемый для экранировки интенсивной радиации, исходящей от топливной сборки; затем этот контейнер, в который можно загрузить одну или несколько топливныхборок, опускается в бассейн. Далее контейнер закрывают, извлекают из бассейна и увозят с установки. Осуществление этой операции представляет определенные трудности и требует много времени; факт выполнения такой операции можно легко установить при просмотре контрольных фильмов, которые снимаются в режиме периодического включения камер с интервалом 10-20 минут.

На рис. 6 показана стандартная система МАГАТЭ для поккадровой съемки, которая состоит из двух кинокамер Минолта XL 401 с 8-миллиметровой



Рис. 3. Используемый инспекторами МАГАТЭ 1000-канальный анализатор.

пленкой типа "супер"; каждая камера снабжена кварцевым таймером, заключена в опечатываемый кожух для защиты от злонамеренного вскрытия и оборудована установочным кронштейном, который обеспечивает правильную установку камер в требуемое положение. Двухкамерная конструкция выбрана для повышения надежности системы. В случае использования специальной тонкой пленки MFХ емкость кассеты достигает 7200 кадров — этой емкости достаточно для работы системы в течение 100 дней при частоте съемки один кадр через каждые 20 мин. В настоящее время на различных установках смонтировано и используется для целей гарантий

Рис. 4. Высокопоточный нейтронный счетчик совпадений, соединенный с малогабаритной программируемой машиной.

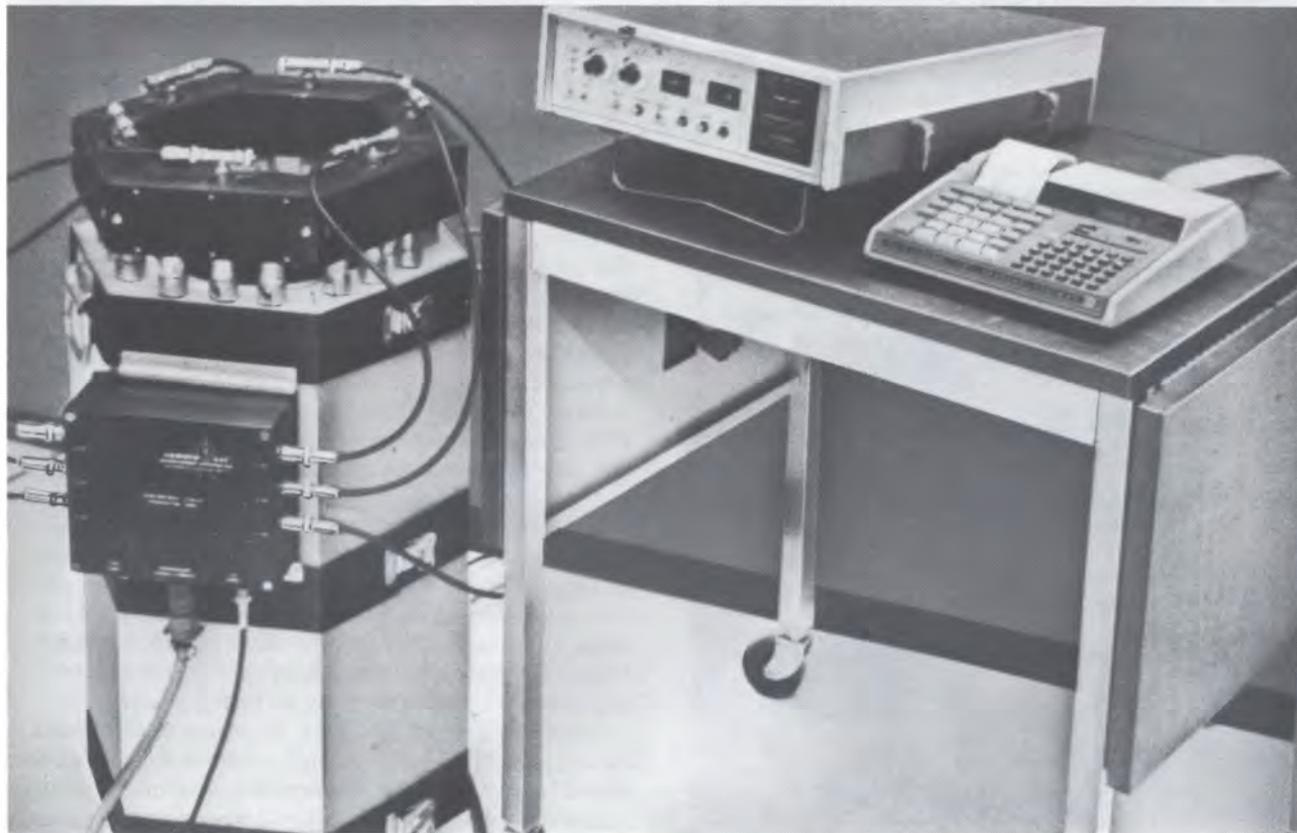


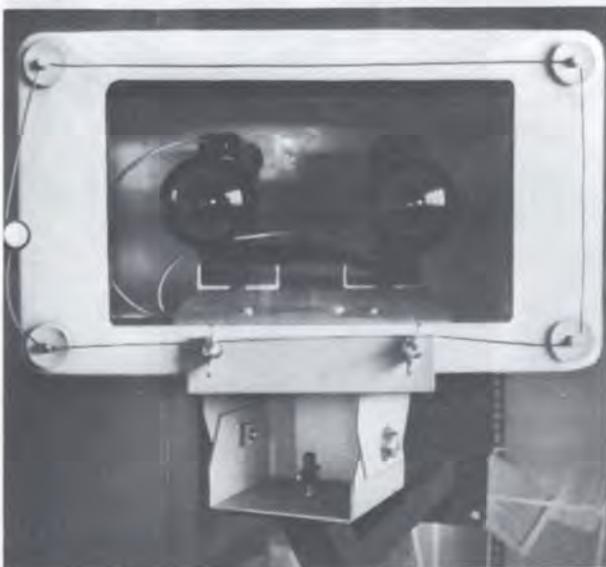


Рис. 5. Усилитель света, который можно использовать для фотографирования черенковского свечения облученных твэлов.

МАГАТЭ примерно 150 таких систем. Они полностью автономны, не требуют подвода электропитания от контролируемой установки и стоят относительно недорого (стоимость одной системы составляет примерно 1500 долл.). Применение специальной тонкой пленки, однако, привело к появлению некоторых проблем, связанных с надежностью. Как показали недавно проведенные испытания на воздействие окружающей среды, в условиях повышенной влажности у этой пленки обнаруживается тенденция к заклиниванию в механизме камеры. В настоящее время инспектора Агентства дополнительно герметизируют все системы кинокамер специальными материалами и укладывают внутри блоков осушитель.

В систему покадровой съемки можно внести ряд усовершенствований. К ним относится использова-

Рис. 6. Стандартная система с двумя кинокамерами, используемая МАГАТЭ для осуществления мер по сохранению и наблюдению.



ние новой камеры с кассетой для 60-миллиметровой пленки емкостью 14 400 кадров, автоматическая регистрация даты и времени съемки на каждом кадре, автоматическое регулирование экспозиции для компенсации сильно изменяющихся условий освещения; увеличение надежности системы, улучшение конструкции кожуха с целью обеспечения инспектору более легкого доступа к камерам, повышение уровня защищенности системы от злонамеренного вскрытия и введение проверочных функций. Многие из перечисленных усовершенствований предусматривается использовать в разрабатываемой в настоящее время системе камер, работающих на принципе моментального процесса проявления "ПолярOID". Такая система может быть особенно полезной в случаях, когда инспектору не разрешается извлекать и выносить пленку за пределы территории, на которой располагается установка, или вывозить ее из государства для последующего проявления и просмотра.

Для получения достоверных данных на основании проведения оптических наблюдений в ходе осуществления гарантий необходимо, чтобы инспектора тщательно изучали отснятый материал, в большинстве случаев в Центральных учреждениях Агентства. Изучение таких материалов представляет собой особенно трудоемкий процесс, в котором имеется целый ряд неопределенностей, и объем работ в этой связи сильно вырос. В настоящее время камеры, используемые МАГАТЭ на установках, в общей сложности делают более 10 снимков в минуту. В прошлом году Агентство начало эксплуатировать специальное полуавтоматическое устройство для просмотра 8-миллиметровой пленки типа "супер". В этом устройстве фильм проектируется на объектив видеокамеры и полученный видеосигнал анализируется с помощью детектора движения. На видеодиск записываются лишь те кадры, на которых зафиксировано движение; затем видеозапись этих кадров тщательно изучается инспекторами на экране монитора. С помощью такого устройства контрольные снимки можно просматривать быстрее и с более высокой точностью.

В некоторых случаях, когда требуется непрерывное наблюдение или когда уровень радиации поблизости от камеры чрезмерно высок, что может привести к засвечиванию пленки, а также в тех случаях, когда запись должна быть просмотрена непосредственно на месте, вместо кинокамер используются замкнутые телевизионные системы. Применяемая в настоящее время Агентством замкнутая телевизионная система работает практически так же, как и система кинокамер. Кадры периодически записываются на видеомангитфон и при просмотре воспроизводятся через монитор; магнитофонную ленту можно также извлекать для последующего просмотра в Центральных учреждениях. Эти новые системы вначале были относительно ненадежными, но благодаря более качественному техническому обслуживанию, проведенному в течение последнего года, интенсивность отказов значительно снизилась. Некоторые приборы, используемые в старых системах, в частности видеомангитфоны, подверглись сильному износу. В настоящее время на установках,

находящихся под гарантиями МАГАТЭ, эксплуатируется 12 замкнутых телевизионных систем.

Сейчас производится оценка возможности применения для целей Агентства новых замкнутых телевизионных систем, управляемых микропроцессорами. Конструкция этих систем отличается повышенной надежностью, простотой настройки и управления. Управление с помощью микропроцессора программируется таким образом, чтобы обеспечивать выполнение основных функций наблюдения даже в случае ошибочных действий инспектора.

Другой подход, реализация которого может привести к более надежной эксплуатации приборов, используемых для целей сохранения и наблюдения, заключается в осуществлении дистанционного контроля за рабочим состоянием аппаратуры. Этот метод контроля исследуется в рамках программы RECOVER (REmote COntinual VERification – непрерывная дистанционная проверка). Система RECOVER состоит из мониторов, которые непосредственно соединены с техническими средствами, используемыми для целей сохранения и наблюдения; расположенных на местах мультиплексорных устройств, которые периодически опрашивают мониторы и по запросу посылают данные о состоянии контролируемых средств в Центральные учреждения МАГАТЭ; стационарного проверочного комплекса, размещенного в Центральном учреждении МАГАТЭ или региональных бюро, который осуществляет опрос расположенных на местах мультиплексорных устройств, анализ и хранение передаваемых данных. Данные, свидетельствующие об отклонениях от нормы, будут приводить к срабатыванию сигнализации, предупреждающей о том, что сотрудники МАГАТЭ должны принять соответствующие меры. Перед передачей по обычным телефонным линиям данные о состоянии кодируются. Данные опросов можно сразу же воспроизводить на телевизионном мониторе дистанционного проверочного комплекса или позднее считывать из памяти. Таким образом из точки, удаленной от находящейся под контролем установки, можно автоматически обнаруживать неисправности в технических средствах, используе-

мых для целей сохранения и наблюдения, или выявлять случаи незаконного вмешательства в их функционирование. Первый вариант системы RECOVER в настоящее время проходит испытание на установках в Австралии, Австрии, Болгарии, Канаде, Соединенном Королевстве, Соединенных Штатах Америки, Федеративной Республике Германии и Японии.

#### Международное сотрудничество

В деле разработки средств и методов осуществления гарантий Агентство в значительной степени полагается на сотрудничество с государствами-членами. В отличие от Евратома, Комиссии по регулированию ядерной деятельности США или аналогичных организаций, осуществляющих гарантии, Агентство не располагает собственными учреждениями для проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Сотрудники Агентства контролируют и координируют исследования и разработки, осуществляемые в области гарантий в различных государствах-членах. США, Канада и ФРГ разработали обширные вспомогательные программы по гарантиям МАГАТЭ и приступили к их выполнению; другие государства, например, Соединенное Королевство, СССР, Австралия и Япония, а также Евратом объявили о своей готовности обеспечить дополнительную поддержку работам в этой области. Япония, Франция и США предложили Агентству принять участие в работах по программе TASTEX, направленной на совершенствование национальных и международных гарантий, применяемых на установках по переработке облученного топлива. Кроме того, МАГАТЭ получило приглашение участвовать совместно с Евратомом, Соединенным Королевством, Нидерландами, ФРГ, США, Японией и Австралией в опытно-конструкторских работах, цель которых состоит в том, чтобы облегчить применение международных гарантий на заводах по обогащению урана методом центрифугирования. Агентство выражает большую благодарность за эту поддержку, которая уже внесла значительный вклад в дело улучшения эффективности гарантий МАГАТЭ.