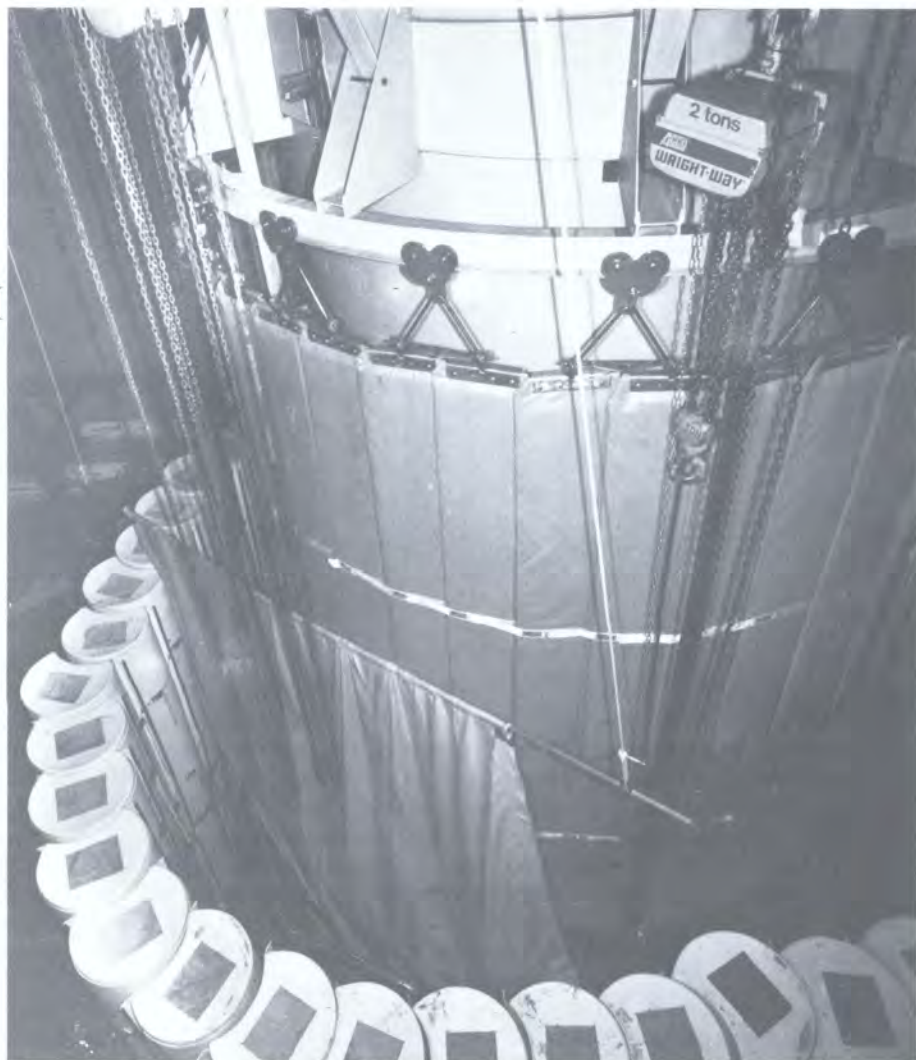


Крышка поврежденного реактора TMI-2 была помещена для хранения на стойку в здании реактора в июле 1984 г. Крышка окружена свинцовыми экранами и колоннами с песком для защиты.

Постоянный прогресс на АЭС TMI-2

Новые достижения подготавливают почву для извлечения топлива из реактора

Синтия Дж. Хесс
и Стефан В. Метцгер



Авария на втором блоке АЭС Три Майл Айленд (TMI-2) 28 марта 1979 г. является одним из наиболее серьезных испытаний философии безопасности АЭС и работы систем по обеспечению безопасности, когда-либо встречавшихся в коммерческом легководном реакторе.

Повреждение активной зоны с соответствующим освобождением продуктов деления в первый контур охлаждения и здание реактора, а также во вспомогательные здания и системы представляет собой наиболее серьезную аварию, имевшую место в ядерной легководной реакторной энергетической системе.

Эта авария представила ядерной промышленности уникальную возможность получить данные о поведении станции во время и после серьезной аварии, связанной с повреждением активной зоны, которые невозможно получить при моделировании серьезных аварий в научно-исследовательских программах. (Несмотря на тяжелые повреждения активной зоны и самой станции, обнаружено, что радиоактивные выбросы в окружающую среду были очень низкими).

Г-жа Хесс и г-н Метцгер — участники программы по TMI от национальной инженерной лаборатории, Айдахо, EG&G Idaho, Inc., USA. (Все фото EG&G).

Возможность приобретения опыта в результате изучения аварии привела к организации объединенной специальной программы, участниками которой стали фирма GPU Nuclear, владелец АЭС, Институт электроэнергетических исследований (EPRI), Комиссия по регулированию ядерной деятельности США (NRC) и Министерство энергетики США (DOE). Программа была разработана с целью получения и анализа данных по аварии и ее последствиям, установления причины аварии, разработки новых методов по ликвидации ее последствий и передачи ядерной промышленности полученной информации и разработанной технологии.

Дезактивация: новая техника и методы

Со времени аварии программа ликвидации ее последствий достигла определенных успехов по ряду направлений. В 1979 г. система очистки воды, названная EPICOR-II, которая в основном использует органические смолы для адсорбции продуктов деления, начала очистку 21 388 м³ воды, скопившейся в результате аварии во вспомогательном здании и здании по обращению с топливом. В том же году персонал провел первую инспекцию здания реак-

тора с помощью телекамеры и приборов для измерения радиации.

В 1980 г. 43000 Ки* радиоактивного криптона было выпущено с учетом мер радиационной безопасности из здания реактора, что позволило рабочим входить в здание в защитной одежде и респираторах.

Компания-владелец АЭС и федеральные учреждения тщательно контролировали выпуск криптона, при этом дозы облучения вне площадки АЭС были значительно ниже норм, установленных правительством.

В следующем году на TMI-2 был опробован новый метод очистки радиоактивной воды. Аппарат, названный погружной деминерализующей системой (SDS), был использован для обработки примерно 22713 м³ высокорadioактивной воды, которая вылилась в подвал здания реактора во время аварии. Похожая на ионно-обменную систему EPICOR-II, SDS действует по тому же принципу, что и домашний аппарат для уменьшения жесткости воды. Подобно тому, как такой аппарат удаляет нежелательные минералы, делающие питьевую воду „жесткой“, SDS удаляет радиоактивность.

SDS отличается от системы EPICOR-II по двум главным параметрам. Во-первых, она действует под водой в бассейне хранилища отработавшего топлива, примыкающего к зданию реактора, тем самым избавляя рабочих от высокой радиации. Во-вторых, SDS использует неорганический материал, называемый цеолитом, для адсорбции из воды продуктов деления. В результате ионно-обменного процесса SDS эффективно удаляет более 99 % продуктов деления (прежде всего цезий и стронций) из загрязненной воды. После того как вода пройдет через баки с цеолитом, она обрабатывается с помощью системы EPICOR-II и хранится в цистернах.

Уровни радиации уменьшились

В марте 1982 г. фирма GPU Nuclear провела первый полномасштабный эксперимент по дезактивации на втором блоке АЭС. DOE оказало содействие в разработке и финансировании трехнедельного эксперимента для определения эффективности различных методов и оборудования для дезактивации больших и сложных поверхностей. Фирма GPU Nuclear, наряду с традиционными, применяет некоторые методы, впервые представленные во время проведения этого эксперимента, для эффективного уменьшения уровней радиации в здании. Владельцы АЭС в середине 1985 г. доложили, что уровни радиации упали до 67 мбэр/ч на уровне входа, 34 мбэр/ч у поверхности пола и до менее 15 мбэр/ч в области перегрузочной машины. Эти значения зна-

чительно ниже 430 и 240 мбэр/ч, соответственно зафиксированных в 1980 г.*

Основным методом дезактивации, используемым в эксперименте 1982 г., было применение гидромониторов: вода под низким и высоким давлением распылялась на пол, стены и поверхности различного оборудования. Другими используемыми методами были удаление кремниевых покрытий, использование скрубберов для очистки полов, а также детергентов и колесных гидромониторов. Недавно рабочие GPU Nuclear скоблили полы, удаляя с них краску и примерно 0,16 см бетона, а затем собирали и упаковывали соскобленное, используя вакуумную систему. Очищенный пол затем заново окрасили.

Уменьшение дозы было достигнуто также благодаря удалению воды из подвала реакторного здания и экранированию других источников радиации. Свинцовые экраны и кирпичи помогли снизить излучение от таких источников радиации, как воздухоохладители на полу у входа и люки, ведущие в подвал здания.

Удаление отходов

В мае 1982 г. первая промежуточная оболочка из системы SDS, содержащая радиоактивный цеолит, была отправлена с TMI. Три такие оболочки были использованы в исследовательском проекте DOE по изучению процессов остекловывания: цеолит с адсорбированными радиоактивными продуктами смешивался с определенными химическими веществами, нагревался до температуры 1323 К и охлаждался до получения стеклянного блока. Испытания подтвердили, что стекло эффективно связывает радиоактивные примеси. Остальные оболочки SDS помещались в специальные бетонные контейнеры и отправлялись для захоронения на одну из площадок правительственной лаборатории.

Контейнер высокой целостности, названный так благодаря своей исключительной конструкции, изготовлен из армированного сталью бетона со стальной внутренней оболочкой, на которую нанесено эпоксидное покрытие для антикоррозионной защиты. Разработанный в рамках исследовательских программ DOE, контейнер высотой 2,1 м и диаметром 1,5 м отвечает федеральным стандартам США и был принят для использования ядерной промышленностью. DOE продолжает наблюдение за оболочками SDS в рамках демонстрационной программы по захоронению, в которой принимаются во внимание такие параметры, как давление, температура, влажность и состав продуктов деления.

Пустота, обнаруженная в активной зоне

В мае 1982 г. рабочие опустили телекамеры в реактор для первичного осмотра разрушений.

* В международной практике кюри было заменено беккерелем, эквивалентным одному распаду в секунду, или $2,7 \cdot 10^{-11}$ Ки.

* В международной практике бэр был заменен зивертом, равным 100 бэр.

Проект, названный „Быстрый взгляд” (ввиду ограниченности программы), дал исследователям конкретные подтверждения реального состояния активной зоны и верхних внутриреакторных устройств. Инженеры, изучавшие полученные данные, пришли к заключению, что большое количество топливных сборок подверглось значительному разрушению с образованием пустоты в верхней части активной зоны и хаотического нагромождения в нижней части.

В следующем году техники получили более ясное изображение пустоты с помощью детального исследования видеозаписи и применения Топографической Системы Исследования Зоны (CTS), специально сконструированной и изготовленной для проекта субподрядчиком DOE — фирмой EG&G Idaho, Inc. Оборудованная ультразвуковыми излучателями, чувствительная головка CTS, опущенная в реактор, посылала ультразвуковой сигнал, который отражался от первого препятствия, на которое он наталкивался, и возвращался обратно к излучателю. Время, за которое сигнал возвращался, позволило определить расстояние до этого препятствия.

По результатам измерений в 500 000 точек оказалось, что каверна, почти симметричная, в некоторых местах простирается до края активной зоны. Объем каверны около 9,5 м³, и в самом глубоком месте она располагается на 2 м ниже блока защитных труб. Всего несколько топливных сборок, расположенных по периферии, оказались неповрежденными. Верхние части топливных сборок свисали с верхних частей блока защитных труб — информация, важная для последующих планов по извлечению блока защитных труб. GPU Nuclear определила глубину нагромождения остатков активной зоны путем проведения серии других измерений: с помощью зондирования стержнем из нержавеющей стали (длиной 11,9 м и массой 59 кг) в 17 местах. С помощью такого зонда они определили, что толщина нагромождения обломков в пределах от 36 до 117 см. Контроль этой операции проводился с помощью тщательно установленных в определенных местах подводных телекамер и источников света, а вся операция была записана на видеоленту. Одновременно прошла испытания новая видеотехника, которая позволит улучшить изображения предметов при низком освещении, например, с экрана видеомонитора.

Образцы, взятые из зоны, помогли исследователям определить состояние активной зоны, а также разработать инструменты и процедуры для будущей выгрузки топлива. Главной задачей было определить температуру, до которой нагрелась активная зона в процессе аварии. Металлургические испытания показали, что температура некоторых элементов активной зоны достигла точки плавления уранового окисного топлива. Такой вывод подтверждается присутствием керамической формы сплава урана и циркония, образующейся, когда таблетки двуокиси урана при высокотемпературном контакте с циркалоевой оболочкой растворяются

в цирконии, образуя жидкую фазу цирконий—уран—кислород, называемую „ожигенным топливом”.

Осмотр внутренней части корпуса

В феврале 1985 г. проводилось дальнейшее изучение состояния активной зоны с помощью первых телеизображений нижней части корпуса реактора. Исследователи обнаружили, по крайней мере, 20 тонн остатков частично расплавленной активной зоны. Тип обнаруженного материала не был точно идентифицирован. Большинство обломков активной зоны было размером с кусок гравия, некоторые обломки зоны были длиной в несколько сантиметров. Предварительно было сделано предположение, что удаление топлива с дна корпуса реактора может быть произведено путем выгрузки его остатков в специальных контейнерах без применения вакуума (см. текст в рамке).

Техники будут продолжать сбор образцов из активной зоны даже тогда, когда начнется выгрузка топлива. Оборудование для бурения активной зоны, с помощью которого рабочие будут получать образцы, заимствовано из нефтегазовой промышленности и специально приспособлено для нового применения. Ученые провели испытания различного коммерчески доступного бурового оборудования с целью установить его способность проникать в топливную сборку TMI-2. Рабочие, которые будут управлять этим оборудованием, проходят обучение в Национальной инженерной лаборатории в Айдахо (INEL).

Реактор разобран, близится выгрузка топлива

Меры по извлечению активной зоны из реактора определились в июле 1984 г., когда крышка реактора была успешно передвинута к месту ее хранения в здании реактора. Крышка была передвинута „всухую” — без заполнения водой канала для перегрузки топлива. Планировщики пришли к заключению, что дополнительная защита в данном случае не требовалась, а заполнение водой канала означало бы последующую дезактивацию канала и очистку воды. Решение убрать крышку „всухую” было основано на информации, полученной по результатам предыдущих радиационных измерений. Обследования замкнутой телевизионной системой поверхностей под крышкой и над блоком защитных труб показали отсутствие заметных повреждений. Испытания извлеченных образцов продемонстрировали, что остатки оборудования не пиррофорны.

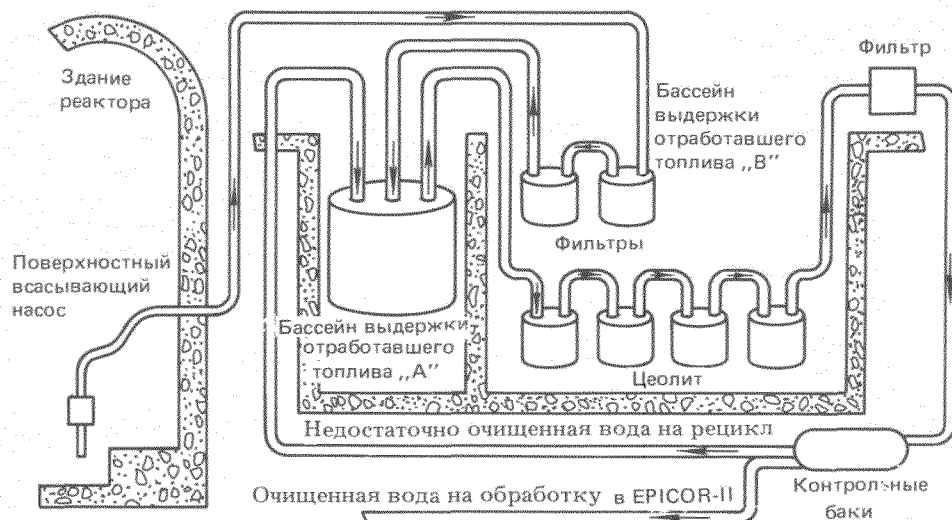
В декабре того же года блок защитных труб весом 49 895 кг был поднят домкратом на 18,4 см, что открыло возможность для подъема сборок из корпуса реактора. Рабочие также разбили свешивающиеся части от нижней поверхности блока защитных труб, уменьшив тем самым количество топлива и остатков, которые могли бы упасть позднее из

ПОТОК РАДИОАКТИВНОЙ ВОДЫ ЧЕРЕЗ EPICOR-II



В системе очистки воды EPICOR-II для адсорбции продуктов деления используются органические смолы. В погружной деминерализующей системе (SDS) используется неорганический материал цеолит, адсорбирующий продукты деления из воды.

ПОТОК РАДИОАКТИВНОЙ ВОДЫ ЧЕРЕЗ SDS



блока во время его транспортировки из реактора к стойке для хранения. При первом поднятии блока защитных труб использовались четыре гидравлических домкрата, каждый проверенный на 45359 кг. Домкраты были индивидуально сконструированы с тем, чтобы их можно было разместить в предназначенном для них пространстве, однако гидравлические цилиндры были стандартными. Четверо рабочих вручную нагнетали жидкость в домкраты из центральной насосной станции, нагрузка на каждом домкрате постоянно контролировалась для предотвращения их разрушения.

После получения первых результатов было решено, что блок защитных труб может быть извлечен без заполнения канала водой, и в мае 1985 г. он был успешно поднят с помощью штатного подъемного устройства и помещен на стойку для хранения в заполненном водой глубоком конце

канала перегрузки. Теперь персонал получил доступ к поврежденному реактору, начальные операции по удалению топлива из которого запланированы на конец 1985 г.

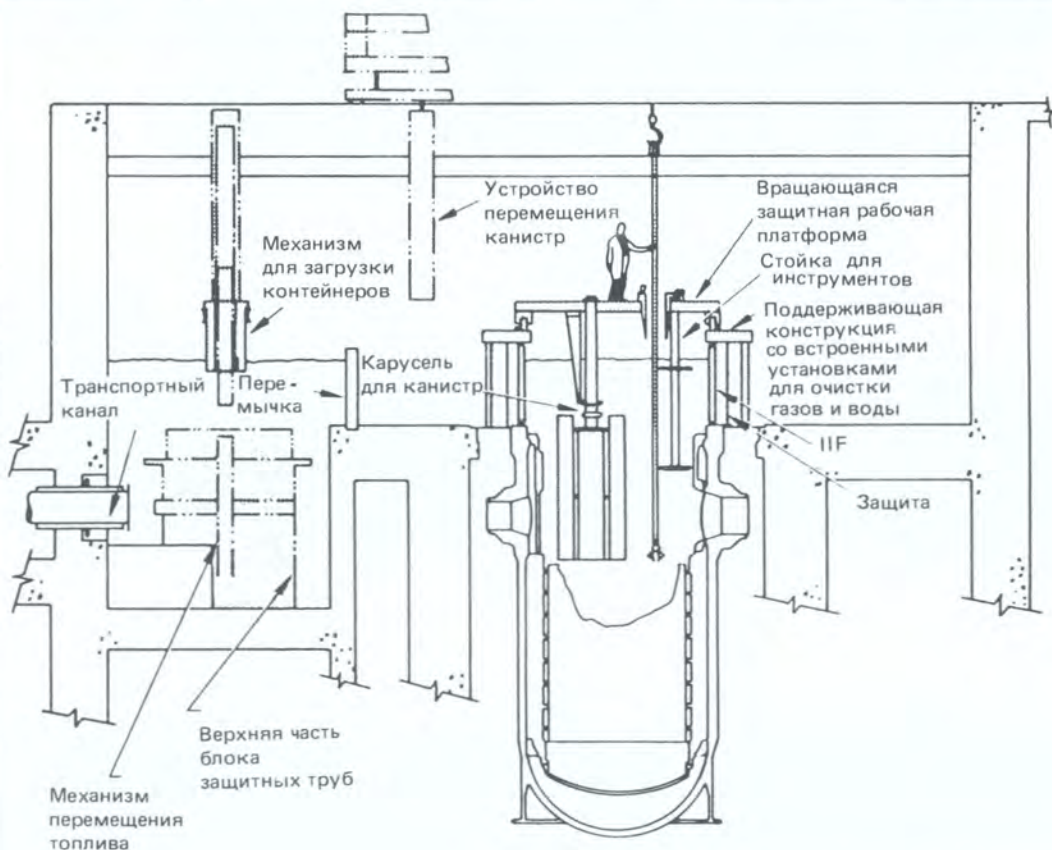
Вымывание цезия из колонн с ионно-обменными смолами

Как раз перед удалением блока защитных труб, в марте 1985 г. фирма GPU Nuclear при технической поддержке субподрядчиков DOE EG&G Idaho и Westinghouse Hanford завершила операции по вымыванию цезия из двух блоков с деминерализаторами на втором блоке TMI. Во время нормальной работы АЭС система химической очистки удаляет примеси из воды в системе охлаждения реактора. Но во время аварии 1979 г. сильно загрязненная радио-

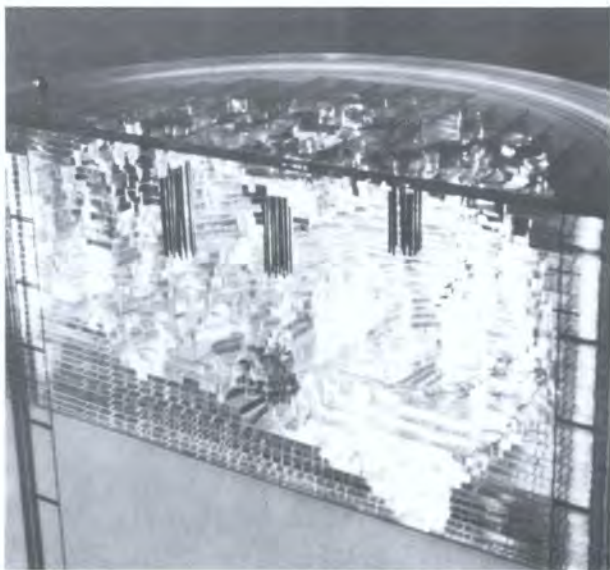
Удаление топлива: следующий важный шаг

Удаление топлива из поврежденного реактора, которое должно начаться в этом году, обещает быть наиболее трудной фазой очистки ТМ1 и может длиться, по крайней мере, весь 1987 г. Всего несколько топливных сборок, если есть такие, остались неповрежденными. Для извлечения топлива и перемещения топливных материалов и обломков команда по восстановлению АЭС разработала новаторскую систему, которая описывается в этой статье.

Главной частью системы, созданной в рамках программы по удалению топлива, является новая экранированная рабочая платформа. Она устанавливается на 2,7 м выше фланца корпуса реактора и может вращаться, обеспечивая доступ рабочим к активной зоне. Эта конструкция является также стойкой для технологического оборудования внутри корпуса реактора, включая вакуумную систему и карусель, которая может держать до пяти контей-



На этой модели первоначальной системы для выгрузки топлива представлены многочисленные средства контроля для обеспечения таких низких уровней радиации, как это практически достижимо. На фотографии видна модель пустоты в активной зоне реактора, изготовленная из пластика (светлая область). С помощью этой модели, полученной по результатам измерений в 500 000 точек с помощью чувствительного ультразвукового прибора, видно, что пустота простирается до края активной зоны. Подвешенные детали в модели имитируют обломки топливных сборок (всего несколько сборок оказались неповрежденными) и регулирующих аксиальную мощность стержней, введенных в зону после аварии.



неров для загрузки остатков топлива. В то же время стальная платформа эффективно защищает от радиации рабочих, стоящих на ней и действующих длинными инструментами через щели в платформе.

Ручные инструменты для начала работ по удалению топлива будут укреплены на ручках длиной от 9,1 до 11,3 м. Среди них плоскогубцы с фиксатором для захвата больших обломков и подгонки шлангов и кабелей, трех- и четырехточечные зажимы для подхвата объектов с кучи обломков, крюки для подъема кусков разных размеров, таких как поддерживающие концевые сборки и крестовины, ножницы для резки одного или двух стержней сразу, гидравлические клинья для отделения и разлома материала для облегчения обращения с ним и использования вакуума, резак болтов для вертикальной и горизонтальной резки, а также крюки и щипцы для подъема и перемещения обломков.

Персонал GPU Nuclear будет выгружать обломки топлива из корпуса в контейнерах, которые затем подвергнутся нескольким операциям по транспортированию и хранению перед отправкой в Национальную инженерную лабораторию в Айдахо (INEL). Обломки небольших размеров будут выгружены из корпуса с помощью вакуума и загружены в специально сконструированные канистры, в то время как более крупный материал будет „захвачен” и помещен непосредственно в другие специальные контейнеры или сперва в корзины, которые затем поместят в эти контейнеры.

Все работы будут производиться в основном при сухом состоянии канала перегрузки топлива; только самый глубокий конец канала будет заполнен водой (для защиты от радиации блока защитных труб, хранящегося здесь же, и канистр, заполненных обломками активной зоны). Защита от реактора будет обеспечена водой системы охлаждения. Одним из пре-

имуществ сухого канала является то, что будет поступать меньше радиоактивной воды, требующей очистки.

После загрузки канистры (срок службы которых не менее 30 лет) будут подняты из корпуса в экранированном контейнере и опущены в глубокую часть канала перегрузки топлива и либо помещены в стойку-хранилище, или перемещены прямо в бассейн выдержки глубиной 12,2 м. В бассейн может поместиться и храниться там, по крайней мере, 280 канистр до тех пор, пока фирма GPU Nuclear не будет готова переместить их в бассейн здания обращения с топливом, где они будут подготавливаться для отправки в INEL.

Заполненные канистры (их количество оценивается от 250 до 280) будут отправлены по железной дороге в Айдахо. Два специальных железнодорожных контейнера, каждый вмещающий одновременно семь канистр с обломками, будут необходимы для этой операции. После разгрузки в Айдахо канистры вернутся на TMI для следующей загрузки и отправки.

Транспортные контейнеры были подвергнуты большому количеству имитационных испытаний с помощью ЭВМ, а модель контейнера в одну четвертую натуральной величины выдержала реальное испытание на падение с высоты. Результаты испытаний показали, что транспортные контейнеры могут надежно сохранять остатки TMI-2 даже при исключительно тяжелых условиях гипотетических аварий. (Контейнеры были сконструированы для EG&G Idaho фирмой Nuclear Packaging, Inc. и содержат две защитные оболочки и запоры, отвечающие критериям по герметичности; таким образом, контейнеры удовлетворяют федеральным стандартам США 10 CFR 71, 63 and ANSI N 14.5).

активностью вода прошла через эту систему, и ионно-обменные смолы в колоннах очистки захватили около 11 000 Ки радиоактивного цезия. В колоннах содержалось также до 4,1 кг частиц топлива из реактора.

После обследования колонн высокоактивные радионуклиды были десорбированы из ионно-обменных смол, а отходы, возникшие в результате этого, были соответствующим образом обработаны. По окончании этой операции радиоактивность цезия в одной колонне была уменьшена примерно на 70, а в другой на 90 %.

Продукты деления были удалены после закачки смеси воды и гидроокиси натрия в колонны, в результате чего произошел обмен ионов Cs в смолах на ионы Na из гидроокиси натрия. В результате Cs больше не было в смолах, он был растворен в воде. В эту смесь была добавлена борная кислота для уменьшения pH. Партии цезий-содержащего раствора были затем отфильтрованы и переданы в бак нейтронизации, после чего они были обработаны системой SDS. Неорганический материал оболочки в SDS поглотил радиоактивность ионно-обменных смол, затем оболочка была подготовлена для от-

правки. Внутренняя оболочка SDS, содержащая около 90 % вымытого цезия, первоначально находившегося в колонне, была отправлена в Rockwell Hanford Operations (лаборатория DOE в штате Вашингтон), где она была захоронена в специальном контейнере в мае 1985 г. Оболочка была принята DOE для научно-исследовательских работ в рамках демонстрационной программы по захоронению.

Почти все контейнеры (46 из 50), использованные для дезактивации воды из вспомогательных зданий, и здания обращения с топливом TMI-2, были также окончательно захоронены. Каждый такой контейнер (называемый предварительным фильтром для EPICOR-II) был помещен в контейнер высокой целостности, обеспечивающий безопасное хранение в течение более 300 лет без всякого риска для окружающей среды. Оставшиеся четыре предварительных фильтра являются частью исследовательской программы NRC.

Образование газов в контейнерах с отходами

Значительные проблемы для безопасности, связанные с обработкой, транспортировкой и хранени-

ем радиоактивных отходов, вызывает образование горючих газов в запечатанных контейнерах с отходами. После исследования проблемы образования водорода NRC потребовала, чтобы в течение 10 дней после запечатывания контейнера и перед его отправкой производитель отходов провел испытания и сделал измерения по содержанию водорода и кислорода в контейнере.

Так как многие производители отходов могут встретиться с трудностями в проведении таких испытаний и измерений, для них единственной альтернативой остается вентилирование контейнеров перед транспортировкой. Новая методика расчета для определения количества водорода, образующегося в запечатанных контейнерах, была разработана EG&G Idaho, подрядчиком DOE. Одобренная NRC, эта методика учитывает количество газа, образующегося на единицу энергии, поглощенной отходами; количество энергии, выделяющейся в результате радиоактивного распада; и незаполненный объем контейнера, включая поры внутри отвержденных отходов. Такие расчеты могут быть проведены на персональном компьютере с использованием известных и точных данных о свойствах радиоактивных отходов.

Уроки по совершенствованию конструкций

В рамках текущей исследовательской программы инженеры изучают влияние аварии, вызванной потерей теплоносителя, на приборы и компоненты TMI-2. Возможность получения сигналов от приборов класса IE, проблемы их электропитания являются весьма важными для управления реактором в течение периодов дополнительной нагрузки на окружающую среду. После проведения серии испытаний исследователи пришли к выводу, что многие аномалии в поведении компонентов были вызваны влиянием возникшей большой влажности. Этот вывод должен повлиять на будущую конструкцию кабелей и разъемов и на улучшение процедур по их изготовлению и установке.

Во время этих испытаний ученые и инженеры признали необходимость разработки системы, которая позволила бы получать сведения о поведении различных компонентов дистанционно. В соответствии с этим требованием была разработана специальная система по снятию параметров электрических схем и их диагностике. Эта система обеспечивает средства для сбора основных данных по электрическим каналам, их организации и хранения для простой обработки и анализа.

Роботы помогают в восстановлении АЭС

В течение последних нескольких лет роботы играли важную роль в программе восстановления TMI-2, способствуя уменьшению облучения рабочих. К настоящему времени использовались пять

отдельных машин для взятия проб в местах, в которые не мог войти персонал до тех пор, пока не уменьшится уровень радиации и не закончится обследование.*

Робот SISI (для наблюдения и технического обслуживания) представляет собой крошечную машину, похожую на танк, весом 11,3 кг, которая использовалась для фотографирования и радиологических инспекций. Применялся также робот весом 181 кг с механической рукой, способной поднимать груз в 68 кг. Этот робот мог проводить распыление воды под высоким давлением и был снабжен телевизионным оборудованием.

„Rover-1” — машина весом 454 кг, оборудованная тремя телевизионными камерами и двумя радиационными детекторами для проведения непрерывного контроля. Другая подобная машина, „Rover-2”, была дополнительно оборудована буровым устройством для получения образцов бетона из стен подвала. Робот „Louie” снимал радиационные показания и осуществлял дезактивацию небольших площадей.

В настоящее время проектируется робот, названный Workhorse („рабочая лошадка”); его поставка запланирована на начало 1986 г. Этот робот будет самой большой, наиболее мощной машиной такого типа, использованной до сих пор на TMI, и будет иметь компьютерный интеллект, позволяющий ему совершать повторяющиеся действия.

Технологический фонд

В настоящее время инженеры изучают возможные подходы по удалению топлива из нижней части реактора и территории около него, куда остатки топлива попали в результате аварии. Во время подготовки операции техники проводят радиологические обследования с целью определения местонахождения топлива и продуктов деления. Эта работа, дополнительно к работам, проводимым в течение предыдущих шести с половиной лет, обеспечит технологическую основу для формулирования решений по окончательному восстановлению АЭС TMI-2.

С момента аварии в 1979 г. усилия GPU Nuclear по восстановлению АЭС и научно-исследовательская и опытно-конструкторская программы DOE США на TMI продолжали уверенно продвигаться вперед. Каждый шаг исследований давал ответы на очень важные вопросы о причинах и последствиях аварии. Некоторые достижения были просто выдающимися. Но персонал по восстановлению станции рассматривает достигнутый прогресс как естественные решения ежедневных проблем, которые ставит перед ним уникальная ситуация. Одновременно информация передается ядерной промышленности.

* См. статью „Роботы для АЭС” в Бюллетене МАГАТЭ, том 27, № 3 (Осень 1985 г.).



Захоронение демонстрационного контейнера „высокой целостности“, содержащего предварительный фильтр EPICOR-II, на экологической площадке США для низкоактивных отходов.

