

# Специальный доклад

## Надёжность оборудования

Т. Демлер и В. Исслер\*

Атомные электростанции в настоящее время имеют эксплуатационный опыт более 3000 реакторо-лет с высоким коэффициентом готовности отдельной станции (около 80%). Поэтому можно говорить, что возможна безопасная и экономичная эксплуатация станций на основе существующих регламентаций и принципов проектирования. Тем не менее важным условием для гарантии сохранения безопасности и надёжности является оптимизация проектирования и технологии материалов, включая обеспечение качества и повторную инспекцию при обслуживании.

Международный симпозиум по надёжности работающих под давлением компонентов реакторов, организованный МАГАТЭ совместно с Государственным бюро проверки материалов (МРА) Штутгарт-

\* Государственное бюро проверки материалов (МРА), Штутгартский университет, Федеративная Республика Германии.

ского университета, был проведен в марте 1983 г. (сообщение о нем было опубликовано в *Бюллетене МАГАТЭ*, т. 25, № 3, сентябрь 1983 г.). Одновременно с симпозиумом была организована выставка, которая познакомила участников симпозиума с эксплуатационным опытом в области технологии и методами повышения безопасности и надёжности. На выставке были представлены, главным образом, методы изготовления и ремонта и методы неразрушающего контроля. В работе выставки участвовали пятнадцать экспонентов из ФРГ, Франции, Великобритании и США. Ниже рассматриваются наиболее интересные экспонаты.

### Профилированная сварка корпусов

Девять лет назад для конструктивных элементов любых размеров и форм планировалось применение только сварного металла. Вместо литья,ковки и

#### Участники выставки по надёжности оборудования

Babcock & Wilcox Co., Lynchburg, USA/Brown Boveri Reaktor GmbH, Mannheim, FRG

Bopp & Reuther GmbH, Mannheim, FRG

Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM), Berlin

Central Electricity Generating Board (CEGB), Generation Development and Construction Division, Barnwood, UK

Fraunhofer-Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren (IzfP), Saarbrücken, FRG

GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH, Geesthacht FRG

Intercontrole, Rungis, France

Kraftwerk Union AG, Erlangen, FRG

M.A.N. Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg AG, Nürnberg, FRG

Gutehoffnungshütte GHH, Sterkrade, FRG

Gg. Noell GmbH, Würzburg, FRG

Staatliche Materialprüfungsanstalt (MPA), Universität Stuttgart, FRG

Technischer Überwachungsverein Bayern e.V., München, FRG

Technischer Überwachungsverein Stuttgart e.V., Stuttgart, FRG

Thyssen Schwerkomponenten GmbH, Düsseldorf, FRG

United Kingdom Atomic Energy Authority (UKAEA), Risley Engineering and Materials Laboratory, Risley, UK

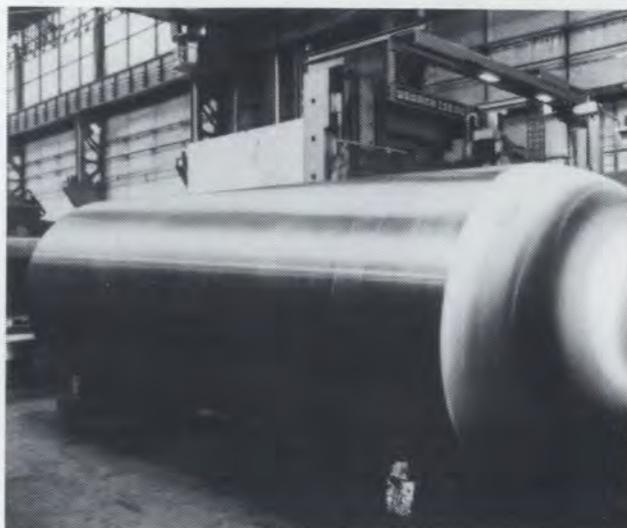


Рис. 1. Корпус, сваренный профилированной сваркой

прокатки применяется многослойная сварка с помощью погруженной электродуговой сварки (SAW). Этот метод, называемый для краткости „профилированной сваркой”, имеет значительные преимущества для изготовления толстостенных компонентов, обладающих такими свойствами, как высокая прочность и устойчивость против ползучести и коррозии. Ожидается, что профилированная сварка компонентов будет удовлетворять наиболее строгим требованиям безопасности, а компоненты будут дешевле изготовленных обычными методами.

Основное преимущество этого метода заключается в том, что впервые текучесть металла и предел ползучести и прочности на растяжение могут упорядоченным образом изменяться путем использования различных материалов в толстостенных компонентах. Существующие проблемы распределения напряжений и жесткости, а также проблемы образования трещин в результате напряжений или коррозии под напряжением и эрозии обычно разрешаются использованием оптимальных наполнителей. Предварительные испытания показали также, что профилированная сварка имеет определенные преимущества перед обычными методами, например, при изготовлении корпусов, плакированных изнутри нержавеющей сталью.

Применение профилированной сварки для изготовления сложных узлов находится еще в стадии развития. На рис. 1 показан сваренный этим методом 58-тонный работающий под давлением корпус с днищем, изготовленным с применением заполняющего материала 10 MnMoNi 55 без сварного шва. Внешний диаметр корпуса равен 1811 мм, длина цилиндрической части — 4575 мм при полной длине 5482 мм.

#### Предохранительные клапаны и основные концепции безопасности

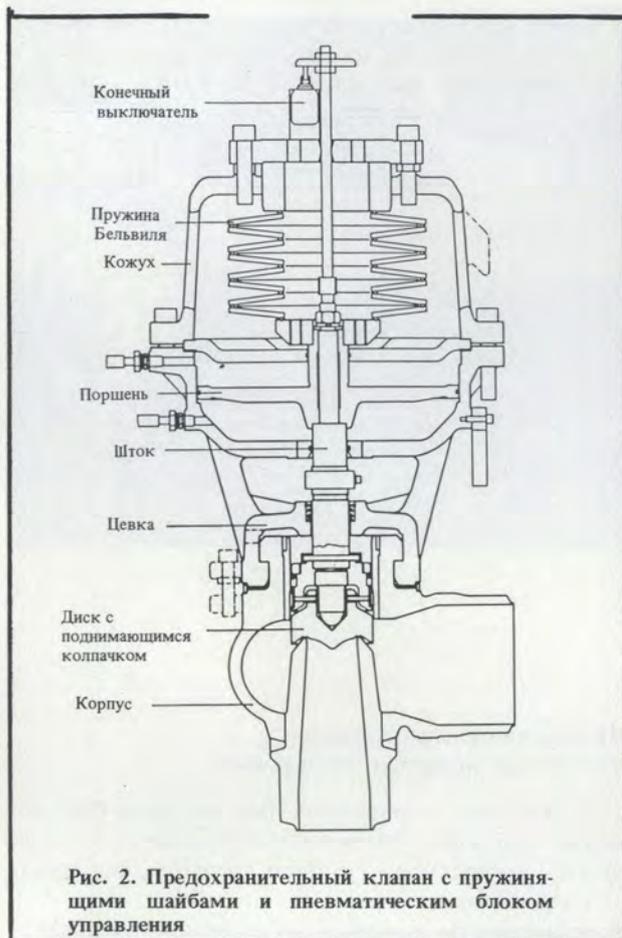
В основных концепциях безопасности основное внимание уделяется материалам. Надежность компонентов, главным образом, определяется следующим:

- применением высококачественных материалов, обладающих хорошими характеристиками, но прочностными
- консервативными ограничениями напряжений
- исключением концентрации напряжений
- оптимизации конструкции
- гарантией применения наилучшей возможной технологии
- специальными знаниями и анализом ошибок

Если эти требования выполняются, то оговариваются „основы безопасности” компонента, заключающиеся в их отказе в результате ошибок в процессе изготовления.

Важным требованием является проведение функциональных испытаний на испытательных стендах. До начала изготовления прототип предохранительных клапанов испытывается при реальных условиях по давлению, температуре, массовому расходу и т.д. Полученные результаты должны быть подтверждены при дальнейших испытаниях оборудования готовленной серии. В это же время устанавливаются исходные данные для повторной инспекции функциональных испытаний, которые должны проводиться позднее при работе оборудования.

На рис. 2 показан демонстрировавшийся также предохранительный клапан с пружиной, шайбами и пневматическим блоком управления типа SIZ-DN 200x250 с порогом срабатывания при давлении 65 бар для пара при температуре 100°C и пропускной способностью 200 т/ч.



**Сварочные и шлифовальные машины с дистанционным управлением**

Технология импульсной сварки достигла таких высоких результатов, что теперь операции по сварке трубопроводов могут успешно осуществляться в любом месте. Внедрение транзисторных источников электроэнергии дало замечательный эффект, так как они обеспечивают строгую повторяемость сварочных параметров.

Оборудование, предназначенное для использования в „горячих” зонах реактора, также должно, насколько это возможно, проектироваться в расчете на дистанционное обслуживание. Представленное на выставке сварочное оборудование (рис. 3) включает:

- источник электроэнергии с программным управлением
- систему наблюдения
- сварочную головку
- манипулятор для направления сварочной головки
- охлаждающее устройство
- устройство для отжига (для предварительного нагрева)

Сварочные параметры могут быть различными для каждой части круговой сварки, для получения постоянной толщины слоя необходима программа управления процессом. Показанная круговая головка, строго направляемая манипулятором, может сваривать трубы внешним диаметром до 120 мм.

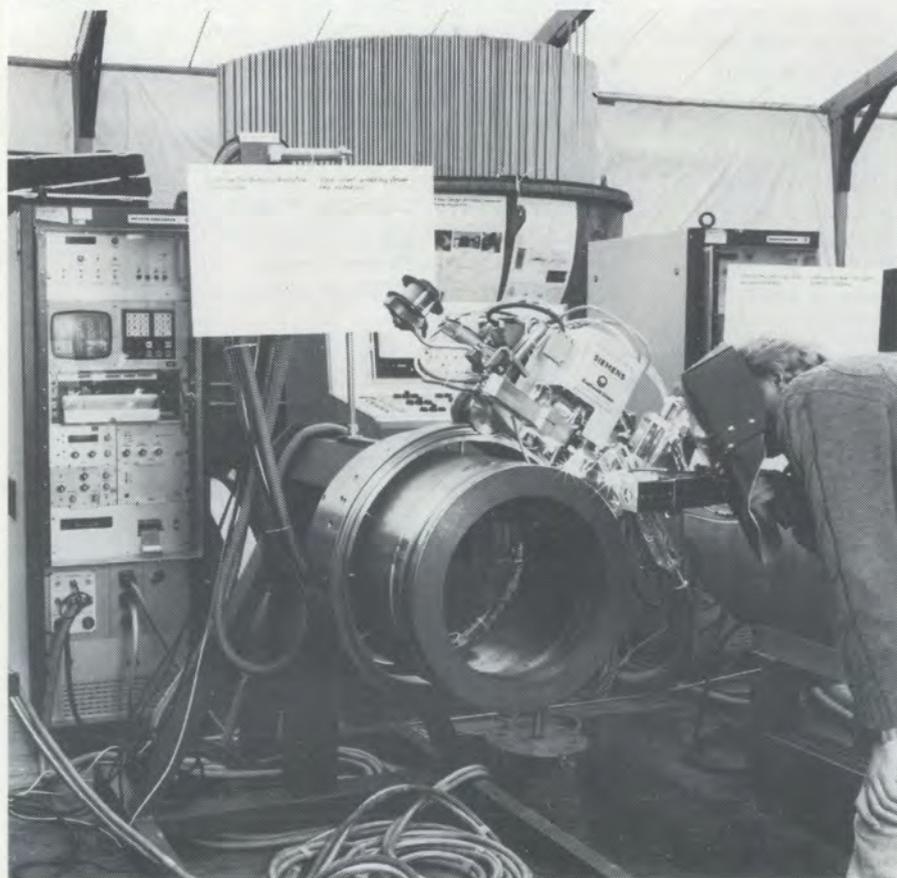


Рис. 3. Дистанционно управляемая сварочная машина для сваривания труб

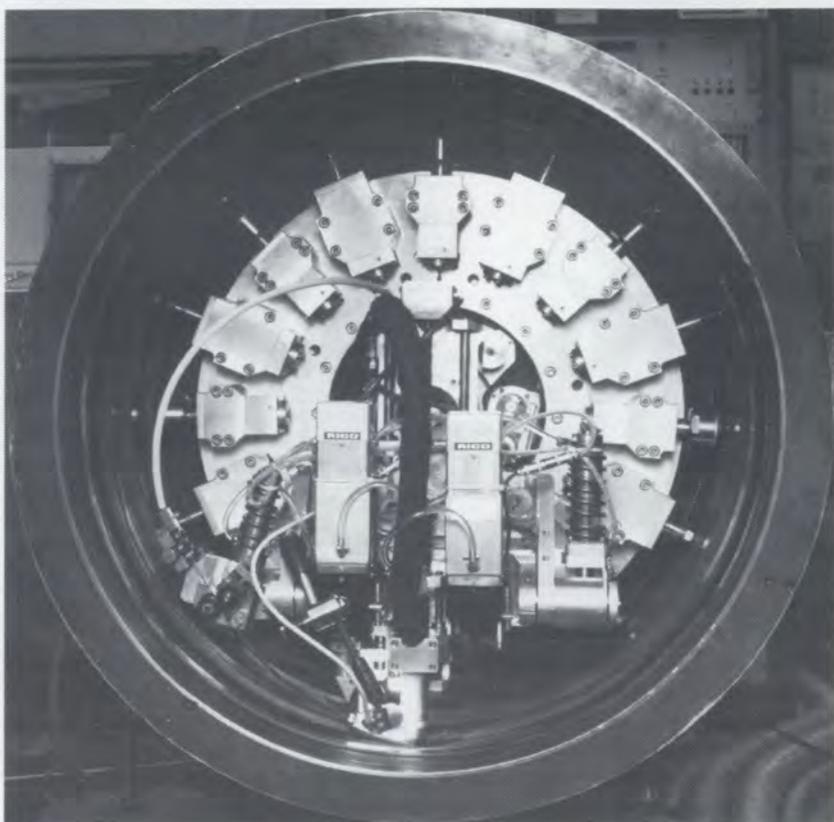


Рис. 4. Сварочная машина для внутреннего плакирования трубопроводов

Головка снабжена телевизионными камерами, которые позволяют тщательно контролировать процесс сварки.

Возросшие требования безопасности требуют неразрушающего контроля работающих под давлением сварных соединений во время эксплуатационной инспекции атомных электростанций с применением таких методов, как ультразвуковой или рентгеновский контроль. Если ультразвуковой контроль осуществляется на необработанных сварных поверхностях, то такие несовершенства сварки, как прогиб или отклонение вершины сварного шва, могут дать ложные показания. Если сварной шов круговой сварки, выполненной только с одной стороны, обработан машинным способом, возникновение трещин значительно уменьшается. В настоящее время существует возможность такого высококачественного шлифования внутреннего диаметра трубопровода, что выделение показаний от зоны вершины сварного шва производится быстро и точно.

Машина, сконструированная в этих целях, в настоящее время успешно используется при первоначальном сооружении и впоследствии при замене трубопроводов на всех электростанциях одного изготовителя. Так называемая „обучающаяся” система управления используется при необходимости шлифовать изогнутые места сварки. В настоящее время на площадке производится более 3000 сварных соединений, местонахождение большинства из которых почти недоступно для других методов.

Эта машина для внутреннего шлифования трубопроводов была приспособлена для перемещения сварочной головки и установки дистанционно управляемого устройства для внутреннего плакирования и ремонта трубопроводов. Сварочный механизм, показанный на рис. 4, в основном содержит то же оборудование, что и для внешней сварки, и также имеет телевизионную систему для контроля процесса сварки и выбора места установки. Впервые он был применен при сооружении атомной электростанции Филипсбург 2, где на площадке было выполнено при дистанционном управлении 20 сварных соединений трубопроводов первого контура.

#### Ремонт трубок парогенератора гильзованием

В реакторах с водой под давлением типа PWR парогенераторы являются разделяющим барьером между первым и вторым контурами. Длительный эксплуатационный опыт показал, что в трубках парогенератора, подвергающихся коррозионному воздействию, возникают течи вследствие каверн, эрозии и транскристаллитного коррозионного растрескивания под напряжением.

Периодическая эксплуатационная инспекция для определения состояния трубок является обязательной. Решение о том, продолжать ли эксплуатацию трубок или закупорить их, принимается на основе результатов таких инспекций. Однако чрезмерное закупоривание снижает эффективность атомной

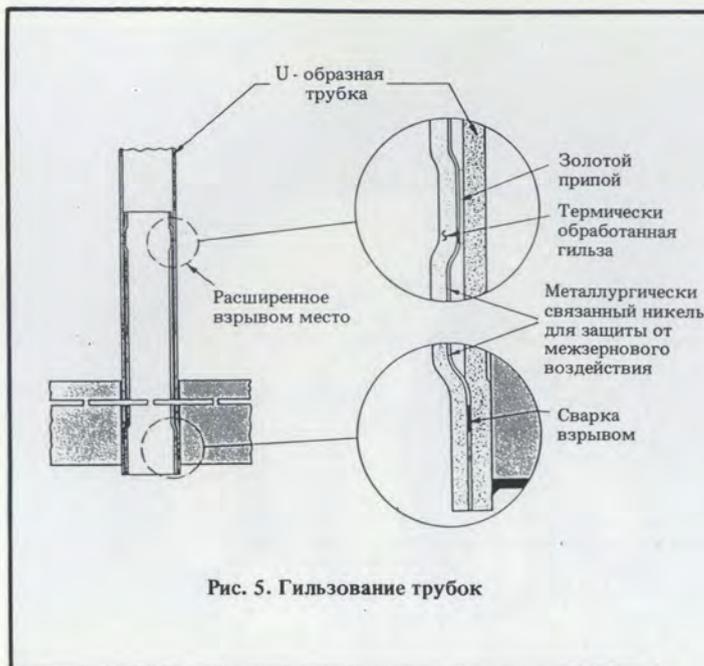


Рис. 5. Гильзование трубок

электростанции, поэтому специально для ремонта трубок была разработана „герметизирующая гильза“. На рис. 5 герметизирующая гильза показана схематически. Она состоит из термообработанной трубки из инконеля-600, плакированной Ni-200 с толщиной стенки примерно 1 мм. После очистки гильза вставляется в дефектную трубку и закрепляется в верхней части пайкой золотым припоем. Гильза в месте спайки сначала расширяется методом взрыва для создания контакта между гильзой и трубкой. Припой остается в двух неглубоких пазах гильзы, тепло подводится индукционным нагревателем, вставляемым в гильзу. Нижняя часть гильзы соединяется с трубкой методом взрывной сварки. Другой метод – механическое расширение – был отвергнут, так как его применение могло привести к возникновению остаточных напряжений больших, чем при взрывной сварке или гидравлическом расширении.

Гильзование трубок парогенератора обладает рядом полезных свойств:

- восстановление структурной целостности парогенератора
- сохранение полной мощности теплообмена
- восстановление теоретического срока службы парогенератора
- быстрое и качественное осуществление

Манипулятор, который может использоваться в качестве универсального устройства для инспекции U-образных трубок парогенератора при низких уровнях радиационного обслуживания, показан на рис. 6. Он может использоваться:

- для неразрушающего контроля, например, методом вихревых токов, ультразвуком, профилометрией, визуальной инспекцией
- для закупоривания трубок взрывными, механически удаляемыми и приваренными пробками



1 – стойка манипулятора с направляющим стержнем, 2 – пневматический цилиндр, 3 – мотор для вертикального перемещения, 4 – основной кронштейн, 5 – кронштейн зонда, 6 – мотор основного кронштейна, 7 – мотор кронштейна зонда, 8 – зонд, 9 – пальцевый замок

Рис. 6. Дистанционно управляемый манипулятор для инспекции и ремонта трубок парогенератора

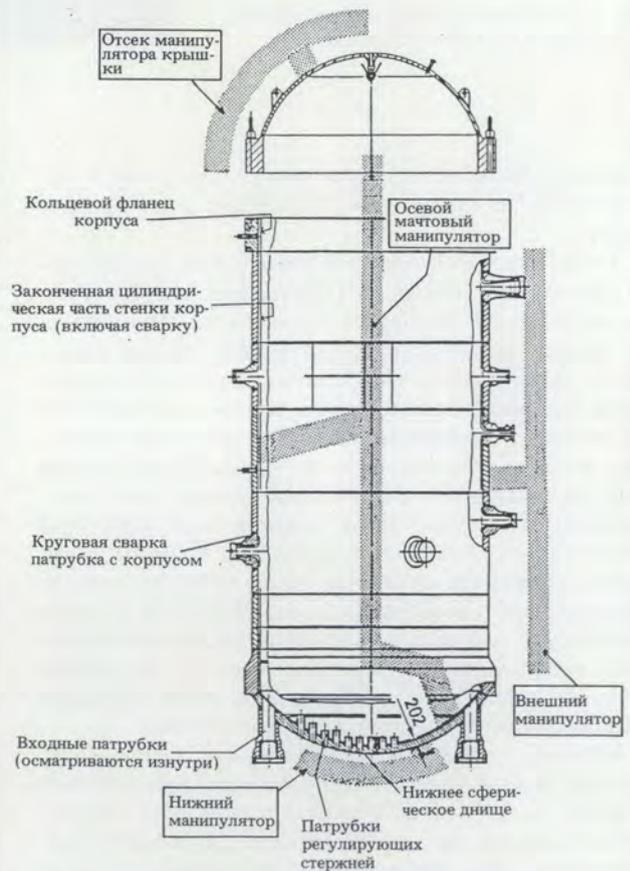


Рис. 7. Зоны проверки полномасштабного корпуса

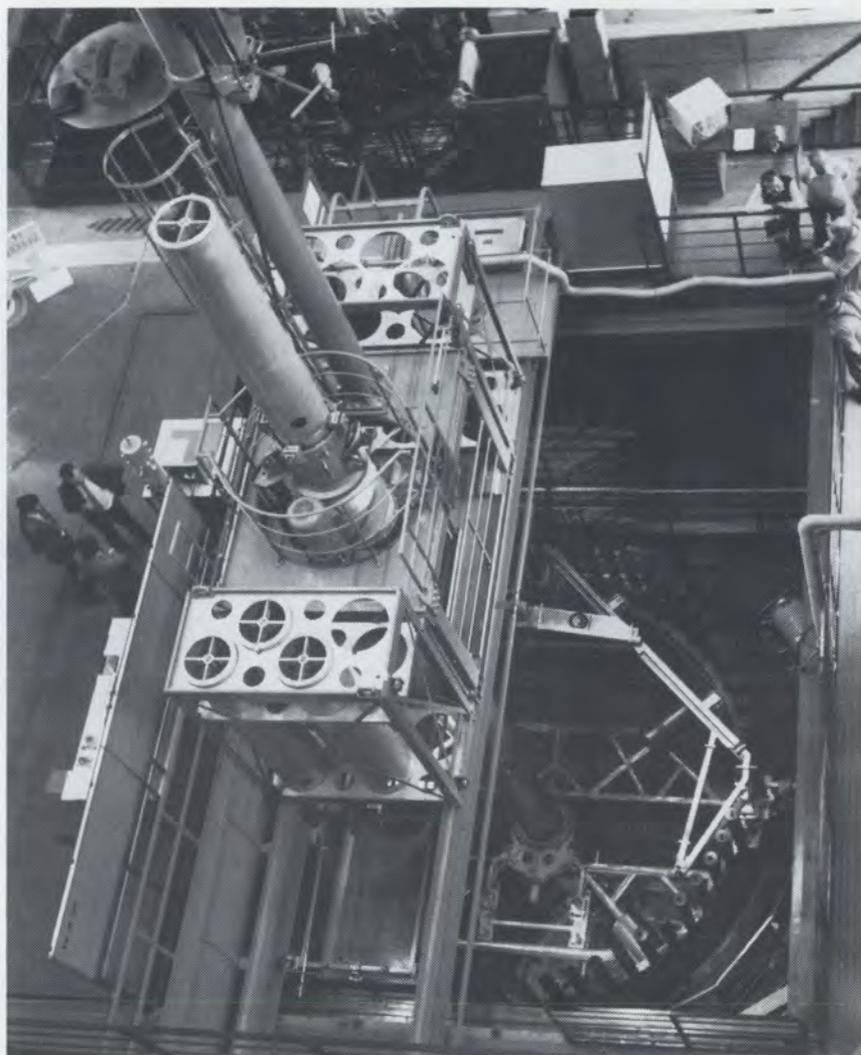


Рис. 8. Осевой мачтовый манипулятор, приспособленный для полномасштабного корпуса

- для ремонта, например, гильзования трубок и удаления протекающих трубок
- для просасывания трубок для последующего обследования

#### Полномасштабный корпус реактора под давлением

Наиболее интересным на выставке был полномасштабный корпус реактора под давлением. Опыт, полученный при основном и периодическом неразрушающем контроле корпусов под давлением, имеет ограниченное применение, так как эксплуатирующиеся корпуса редко имеют трещины, а дефекты изготовления обычно исправляются. В рамках исследований Министерства исследований и технологии ФРГ полномасштабный корпус с большим набором дефектов был передан МРА в Штутгарте. Имеющиеся дефекты используются для аттестации и оценки эффективности широко применяемых методов неразрушающего контроля.

Корпус кипящего водяного реактора под давлением типа (BWR) имеет внутренний диаметр 5875 мм и толщину стенки в цилиндрической части 146 мм. Толщина верхней крышки — 88 мм, а полная высота равна 17 500 мм. Изготовлен в основном из материала A508 класса и содержит различные дефекты структуры, а также патрубки различной формы (рис. 7).

Основная задача исследования — продемонстрировать и проверить эффективность различных новых и недавно разработанных методов неразрушающего контроля совместно с использованием автоматических систем манипуляторов при имитационных эксплуатационных условиях. Методы и концепции проверок будут оптимизированы на основе анализа дефектов и систем. Основные зоны проверки показаны на рис. 7.

#### Осевой мачтовый манипулятор

Осевой мачтовый манипулятор был спроектирован для внутреннего ультразвукового контроля



Рис. 9. Универсальный манипулятор на макете корпуса под давлением

корпуса реактора под давлением. Особое внимание уделялось максимальной универсальности применения в корпусах под давлением (главным образом, реакторов типа PWR) различного размера. Для инспекции осевой мачтовый манипулятор помещается на вспомогательный мостик. Мачта состоит из ряда цилиндрических колонок, центрирующихся некоторым устройством на уровне стоек. Самая нижняя часть несет инспекционные захваты (один горизонтальный для цилиндрической части корпуса

и патрубков и один вращающийся для днища). Соответственный кран делает манипулятор независимым от подъемного крана здания.

Для внутренней инспекции полномасштабного корпуса реактора типа BWR манипулятор был приспособлен для больших размеров (рис. 8). Центрирующее устройство может закрепляться внутри корпуса на различной высоте, обеспечивая 100 %-ную инспекцию.

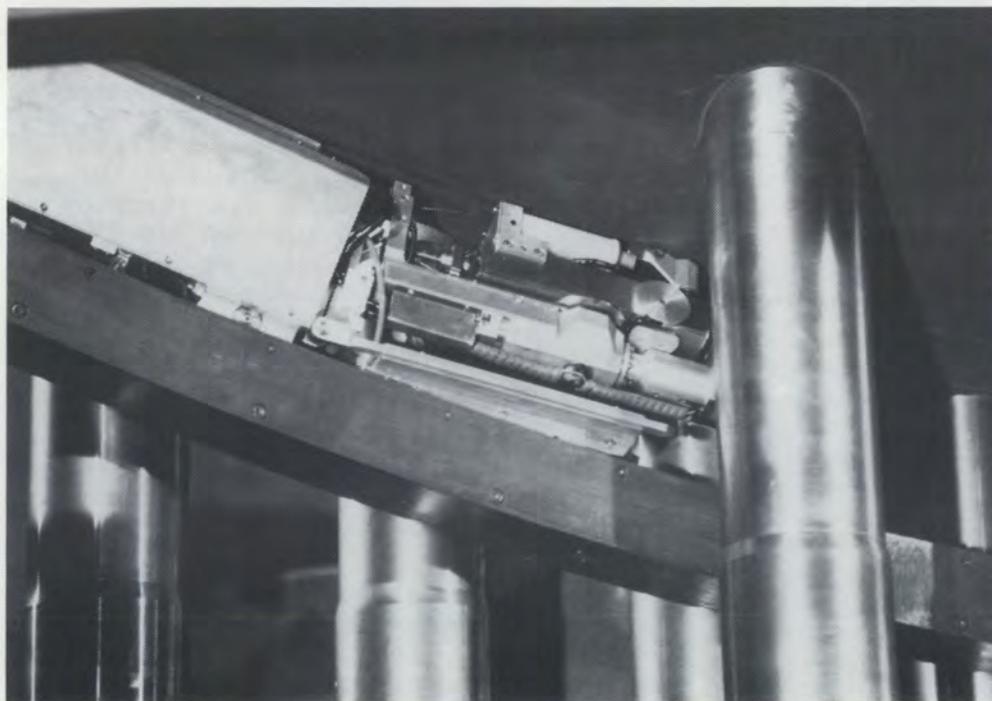


Рис. 10. Манипулятор для инспекции связей в нижнем отсеке

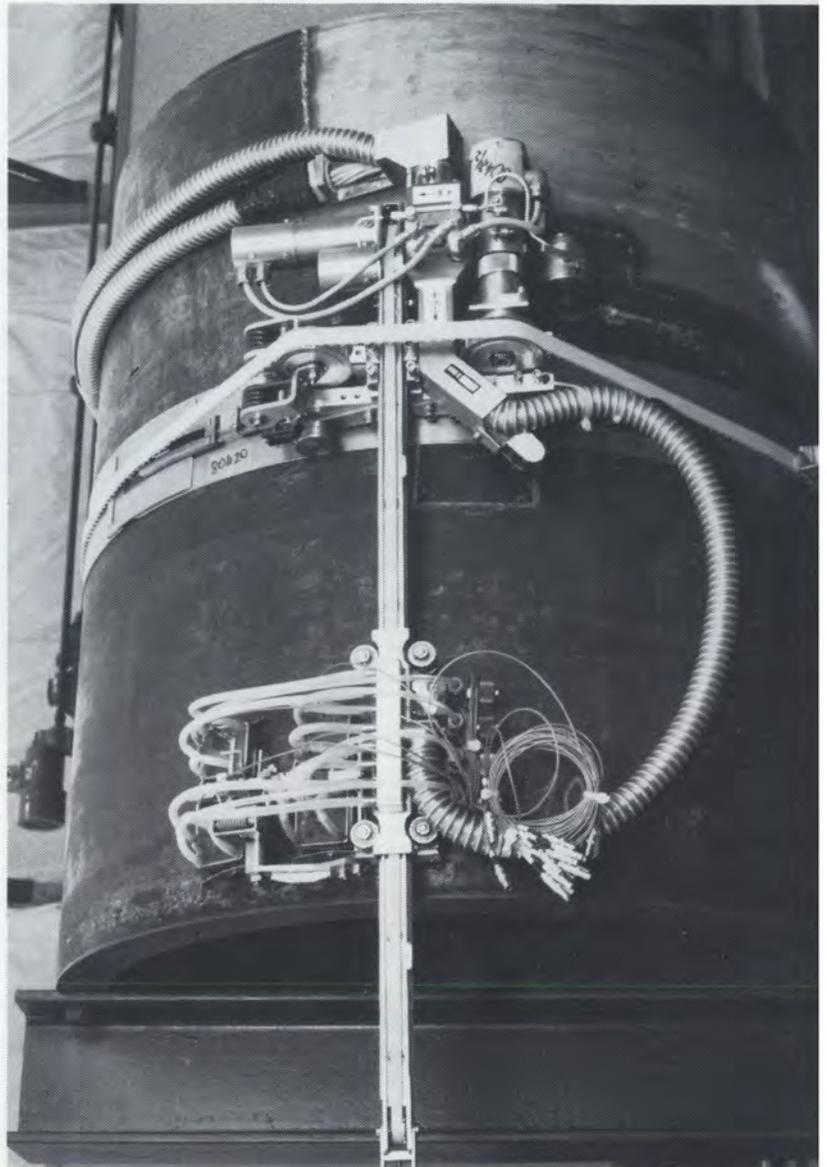


Рис. 11. Ремонтный манипулятор для инспекции трубопроводов

#### Универсальный манипулятор для инспекции корпуса реактора типа BWR

Универсальный манипулятор перемещается по вертикальному направляющему, установленному в зазоре между корпусом реактора и его изоляцией. Может осуществляться полная инспекция цилиндрических частей корпуса реактора типа BWR и патрубков, включая их закругления. Для этого предусматриваются специальное устройство патрубков корпуса реактора и оптимизированная конструкция основного устройства перемещения манипулятора, а также некоторая возможность удлинения захватов, предусмотренных для различных геометрий.

На рис. 9 показан универсальный манипулятор на модели корпуса реактора с частью направляющей, выполненный в масштабе 1:1, и имитацией ограничений перемещений, создаваемых патрубком.

Над имитатором патрубка ясно видна система нообразного зондирования.

#### Манипулятор для инспекции связей в нижнем отсеке

Для дистанционного направления зондирующих модулей при выполнении обязательной периодической инспекции корпусов реакторов под давлением стало обычным применение стандартизованных инспекционных манипуляторов, оборудованных в необходимыми приспособлениями, которые применяются для обзора инспектируемых зон. Кроме того, часто необходимо применять манипуляторы специальной конструкции для инспекции специфических зон или компонентов, особенно в случае, когда требуется проводить инспекцию с внешней стороны.

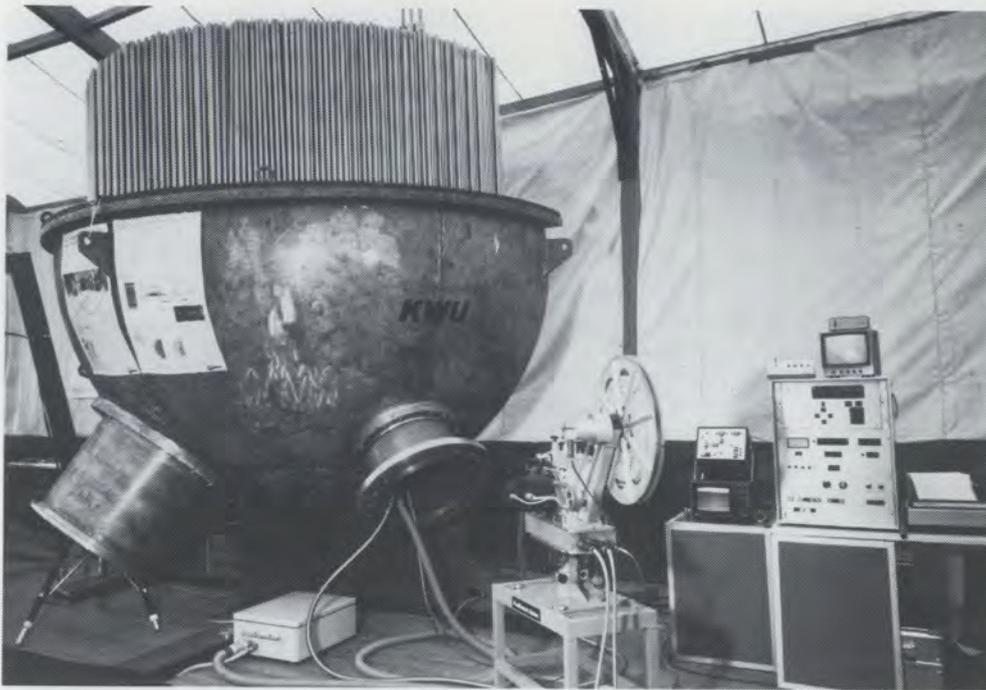


Рис. 12. Макет крышки первого контура с оборудованием для контроля методом вихревых токов

Манипулятор, созданный для инспекции связей в нижнем отсеке, является таким устройством, он спроектирован для направления зондирующих модулей с внешней стороны корпуса реактора типа BWR (рис. 10).

Манипулятор состоит из множества различных компонентов: рельсовых направляющих, зондовой тележки, установок зондирующих модулей, транспортной тележки, консоли электрического и пневматического управления. Зондовая тележка, оборудованная различными сменными зондирующими модулями в зависимости от конкретной задачи, перемещается по системе изогнутых направляющих, постоянно размещенных в проходе между связями. Инспекционная тележка и установка зондирующих модулей перемещаются, дистанционно управляемые, с консоли электрического и пневматического управления. Их текущее положение передается на консоль для индикации и регистрации (вместе с результатами проверки). Транспортная тележка используется для перемещения зондовой тележки с одних направляющих на другие.

Направляющие выполнены в форме открытого сверху желоба с зубчатой рейкой для перемещения зондовой тележки и контролирования положения. Система направляющих поддерживается точно установленными опорами, в которых используется скользящая посадка, что делает их независимыми от теплового расширения. Система направляющих выходит за пределы нижнего отсека, чтобы можно было смонтировать зондовую тележку вне зоны высокой радиации, где также возможно проводить все необходимые работы по обслуживанию и замене зондирующих модулей. Зондовая тележка переме-

щается с помощью собственного двигателя и является системой типа „зубчатое колесо-рейка“. Она спроектирована для перемещения следующих зондирующих модулей, которые присоединяются на шарнирах и могут заменяться в зависимости от потребностей: многокристаллический зонд; консольный кронштейн, позволяющий зонду перемещаться в направлении, перпендикулярном направлению проходов; модуль с тремя отдельными зондами; телевизионная камера и осветители; измерительный щуп для получения пространственных данных.

#### Манипуляторы для инспекции трубопроводов

Эксплуатационная инспекция осуществляется различными манипуляторами, „несущими“ изготовленное в виде модулей основное оборудование. Каждый набор манипуляторов соответствует модульному устройству ультразвукового контроля и системе получения данных.

На рис. 11 изображен ременный манипулятор. Направляющий ремень монтируется вокруг трубопровода вблизи инспектируемой зоны. Каретка с захватом переменной длины, допускающим перемещение в направлении, перпендикулярном к ремню, перемещает зондирующую систему, допуская колебательные движения. Высота манипулятора относительно невелика (около 120 мм), поэтому его можно применять на уже эксплуатируемых станциях. Диапазон размеров исследуемых трубопроводов — от 160 до 1500 мм.

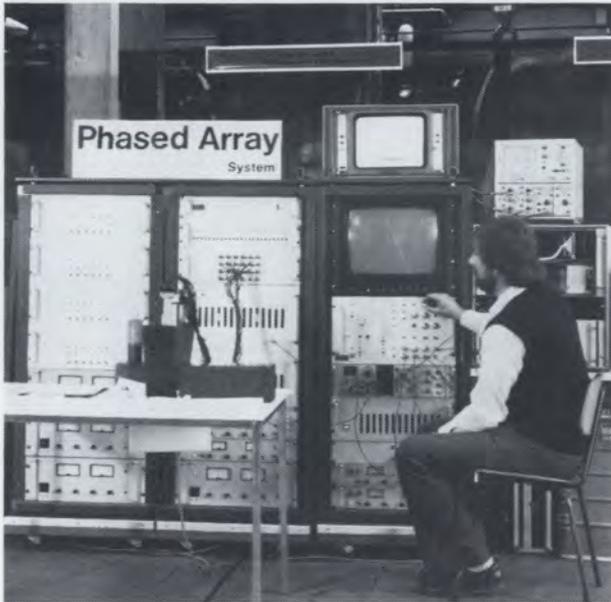
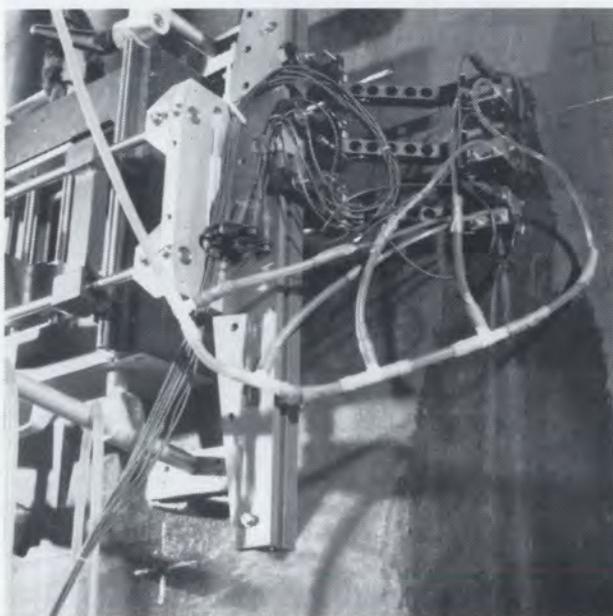


Рис. 13. Сфазированная много-  
рядная система

Рис. 14. Зондовая система ALOK с манипуля-  
тором



### Исследование трубок парогенератора методом вихревых токов

Для гарантии отсутствия протечек радио-ного теплоносителя во второй контур требу-риодическая инспекция целостности тепл-ющих трубок парогенераторов. Так как в-нераторе имеется радиоактивность, увелич-соответствующий риск радиационного об-обслуживающего персонала, то необходим-обследование проводилось быстро и чрез-надежно посредством дистанционно управ-приборов.

Для обнаружения возможных дефектов-зуется метод вихревых токов. Для описания-дефекта в терминах его местонахождения, в-и природы могут использоваться различны-тические методы. Изменения физических-трубок вследствие повреждения выявляют-результату сложения двух наведенных пере-магнитных полей. Одно поле генерируется-тельным зондом и наводит вихревые токи-ке. Они, в свою очередь, создают перемен-нитное поле противоположного знака по отн-к возбуждающему полю. Необходимо испол-каждый раз индивидуальные испытательны-ты, с тем чтобы гарантировать, что ни распо-трубки, ни электропроводящие отложения-нице соприкосновения трубки и гильзы не-на сигнал от трещины, а следовательно, и-ность определения трещин.

С помощью этого метода контроля мож-явить любое уменьшение толщины стенки,-или превышающее 20 %, и установить дефек-ней или внутренней поверхности. Кроме т-время контроля трубок можно определить т-любых отложений со стороны второго конту-

Для выполнения контроля методом ви-токов требуется следующее оборудование:

1. Манипулятор, состоящий из блока уст-приборов питания и управления
2. Многочастотный испытательный прибор н-вых токах
3. Оборудование распознавания и обработ-ных
4. Измерительный контейнер и оборудовани-ления

На рис. 12 показан макет крышки перво-тура с оборудованием контроля методом ви-токов.

### Сфазированная многорядная система

Эта система была разработана Институ-рушающего контроля Фраунхофера Fraunhof-ut für zerstörungsfreie Prüfverfahren (IzfP) для-ного и эксплуатационного контроля неразру-ми методами корпусов реакторов под давл-Система имеет 24 канала, управляемых мик-пьютером. Сдвоенное устройство использует-задержки во времени передаваемых и прини-импульсов. Изменением синхронизирующей ч-можно изменять время задержки. Каждое с-ное устройство имеет два канала. Первый ка-

держивает, соответственно, импульсы синусоидальных колебаний, которые возбуждают после линейного усиления ряд зондирующих элементов. Предварительно усиленные отраженные сигналы задерживаются во втором канале двоянного устройства, суммируются и выводятся на дисплей как А- или В-представление. Синхронизирующие частоты генерируются модулями синтезатора. Расчет синхронизирующих частот и управление временем развертки по осям X и Y дисплея осуществляются микрокомпьютером. Основная частота может изменяться от 0,5 до 5 МГц, а частота следования импульсов от 1 до 20 в секунду. Соответствующим фазированием могут генерироваться продольные, поперечные и поперечно-волновые волны; а соответствующим возбуждением ряда зондирующих элементов можно управлять ультразвуковым полем, фокусируя и придавая ему определенную форму. Мощный электронный пучок, формируемый сфазированным рядом зондов, представляет новые возможности для выявления и классификации дефекта. В основном, можно получить три случая:

- при фиксированном положении зондов дефект обследуется узким звуковым пучком (секторное сканирование)
- зонд перемещается манипулятором и в каждой позиции проводится секторное сканирование. На накопительном дисплее все результаты секторных сканирований складываются (сложное сканирование)
- в каждой точке размещения зонда секторное сканирование проводится открытым пучком, а высота максимального отраженного сигнала в определенном азимутальном направлении фиксируется. Результирующая кривая перемещения амплитуды сложного сканирования непосредственно отражает ориентацию дефекта.

На рис. 13 представлена данная система, подготовленная для исследования проверяемого образца.

### Система ALOK (амплитуда – время прохождения – кривая перемещения)

Система ALOK сконструирована институтом IzfP для эксплуатационной инспекции несущих давление корпусов и компонентов реакторов в качестве системы детектирования дефектов с высокой степенью детектирования и разрешения. Система способна охарактеризовывать дефект. На рис. 14 показана зондирующая система ALOK и манипулятор, установленные на полномасштабном корпусе. Передающая система использует высокочастотные смесители в качестве входных устройств, которые передают все полученные сигналы в систему обработки. Определение пикового значения высокочастотного сигнала осуществляется в системе уплотнения. Время прохождения измеряется, давая глубину трещины; одновременно система уплотнения контролирует состояние указателя глубины трещины и осуществляет уменьшение объема данных.

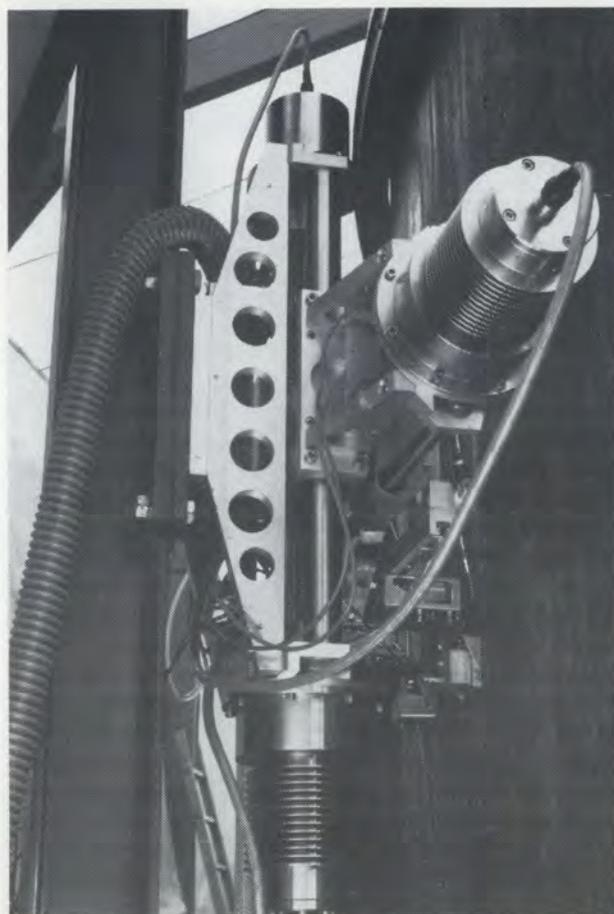


Рис. 15. Манипулятор для анализа методом акустической линейной голографии

Рис. 16. Комплект TRIUMPH диаметром 70 мм



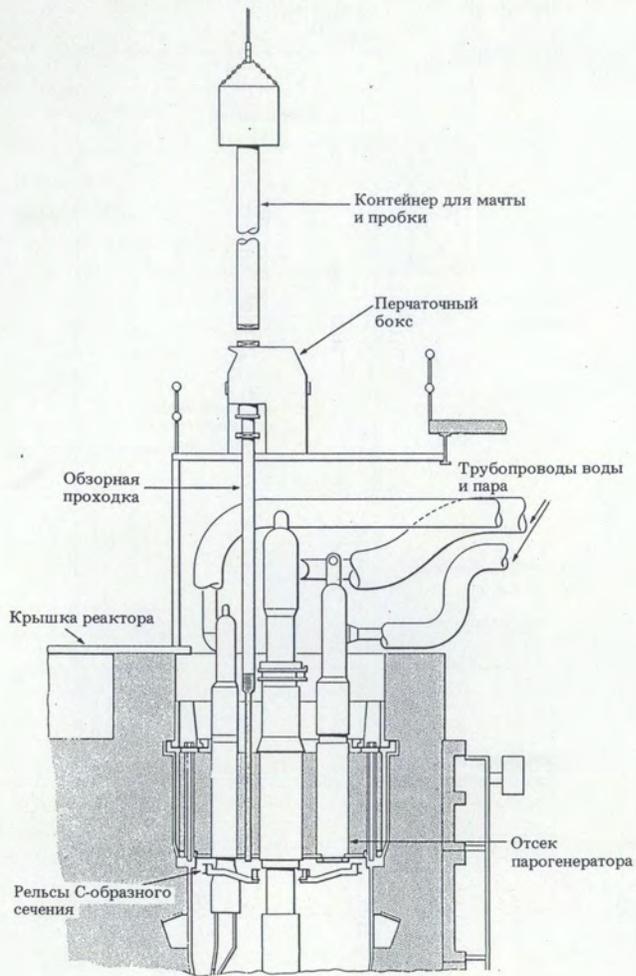


Рис. 17. Оборудование для осмотра отсека парогенератора

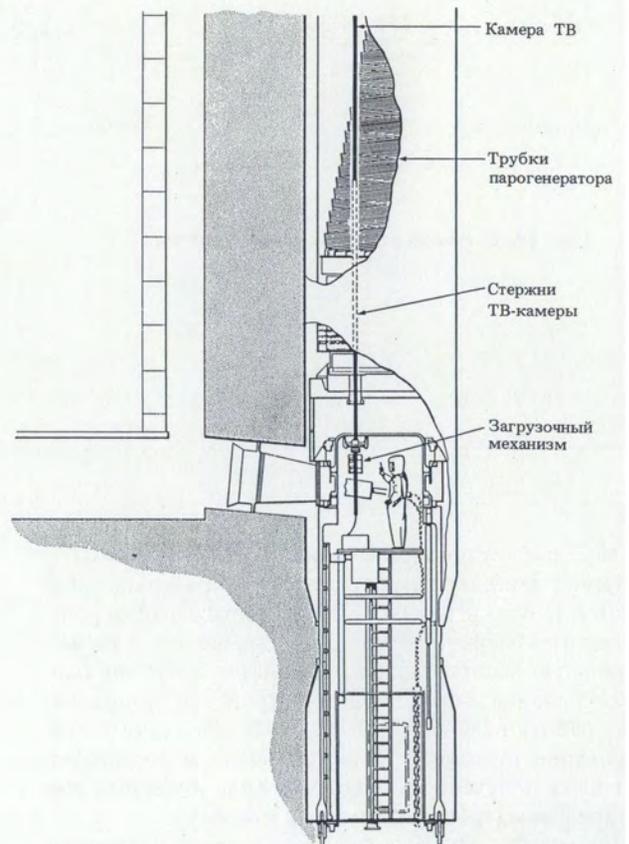


Рис. 18. Оборудование для осмотра трубок парогенератора

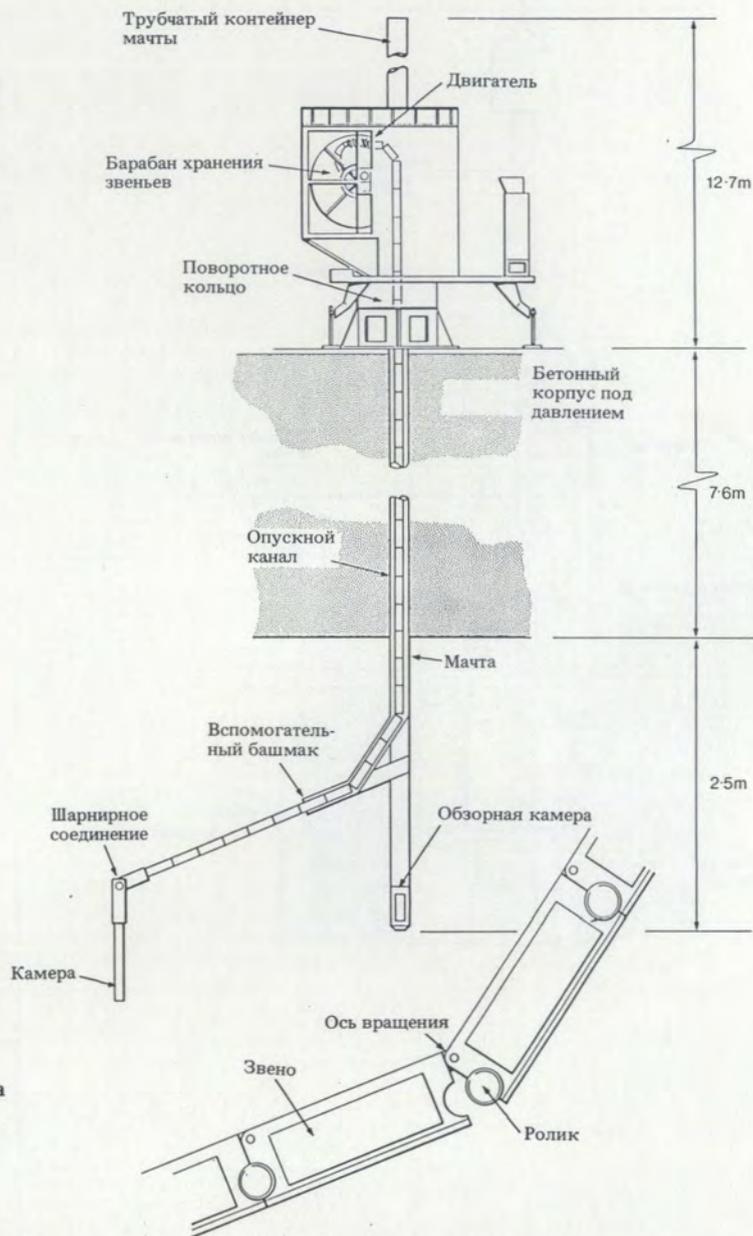


Рис. 19. Схема шарнирного манипулятора

Местные координаты зондирующей системы и значения амплитуды и времени прохождения собираются в блоки данных. После достижения определенного размера блока данные передаются в вычислительную машину или в устройство хранения данных. Главное управляющее устройство координирует работу всей системы. При обследовании А-сканирование отдельных испытательных функций может быть получено на дисплее в виде линейных или логарифмических амплитудных кривых.

По методу AЛОК сигнал от трещины сохраняется, если определенное число полуволн до и после максимума равно или меньше максимума. Решение

зависит от формы сигналов применяемых передатчиков. По этому методу все сигналы, даже определенная шумовая информация, хранятся в зависимости от времени прохождения; соответствующие показания могут быть выделены из стохастического фонового шума по эталонному замеру и эффектам геометрии.

#### Акустическая линейная голография

Акустическая линейная голография является средством анализирования выявленных дефектов посредством определения их размеров. Дефект



Рис. 20. Действующая модель в масштабе 1:15 дистанционно управляемой системы мощных манипуляторов



Рис. 21. Вид верхней части системы мощных манипуляторов, на котором видно отверстие вращающейся кольцевой фермы

„освещается” ультразвуковым зондом с расходящимся пучком. Информация о величинах амплитуды и фазы регистрируется и численно накладывается на эталонную волну. Гол로그램, полученная в результате такой процедуры, может использоваться в качестве основы для воспроизведения ультразвукового поля в полуплоскости ниже линии апертуры.

Для плоских дефектов, ориентированных перпендикулярно к поверхности, более подходит двоянный метод. На рис. 15 показано обследование проверочного блока большого корпуса, имеющего одновременно около 120 искусственных дефектов. Для измерений необходим специальный анализирующий манипулятор (высокоточный и с разрешением местоположения лучше 1/10 длины волны). Он может быть установлен на осевом мачтовом манипуляторе или на манипуляторе первого контура.

#### Дистанционная визуальная инспекция улучшенных газоохлаждаемых реакторов

Британские коммерческие ядерные реакторы проектируются на время службы более 25 лет. Одним из методов, используемых Министерством электрификации для подтверждения сохранения целостности, является периодическая визуальная инспекция внутреннего пространства реактора во время остановок. Для осуществления большинства визуальных инспекций используется модульная телевизионная камера TRIUMPH (рис. 16). Ее полная длина 1000 мм, она охлаждается газом и перемещается различными подъемными устройствами и манипуляторами. Она применялась при окружающей тем-

пературе 120 °С. Радиус обзора — до 6 м. При этом на переднем конце модуля может поворачиваться на 105°. После этого модуля установлена механическая широкоугольная оптическая система с увеличением 6:1, обладающая широким диапазоном фокусирования для рассмотрения объектов на очень близком расстоянии от камеры с использованием фронтального освещения. В модуле телевизионной камеры используется трубка 16 мм низкой стоимости. Задний модуль несет основной световик, который может поворачиваться в любом направлении. Вся сборка может поворачиваться в пределах  $\pm 180^\circ$ . Все функции камеры, оптики и освещения дистанционно управляемые.

Для улучшенных газоохлаждаемых реакторов станций Хартлепул и Хейшам 1 были разработаны дополнительные камеры и манипуляторы для инспекции района верхнего отсека парогенераторных трубок парогенератора. Как показано на рис. 17, каждый отсек парогенератора снабжен двумя постоянными круговыми рельсовыми системами. Компактная сборка с камерой 16 мм, снабженная собственным осветителем, может перемещаться по рельсам, используя систему тележек. Камера имеет дистанционное фокусирование, поворачивается на угол более 180° и охлаждается газом.

После удаления газодувки телевизионная камера для обзора трубок парогенератора вставляется в зазор 25 мм между концентрическими трубками (рис. 18). Камера имеет поперечное сечение 43x18 мм. Она имеет дистанционное фокусирование, поворачивается на угол до 360° и охлаждается газом.

К передней секции с камерой присоединяются удлиняющие стержни для введения камеры в зазор между трубками. Зеркало бокового обзора перед камерой может менять область обзора, позволяя смотреть вперед. Была разработана фотокамера такого же сечения.

Необходимость дистанционной визуальной инспекции колпака газового дросселя привела к разработке манипулятора (рис. 19). Этот манипулятор способен различным образом ориентировать телевизионную камеру. Он может перемещаться на расстояние до 7 м, используя проходной канал реактора диаметром всего 260 мм. Он был спроектирован для проведения визуальной инспекции внутри колпака газового дросселя, а также периферийных участков несущего давления контура.

### Мощные манипуляторы для дистанционно управляемых операций

Приведенные примеры методов неразрушающего контроля свидетельствуют об успехе, достигнутом в выявлении и определении размеров трещин, а также в уменьшении радиационного облучения контролирующего персонала за счет автоматических систем манипуляторов.

В дальнейшем были разработаны дистанционно управляемые мощные системы манипуляторов и к ним ряд автоматических инструментов для механической и термической обработки углеродистых и нержавеющей сталей, что необходимо для ремонтных работ с покрытием корпусов или возможного демонтажа корпуса под давлением, когда потребуются манипуляторы, способные работать с различными автоматическими инструментами в условиях высокой радиации или поднимать тяжелое оборудование. Первым промышленным применением систем таких манипуляторов будет дистанционный демонтаж активированного реактора с несущими давлением трубами, являющийся частью выполняемого

„под ключ” проекта полного снятия с эксплуатации атомной электростанции в Нидеррайбах.

На рис. 20 в масштабе 1:15 показана действующая модель такой системы манипуляторов, установленная на макете станции Нидеррайбах.

Перемещение манипулятора в различных направлениях дополняется поворотом на  $380^\circ$  кольцевой фермы, показанной в виде несущей манипулятор конструкции, установленной на стационарной машине для работы с топливными элементами, размещенной на верхней крышке реактора (рис. 21), на которой работает эксцентричный горизонтальный суппорт. Мачта манипулятора, вращающаяся на угол до  $280^\circ$ , также установлена на горизонтальном суппорте. Вертикальный суппорт, оборудованный универсальным захватом и кронштейном для специального инструмента, перемещается на мачте по вертикали. Существует особое положение, при котором вертикальный суппорт может переместиться от кольцевой фермы до верха мачты. Таким образом в системе специально предусмотрена транспортировка элементов или установленных инструментов с верхнего этажа вниз к рабочей зоне внутри корпуса реактора или в обратном направлении.

Система имеет большую площадь рабочей зоны, равную отверстию кольцевой фермы, и не требует дополнительного крепления внутри корпуса для ее стабилизации. По проекту конструкция способна поднимать три тонны.

### Благодарности

Бюро die Staatliche Materialprüfungsanstalt весьма благодарно за поддержку Brown Boveri Reaktor GmbH, Bopp and Reuther GmbH, CEGB Generation, Development and Construction Division, Fraunhofer-Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren, Kraftwerk Union AG, M.A.N. Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg AG, и Gg. Noell GmbH за подготовку этого сообщения.