

*Р.Ф. Арутюнян\*, А.А. Боровой*

*Извлечение ядерного топлива из аварийных реакторов  
(Чернобыль и Фукусима)*

*Часть 1. Чернобыль.*

*Под редакцией академика Е.П. Велихова*

-----  
\* ИБРАЭ РАН

## ВВЕДЕНИЕ .

В настоящем обзоре рассматривается ситуация, сложившаяся в настоящее время (начало 2019 г.) на Чернобыльской АЭС (Часть 1) и на АЭС Фукусима-1 (Часть 2), при решении одной из важнейших (и труднейших) задач, возникающих при ликвидации последствий крупных аварий (ЛПА).

**Эта задача - извлечение из блоков разрушенного ядерного топлива и переводом его в контролируемое состояние.**

Работа разбивается на три этапа:

- определение мест нахождения и состояния этого топлива,
- собственно извлечение и
- обеспечение его безопасного и длительного хранения.

До сих пор, опыт проведения подобных работ имелся только на АЭС Три Майл Айленд (ТМА) в США . К сожалению, использование этого опыта для других крупных аварий ограничено, из-за отличия типа реакторов, хода протекания аварии и ее масштаба.

### **Три Майл Айленд**

В конце марта 1979г.на ТМА (см., например, [B1, B2]) в результате нарушения охлаждения активной зоны часть твэлов была повреждена, а образовавшийся **кориум** – расплавленная, смесь материалов активной зоны, опустился в нижнюю часть корпуса реактора.

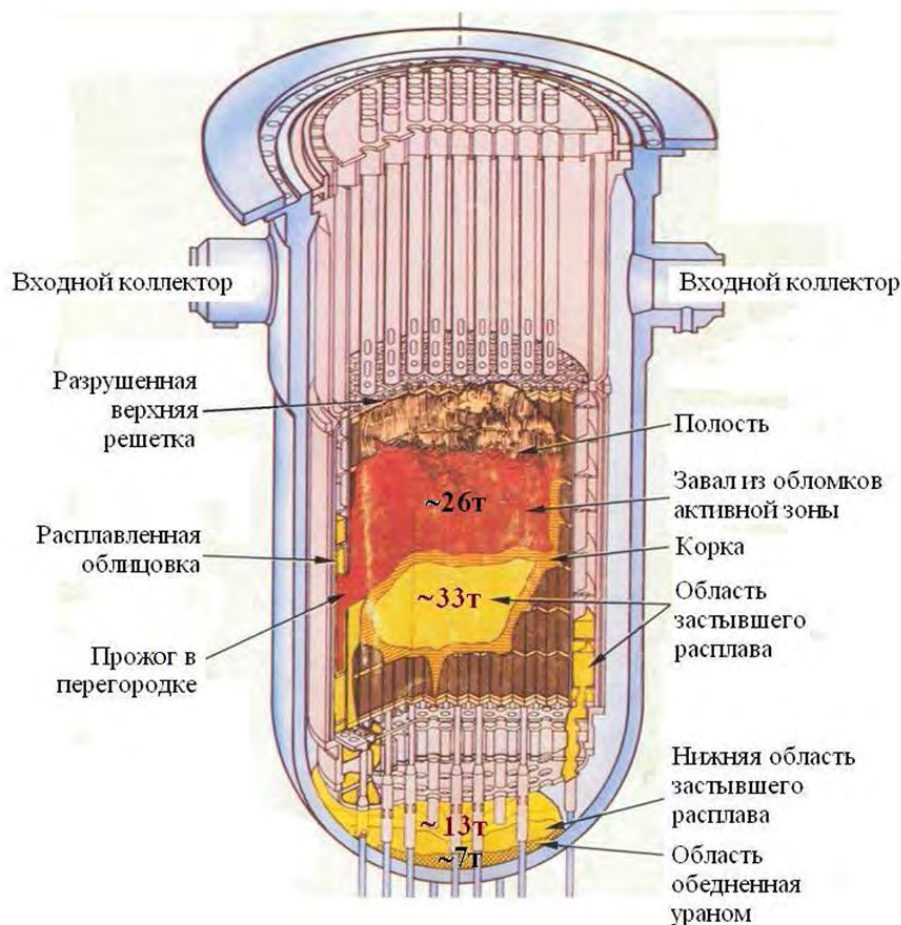


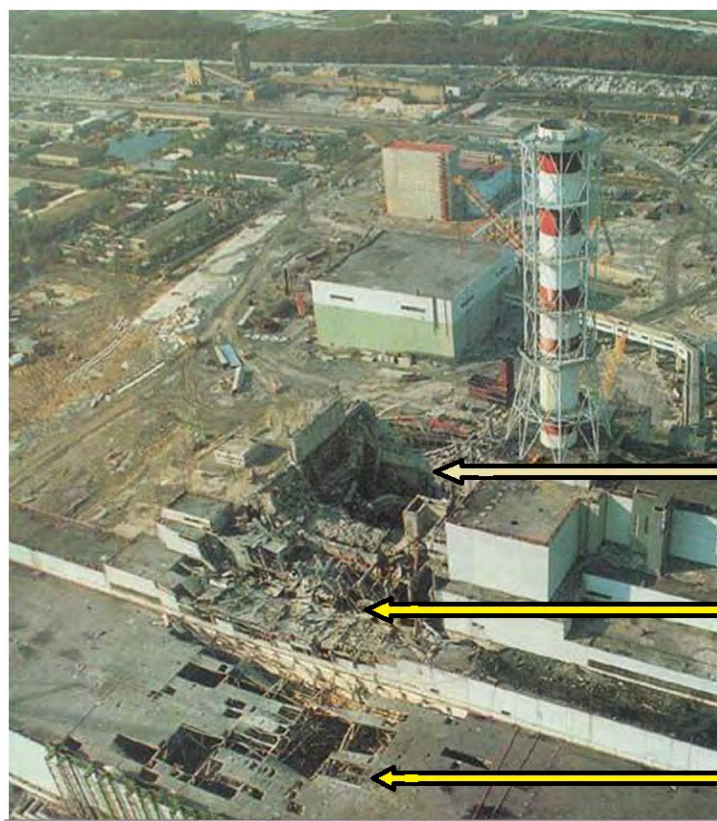
Рис. 1. Авария на АЭС ТМА. Накопление расплава на днище реактора.

При этом кориум не смог прожечь корпус и подавляющая часть радиоактивности осталась внутри последнего. Это определило масштаб аварии<sup>1</sup>.

За пределами площадки станции загрязнения оказались незначительными. Согласно международной шкале ядерных событий аварии был присвоен **5-ый уровень опасности** [3]<sup>2</sup>. Ликвидация последствий аварии на ТМА официально продлилась до 1993г. т. е. потребовала около 14 лет. То, что топливо находилось внутри реактора, облегчило его извлечение - в качестве основной биологической защиты использовался слой воды, покрывающий загрязненные внутренние конструкции. Под водой происходило дробление, а затем, подъем радиоактивных обломков. Тем не менее, работы по извлечению продолжались около 5 лет - начались в октябре 1985 г., а завершились в январе 1990 г. Они потребовали значительных материальных ресурсов (почти 2 млрд. долларов) и создания новых технологий, в том числе, конструирования специальных робототехнических устройств.

### **ЧАЭС.**

Первопричиной чернобыльской аварии (см., например, [B4 - B9]), произошедшей в ночь на 26 апреля 1986г. на 4-ом блоке ЧАЭС, стал неуправляемый разгон аппарата на мгновенных нейтронах (так называемая «реактивная» авария). В результате произошедшего взрыва образовавшегося водорода оказались полностью разрушенной активная зона и вся верхняя часть здания реактора, сильно пострадали и другие помещения и сооружения. Были уничтожены барьеры и системы безопасности, защищавшие окружающую среду от радионуклидов, наработанных в топливе (рис. 2).



*Рис. 2. 4-ый блок  
ЧАЭС после аварии  
(съемка с  
вертолета).*

Разрушенный  
Центральный  
зал реактора

Разрушенная  
деаэрационная  
этажерка

Поврежденная  
кровля  
машинного зала

<sup>1</sup> Во время аварии на ТМА-2 не произошло взрыва водорода, образующегося при пароциркониевой реакции. Происходили лишь локальные его возгорания которые не привели к серьёзным последствиям.

<sup>2</sup> Шкала INES (International Nuclear Event Scale) разработана Международным агентством по атомной энергии в 1988 году и с 1990 года используется в целях единообразия оценки чрезвычайных случаев, связанных с аварийными радиационными выбросами в окружающую среду на атомных станциях.

5 уровень соответствует аварии «с возникновением риска вне объекта»..

В аварийном блоке возник пожар. При этом **выброс активности в окружающую среду на уровне миллионов Кюри в сутки**, продолжался в течение 10 дней с 26.04.86. по 06.05.86., после чего резко упал (в тысячи раз) и в дальнейшем продолжал уменьшаться.

Всего за пределы АЭС было выброшено следующее количество радионуклидов (в процентах от накопленного до аварии):

- радиоактивных инертных газов – 100%,
- радионуклидов йода, в том числе  $^{131}\text{I}$  - (50 – 70)%,
- $^{137}\text{Cs}$  и  $^{134}\text{Cs}$  -  $(33 \pm 10)\%$ ,
- нелетучих радионуклидов в составе частиц диспергированного ядерного топлива (среди них  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{144}\text{Ce}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  и многих других) – до 5% [B5, B8].

Именно выбросом активности определялся масштаб чернобыльской аварии.

В результате она затронула жизнь миллионов людей. Сотни тысяч из них были эвакуированы с загрязненных территорий Украины, России, Белоруссии. Другие сотни тысяч непосредственно участвовали в создании «Укрытия» («Саркофага») над разрушенным 4-ым блоком, в дезактивации других блоков и площадки станции, в работах в чернобыльской зоне отчуждения и временного отселения, в строительстве нового города Славутич и т.п.

### ***Аварии был присвоен наивысший 7-ой уровень опасности***<sup>3</sup>

Как следует из приведенных оценок основная часть **летучих** радиоактивных соединений вышла за пределы станции.

В тоже время подавляющее количество отработавшего **ядерного топлива** ( $\geq 95\%$ ), содержащего нелетучие радионуклиды, в том числе более 600 кг плутония, осталось в развалинах блока. Топливо могло представлять значительную опасность (ядерную, тепловую, радиационную), а информация о его местоположении и физико-химическом состоянии практически отсутствовала. Поэтому, сразу же после окончания активной стадии аварии началась работа по поиску и исследованию скоплений топлива во внутренних помещениях.

Эта работа продолжалась и после возведения над 4-ым блоком объекта «Укрытие», позволившего максимально возможным образом изолировать окружающую среду от открытого радиоактивного источника, который представлял собой разрушенный блок (рис. 3)<sup>4</sup>.

Обнаружению топлива в «Укрытии» препятствовали огромные радиационные поля, завалы конструкций, оставшиеся после взрывы и большие объемы застывшего бетона, попавшего в помещения при строительстве объекта.

Только в начале 1988г., благодаря применению новой технологии, работа стала успешно продвигаться, и к началу девяностых годов основная часть ядерного топлива, находящегося в блоке, была обнаружена и взята под контроль (ниже мы более подробно остановимся на этом вопросе).

Были приняты меры, способные предотвратить возникновение аварийных ситуаций.

Полученные к настоящему времени оценки топливного баланса при аварии на ЧАЭС представлены в виде диаграммы на рис. 4.

---

<sup>3</sup> Авария 7-го уровня характеризуется большим выбросом радиоактивности в окружающую среду (радиологический эквивалент более нескольких десятков тысяч ТБк I-131): тяжёлые последствия для здоровья населения и для окружающей среды.

<sup>4</sup> Благодаря огромным усилиям ученых, проектировщиков, строителей, объект этот был возведен в рекордно короткие сроки (~ 6 месяцев).





Рис.3. «Укрытие» 4-го блока ЧАЭС. Зима 1987г.



Рис.4. Оценки топливного баланса [8].

Одновременно с повышением текущей безопасности «Укрытия» начали проводиться и работы по подготовке к его преобразованию в полностью экологически безопасное состояние. Дело в том, что к 1990г. специалисты смогли подробно обследовать большинство помещений «Укрытия» и выяснить, что платой за рекордно короткие сроки создания объекта (6 месяцев) стала не только большая коллективная доза, полученная строителями, но и принципиальные недостатки самого объекта, делавшие достаточно ограниченным срок его службы.

Первый из крупных недостатков «Укрытия» - существенная негерметичность. Из-за больших радиационных полей невозможно было приблизиться к устанавливаемым конструкциям, добиться их подгонки и минимальных щелей, применить сварку. В результате общая площадь щелей в кровле и стенах объекта составляла около 1000 м<sup>2</sup>.

Это означало, что радиоактивная пыль могла выходить из «Укрытия», а вода от дождей и снега – попадать внутрь.

Второй принципиальный недостаток - неопределенная прочность старых опор, на которых опирались новые конструкции «Укрытия». Эти опоры были ослаблены взрывом и пожаром. Их прочность измерить не удалось и в случае сильного землетрясения, которые случаются в этой местности один раз в 100 – 200 лет никто не мог гарантировать, прочность объекта.

Поэтому еще в 1989г. сотрудники «Курчатовского института» С.Т. Беляев и А.А. Боровой создали концепцию преобразования «Укрытия» [В7] .

Главное в их предложении - построить над существующим объектом еще одну герметичную оболочку (**Новый безопасный конфайнмент - НБК**), которая гарантировано прослужила бы многие годы (желательно ~100 лет) и позволила защитить внешнюю среду от радиоактивных выбросов и сбросов при любых внешних воздействиях – землетрясении, торнадо и т.п.

Полученный выигрыш во времени позволил бы разработать новые технологии и с их помощью безопасно извлечь, а потом, захоронить радиоактивные материалы и ядерное топливо.

Концепцию поддержали в Минсредмаше СССР и в Украине (начиная с 1991г. Чернобыльская АЭС перешла под ее юрисдикцию).

В результате, Украинское Правительство решило провести Международный Конкурс на преобразование «Укрытия» в экологически безопасную систему.

**17 июня 1993 г.** Конкурс был завершен. Его главным результатом стала выработка стратегии дальнейших работ по созданию НБК. И стало очевидным, что эта стратегия потребует очень больших материальных затрат. Надо было обращаться к международной помощи.

Потребовалось еще несколько лет, чтобы в результате взаимодействия Комиссии Европейского Содружества, Украины, США и групп международных экспертов был выпущен **«План осуществления мероприятий на объекте «Укрытие» (Shelter Implementation Plan - SIP)** и тем самым намечен конкретный путь создания НБК [7 - 9]

**В июне 1997 г.** на встрече стран Большой семерки в г. Денвере (Канада) SIP был окончательно согласован и утвержден.

**В ноябре 1997 г.** в Нью-Йорке состоялась конференция стран-доноров, которые взяли обязательства по выделению средств на реализацию данного плана в специально созданный Чернобыльский Фонд - «Укрытие».

Основная конструкция НБК – металлическая «Арка»<sup>5</sup> [В10] Она должна была быть собрана по сегментам на безопасном удалении от «Укрытия», а потом надвинута на него (рис. 5).

При конструировании НБК перед создаваемым объектом были поставлены две главные задачи:

---

<sup>5</sup> Арка - самая большая подвижная конструкция в истории человечества. Высота ее равняется высоте центрального пролета моста «Золотые ворота» в Сан-Франциско.

НБК, по заверениям конструкторов, с легкостью выдержит и рухнувший самолет, и смерч класса 3 (вероятность его  $10^{-6}$  год) и землетрясение интенсивностью в 6 баллов по шкале MSK 64 ( $10^{-5}$  год), снеговые нагрузки и перепады температуры в диапазоне от  $-43$  до  $+45^{\circ}\text{C}$ .

Кроме того, Арка защищает находящиеся внутри объекта «Укрытие» топливосодержащие материалы (ТСМ) от попадания влаги, ветра, перепадов температур и прочих деструктивных факторов, приводящих к диспергированию ТСМ.

- обеспечить долговременную (~ 100 лет) защиту персонала и окружающей среды от радиационной и ядерной опасности, связанной с «Укрытием» и

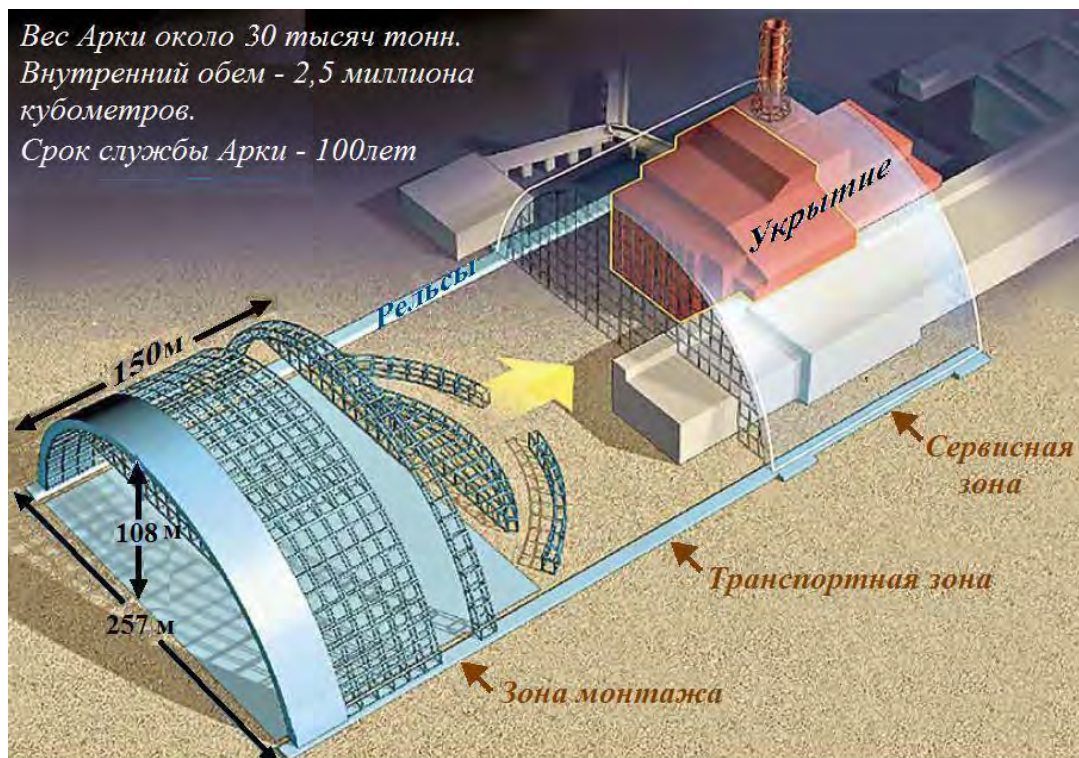


Рис.5. Арка и схема ее продвижения на объект «Укрытие»

- максимально способствовать деятельности по преобразованию объекта в экологически безопасное состояние, в том числе способствовать обеспечению работ по извлечению ядерного топлива и обращению с РАО.

К сожалению, как это часто бывает, правильно оценить все трудности на намеченном пути не удалось. Не удалось и должным образом организовать работу. Срок окончательного создания НБК постепенно переносился, а проектная стоимость быстро увеличивалась (рис. 6).



Рис. 6. Изменения стоимости НБК со временем.

В результате, только в 2017 г. был достигнут решающий успех в реализации проекта. На существующее «Укрытие» была надвинута металлическая Арка. Позднее с торцов ее закрыли специальные конструкции (рис.7).

Согласно закону Украины «Об Общегосударственной программе снятия с эксплуатации Чернобыльской АЭС и преобразовании «Укрытия» в экологически безопасную систему» [11] дальнейшее преобразование объекта предусматривает



извлечение из объекта ТСМ, высокоактивных и долгоживущих РАО, перевод их в безопасное состояние, промежуточное контролируемое хранение и захоронение<sup>6</sup>.



Рис. 7. 2017г. Над объектом «Укрытие» возведено здание НБК.

Возможная последовательность действий в этом направлении была представлена руководством ЧАЭС. на семинаре «Развитие площадки Чернобыльской АЭС» в 2013г. (см. график на рис. 8).

#### Возможный график преобразования объекта "Укрытие"

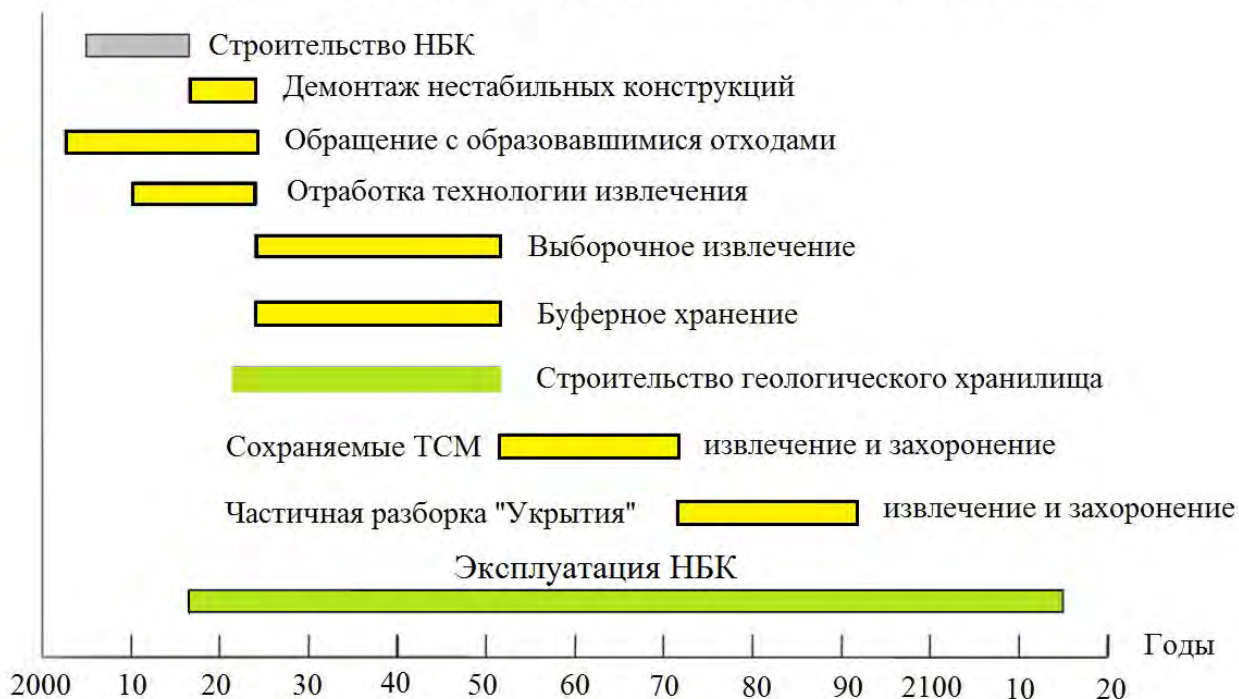


Рис. 8.

<sup>6</sup> Промежуточное хранение может быть организовано либо в централизованном хранилище в зоне отчуждения, либо непосредственно на промплощадке ЧАЭС.

Из графика видно, что строительство НБК в 2013г. планировалось завершить к концу 2015г. К этому сроку «Арка» должна была находиться в рабочем положении и быть герметизирована, технологические системы жизнеобеспечения и контроля состояния НБК введены в эксплуатацию и подключены к внешним инженерным коммуникациям ЧАЭС. Как уже говорилось, выполнить это удалось почти тремя годами позже. В момент написания настоящего обзора (2018г.) завершено строительство «Арки», выполнено ее продвижение на «Укрытие», идет герметизация нового контейнмента и монтаж технологических систем жизнеобеспечения.

Далее предполагается принять НБК в эксплуатацию и переключиться на демонтаж нестабильных конструкций объекта «Укрытие».

Итак, практически завершена одна из задач по ликвидации последствий аварии на ЧАЭС. Но останавливаться не приходится.

***«С созданием локализующей оболочки только и начнется сложная и еще более затратная работа по приведению топливосодержащих материалов объекта «Укрытие» в контролируемое состояние. И только после этого, перед следующими поколениями специалистов встанет задача обеспечить безопасное хранение этих материалов, хотя бы первую тысячу лет»<sup>7</sup>***

Сейчас предполагается, что в результате продолжающихся работ «Укрытие», окруженное оболочкой НБК, через 100 лет приобретет вид, показанный на схемах рис. 9.

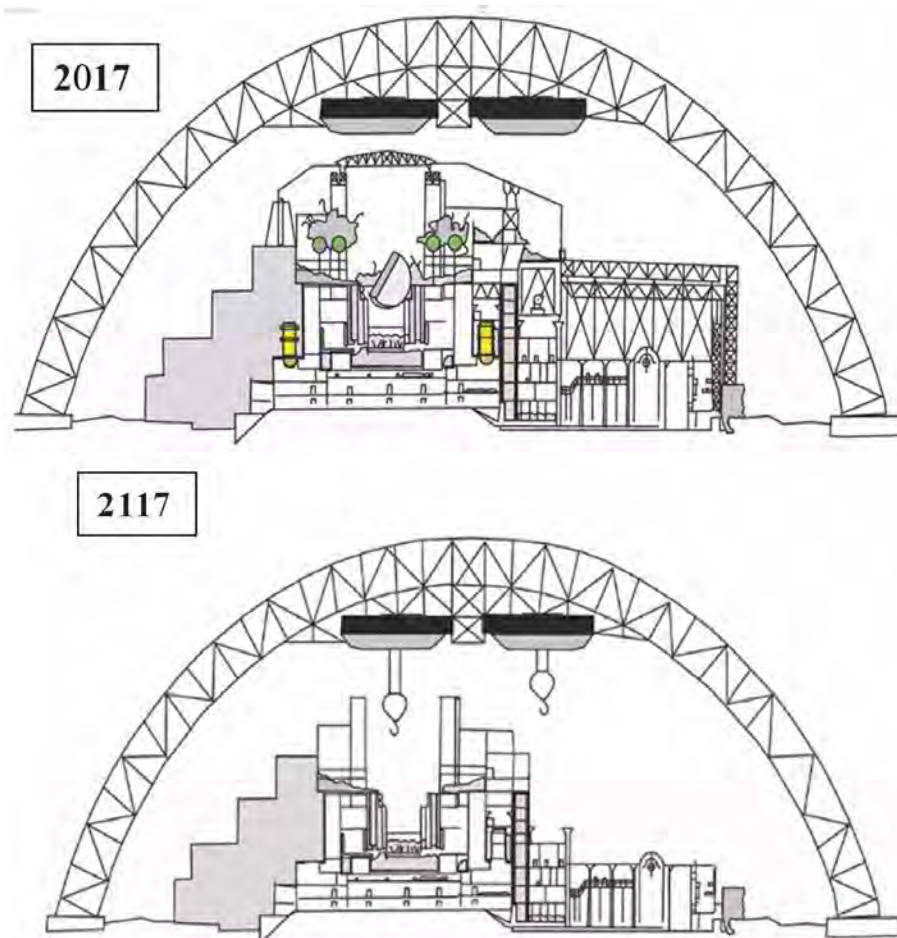


Рис. 9. Планируемый результат проведения работ по извлечению радиоактивных материалов и ядерного топлива из разрушенного блока [B11].

<sup>7</sup> В. И. Купный «Комментарий к выступлению Министра экологии...»  
<http://www.atomnews.info/?T=0&MID=62&JId=62&NID=3965>



## Фукусима.

11 марта 2011г. в результате землетрясения на японской АЭС Фукусима Дай-ичи (F-1) произошла авария, характер и последствия которой позволил сравнивать ее масштабы с чернобыльской и даже присвоить ей 7-ой уровень по шкале INES (см., например работы [B12 - B15] и ссылки в них)..

Землетрясение и удар цунами вывели из строя внешние средства электроснабжения и резервные дизельные электрогенераторы. Это стало причиной неработоспособности всех систем нормального и аварийного охлаждения и, в конечном итоге, привело к расплавлению активной зоны ряда реакторов, взрывам водорода и разрушению 1 - 4 блоков.

На F-1 опасность нарастала постепенно. В течении первых 4 дней (с 11 по 15 марта) один за другим развивались аварии на 4-х блоках, сопровождающиеся взрывами и выбросом летучих радиоактивных элементов (рис. 10, 11).

Только к концу марта благодаря большому комплексу мероприятий, который удалось выполнить сотрудникам управляющей компании (Tokyo Electric Power Company - TEPCO) при помощи, военнослужащих Сил самообороны Японии и других организаций ситуация на F-1 значительно стабилизировалась.

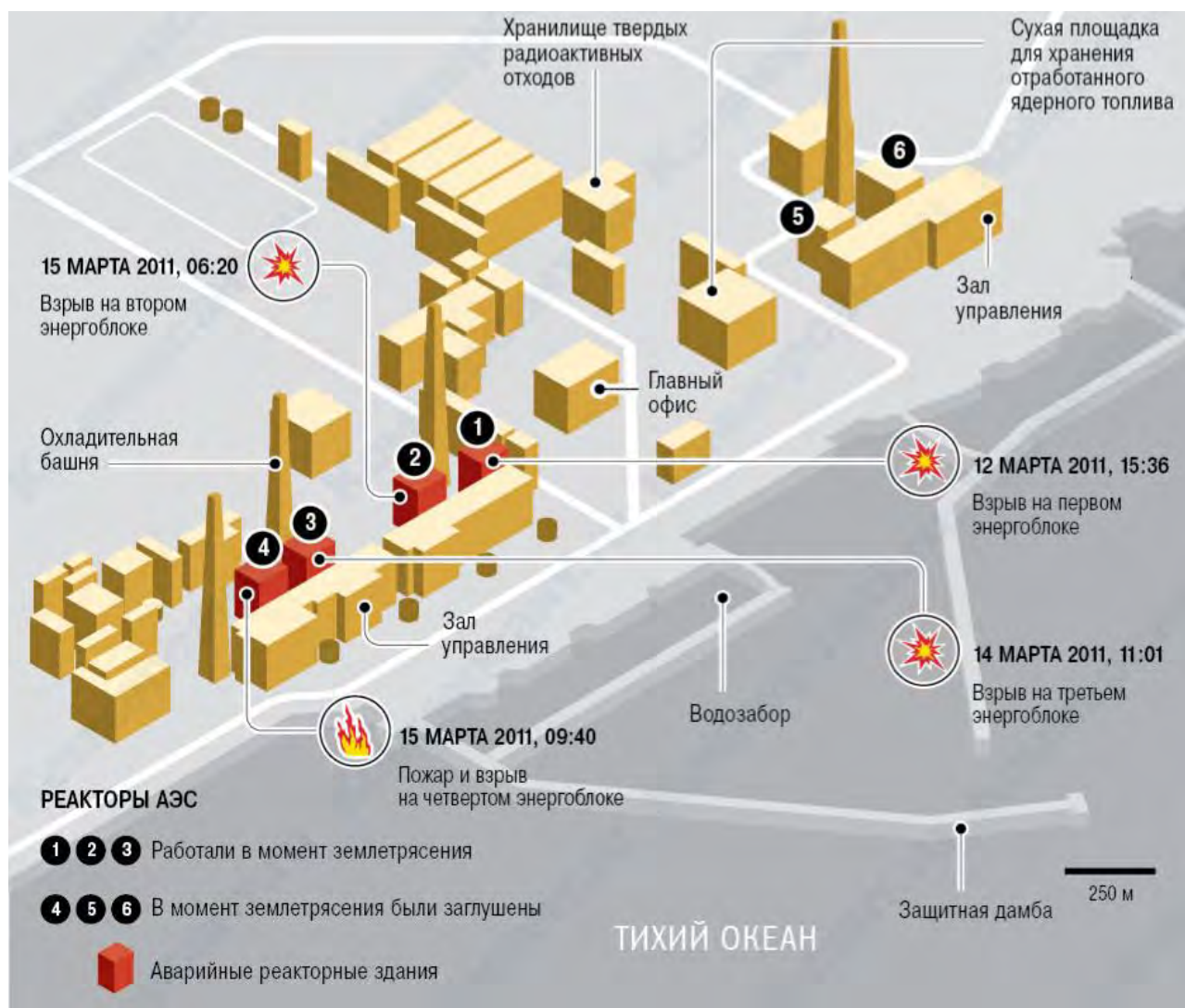


Рис. 10. Состояние энергоблоков АЭС Фукусима Дай-ичи после аварии. На рисунке указаны причины разрушения блоков и время, когда это произошло.



*Рис. 11. F-1 после аварии. Разрушенные блоки. (20 марта 2011г.).*

К 27 марта на блочных щитах управления 1-го, 2-го и 3-го блоков было восстановлено внешнее электроснабжение. Удалось организовать постоянное охлаждение реакторов и бассейнов выдержки. Интенсивность выброса радиоактивности за пределы АЭС упала на несколько порядков.

Оценки (к сожалению, очень приблизительные) интегрального количества выброшенных радионуклидов были приведены в докладе НКДАР ООН (2013 г.).

Для  $^{131}\text{I}$  он лежит в диапазоне 100 – 500 ПБк. Это составляет (2–8)% от общего количества  $^{131}\text{I}$  находившегося в трех действующих реакторах на момент аварии ( $\leq 10\%$  от чернобыльского выброса).

Для  $^{137}\text{Cs}$  это выброс составил от 6 до 20 ПБк ( $\leq 6\%$  от общего накопленного количества и не более 15% от чернобыльского<sup>8</sup>).

Следует отметить, что из-за существующей на острове Хонсю розы ветров, большую часть выбрасываемой во время аварии радиоактивности уносило в акваторию Тихого океана.

Со временем на F-1 возникали и нарастали новые проблемы. Одной из них стала проблема безопасного хранения и дезактивации огромных объемов воды, загрязненной радиоактивностью.

Первый вариант стратегического плана по ликвидации последствий аварии на F-1, названного «Средне- и долгосрочная дорожная карта вывода из эксплуатации энергоблоков 1–4 АЭС Фукусима Дай-ичи», был опубликован в конце 2011г. Впоследствии, по мере накопления новой информации, план дополнялся и частично пересматривался.

По имеющимся оценкам окончательный вывод аварийных блоков из эксплуатации может занять еще 30 – 40 лет.

***Как уже было сказано выше, цель предлагаемого обзора - рассмотреть методы и средства, которые предлагаются в настоящее время для перевода ядерного топлива, оставшегося в реакторах Чернобыльской АЭС и АЭС Фукусима-1, в полностью безопасное состояние. Сегодня до окончательного решения всех возникших проблем еще достаточно далеко. Тем не менее, первые шаги на этом пути уже сделаны.***

<sup>8</sup> Более поздние данные дают значения близкие к 20ПБк.

## **ЧАСТЬ 1. ЧЕРНОБЫЛЬ.**

### *1.1. НАКОПЛЕННЫЙ ОПЫТ.*

За время, прошедшее после аварии, специалистами, работавшими над проблемами ЛПА, был накоплен огромный опыт обращения с радиоактивными отходами и ядерным топливом, оставшимися в «Укрытии». Только опираясь на этот опыт, используя данные, полученные в результате уже проведенных масштабных строительно-монтажных работ внутри объекта, многолетних исследований и мониторинга его конструкций, расположения и свойств скоплений ТСМ, методов защиты персонала стало возможным спроектировать, построить и приступить к вводу в эксплуатацию такого уникального сооружения, как НБК. Предложить способы извлечения и захоронения РАО и разрушенного ядерного топлива.

Поэтому в первых разделах этой части мы кратко, остановимся на методах и средствах, освоенных за прошедший период, применение которых планируется в в дальнейшем. Более подробно с их описанием можно ознакомиться по работам [В4 - В9].

### *1.2. СКОЛЬКО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА ОСТАЛОСЬ В «УКРЫТИИ» 4-го БЛОКА?*

Как уже говорилось во Введении, этот вопрос возник сразу после аварии. Первый количественный ответ на него был получен к осени 1986г. и впоследствии многократно подтвержден результатами различных исследований (см., например, [В4 - В9]). Тем не менее, до сих пор он остался предметом периодически появляющихся спекуляций, хотя с течением времени их частота и агрессивность заметно снижается.

Мы считали необходимым еще раз обсудить сложившуюся ситуацию.

***До аварии в 4-ом блоке было около 232т топлива (по урану), из них отработавшего - в активной зоне 190,2т<sup>9</sup> и около 19,5т в бассейне выдержки.***

После взрывов реактор 4-го блока был полностью разрушен. Сколько ядерного топлива осталось в аварийном здании, в каком оно состоянии, было не известно.

Первые измерения величины мощности дозы вокруг блока и на остальной площадке ЧАЭС поражали своими большими значениями, они доходили до нескольких тысяч Р/час<sup>10</sup>.

Человеческая жизнь в таких полях измерялась считанными минутами.

Это проиллюстрировано на рис. 12, где представлены результаты измерений, выполненных днем и вечером 26 апреля и переданных из Чернобыля в «Курчатовский институт» и Институт биофизики (см., например, [В8]).

Так родилась далеко не безобидная и долгоживущая легенда о том, что практически все топливо при аварии было выброшено из блока.

В действительности, большие значения радиационных полей объяснялись высокой удельной активностью отработавшего топлива.

Проведенные немного позже оценки показали, что если на площадку Чернобыльской АЭС было бы выброшено равномерно всего 3% (или ~ 6т по U) от полного количества топлива, то к 6-му мая средняя мощность дозы на 1 м от земли должна была составлять около 500 р/час. В реальности из-за большой неравномерности загрязнения наблюдаемые МЭД колебались от сотен миллирентген в час до тысяч рентген в час.

Практически сразу после аварии были приняты меры для того, чтобы непосредственно измерять количество и состав постоянно выбрасываемой из горящего реактора. Радиоактивности [Ч16].

---

<sup>9</sup> К моменту аварии активная зона реактора содержала 1659 ТВС с начальным обогащением топлива по <sup>235</sup>U - 2%. Большая часть из них представляла собой сборки первой загрузки с выгоранием 11 - 15 МВт × сут/кг урана. В активной зоне находилось и некоторое количество свежего топлива. Масса урана в каждой кассете составляла 0,1147 т., полная масса топлива, загруженного в активную зону - 190,2 т.

<sup>10</sup> Мы используем в этой части обзора внесистемную единицу экспозиционной дозы облучения рентгеновским или гамма-излучением – «рентген в час», поскольку это допущено Постановлением Правительства РФ от 31 октября 2009 г. N 879.



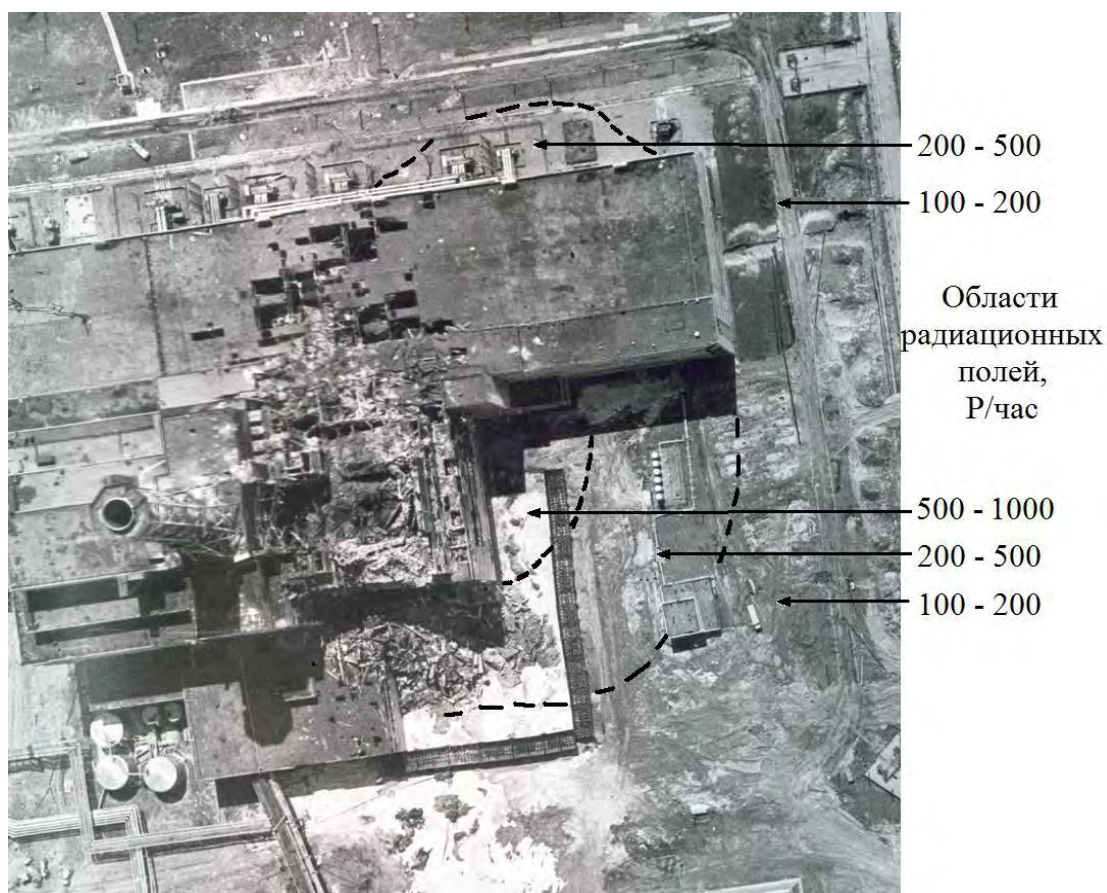


Рис. 12. Радиационная обстановка на площадке 4-го блока к вечеру 26.04.86.

Пробоотбор производился над самим 4 блоком, над площадкой вокруг станции, над территорией 30 км зоны. Для него использовались специальные «гондолы», которые несли самолеты и вертолеты радиационной разведки. Однако, в силу многочисленных объективных причин, нестационарного характера выброса, меняющихся метеоусловий, методических трудностей отбора проб, активных воздействий на разрушенный реактор (сброс материалов с вертолетов) и т.д. и т.п., точность определения выброса оказалась весьма низкой (см. рис.13).

#### Интенсивность выброса

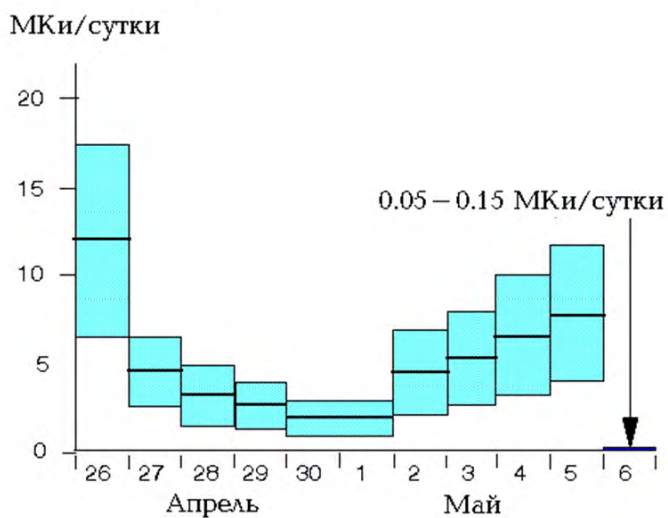


Рис.13. Интенсивность выброса радиоактивности из разрушенного блока в период активной стадии аварии. Погрешность оценки выброса  $\pm 50\%$ . Значения выброшенной активности пересчитаны на 06.05.86г. (конец активной стадии) с учетом радиоактивного распада.

Тем не менее, спектрометрические и радиохимические анализы аэрозолей позволили сделать важный вывод.



***В течение всей активной стадии аварии выброс радиоактивности, за исключением легколетучих веществ – инертных газов, йода, цезия, теллура и др., происходил в составе частиц мелкодиспергированного топлива. А полное количество выброшенного топлива (урана) не превышало 5 процентов от начальной загрузки.***

Но возможно, основная часть топлива была выброшена в самый момент взрыва?

После окончания активной стадии аварии наиболее точный ответ на вопрос, об оставшемся в блоке топливе, дали данные по выпадениям радиоактивности на территории СССР и зарубежных стран.

Широкомасштабные исследования загрязнения почвы, как в ближней, так и в дальней зоне, развернулись достаточно быстро. Определение дозы гамма-излучения проводилось оперативно с помощью дозиметров самых разных типов. В том числе установленных на автомобилях, самолетах, вертолетах и т.п.. Спектральный состав гамма-излучения, для определения состава выпавших радионуклидов, изучался, в основном на отобранных пробах, с помощью, стационарных спектрометров.

Исследование проб проходило уже не так оперативно, но в целом удовлетворительно.

***А вот, количественное определение загрязнений чистыми бета (стронций-90) - и альфа (изотопы плутония-238, 239, 240) – излучателями, которые собственно и характеризовали выпадение на почву топливной компоненты, требовало проведения сложных радиохимических анализов и недопустимо запаздывало.***

За первые недели работы всем привлеченным организациям удалось выполнить всего несколько десятков таких анализов. К тому же при этом не обошлось без ошибок.

Вот, что вспоминал академик С.Т. Беляев.

«Как-то нам присылают результаты анализов из одного очень хорошего института. Там вдруг нашли огромные количества плутония в почве. Но что удивительно: из блока примерно в равной пропорции выброшены три изотопа плутония, а в анализе присутствует только <sup>239</sup>Pu. Оказывается, при исследованиях пользовались посудой, в которой когда-то работали с этим изотопом, а концентрация плутония в пробах настолько мала, что этого оказалось достаточно, чтобы исказить результат. Случались и другие ошибки. Нам даже пришлось создать специальную бригаду специалистов, которая проверяла сомнительные результаты» [Ч17].

Выход из сложившейся ситуации был предложен сотрудниками «Курчатовского института» [18]. В середине мая 1986г. они обратили внимание на то, что при сравнении данных спектрометрических измерений проб, взятых на территориях Украины, России, Беларуси и данных радиохимических анализов этих же проб, сохраняется практически постоянным соотношение между активностями <sup>144</sup>Ce ( $\gamma$ ) и суммы изотопов плутония A(Pu) ( $\alpha$ ), так называемый «коэффициент корреляции». Этого следовало ожидать.

Церий вылетал из реактора и падал на почву в составе тех же частиц топлива, что и плутоний. Мог бы существовать некоторый разброс в коэффициенте в зависимости от глубины выгорания, но большинство топливных каналов 4-го блока работали всю кампанию и имели близкое выгорание, а для остальных отношение накоплений <sup>144</sup>Ce и Pu не так уж сильно отличались (см. рис.14). Было предложено (подробнее см. [B4, B8]) использовать этот факт для быстрого определения загрязнения почвы плутонием (или топливом), используя «коэффициент корреляции». Вместо сложных радиохимических анализов на изотопы плутония-238, 239, 240 (практически чистые  $\alpha$ -излучатели) или стронций-90 ( $\beta$  - излучатель) можно было найти содержание этих радионуклидов в пробе (или на территории) по соотношению  $A(Pu) = K_{Pu} \times A(^{144}Ce)$ , где A(Pu) суммарная альфа-активность <sup>238</sup>Pu, <sup>239</sup>Pu, <sup>240</sup>Pu;  $K_{Pu}$  - коэффициент корреляции; A(<sup>144</sup>Ce) - гамма-активность <sup>144</sup>Ce.

Величина  $K_{Pu}$  составляла на 26.04.86г.  $\approx 9 \times 10^{-4}$ . Аналогичное соотношение со своим коэффициентом корреляции существовало и для стронция-90.

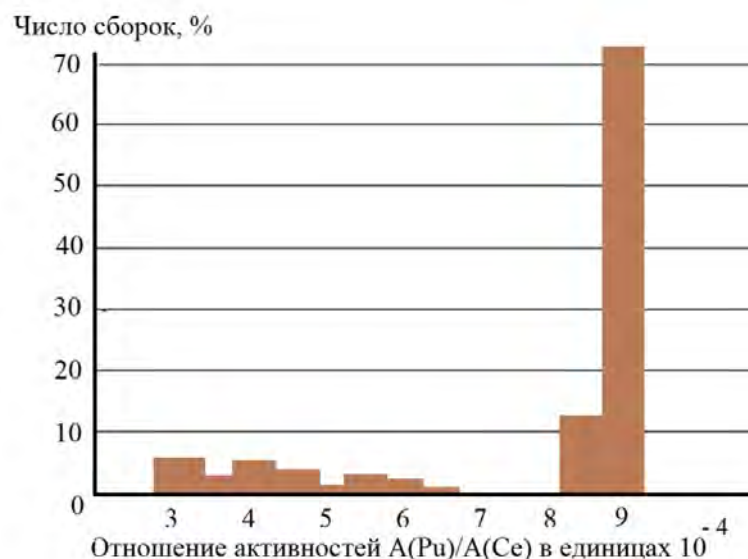


Рис. 14. Гистограмма распределения числа сборок реактора в зависимости от «цериевого отношения».

Церий-144, как опорный радионуклид, был выбран из следующих соображений:

- прочная связь с урановой матрицей, высокая температура испарения;
- достаточно большой период полураспада (284 дня);
- достаточная интенсивность гамма-линий и их удобная для спектрометрии энергия.

Этот метод стал широко применяться

Через короткое время сложилась трехзвенная система определения топливных загрязнений в ближней зоне. Во-первых, измерение мощности дозы гамма-полей над территориями с помощью аэро-гамма разведки (первое, «грубое» приближение, использующее соотношение «мощность дозы» - количество топлива). Во-вторых, оперативное исследование почвенных проб с помощью полупроводниковых гамма - спектрометров (уточняющие измерения с использованием коэффициента корреляции по церию-144). И, наконец, медленные и тщательные радиохимические анализы (проверка устойчивости коэффициента  $K_{Pu}$ ). Так определялось количество топливных частиц, выпавших на территорию. Летом 1986 года на основании полученных данных «Курчатовский институт» дал предварительное распределение количества топлива, выброшенного на территорию.

**Согласно этому распределению в границах будущего объекта «Укрытие» осталось более 96% топлива, находившегося ранее в активной зоне реактора 4-го блока** (см. рис.15 и рис. 4).



Рис.15. Оценки выброса топлива при аварии на ЧАЭС. «Курчатовский институт» 1986г.

Полный выброс, по этим первым оценкам составил ~ 3,5 %. В августе 1986г. на конференции в МАГАТЭ академик В.А. Легасов, возглавлявший советскую делегацию, доложил о выбросе ( $3 \pm 1.5$ )% топлива из реактора 4-го блока [Ч19].

Впоследствии, в 1987-1989гг. в результате работ по анализу тысяч проб грунта приведенные выше цифры выпадений топливной компоненты в основном подтвердились. Было показано, также, что подавляющая часть выброшенных топливных частиц находится в пределах 30-ти километровой Зоны отчуждения.

Данные по интегральным величинам загрязнений в 30-ти километровой зоне приводились в 1994г. в отчете Администрации Зоны отчуждения [Ч20]:

- $5.5 \times 10^{15}$  Бк цезия-137 ( 2.1% от накопленного перед аварией);
- $(3 \div 4) \times 10^{15}$  Бк стронция-90 ( 1.5÷ 2)% ;
- $3.7 \times 10^{13}$  Бк плутония ( 239 + 240 ) или ( 1,5% ).

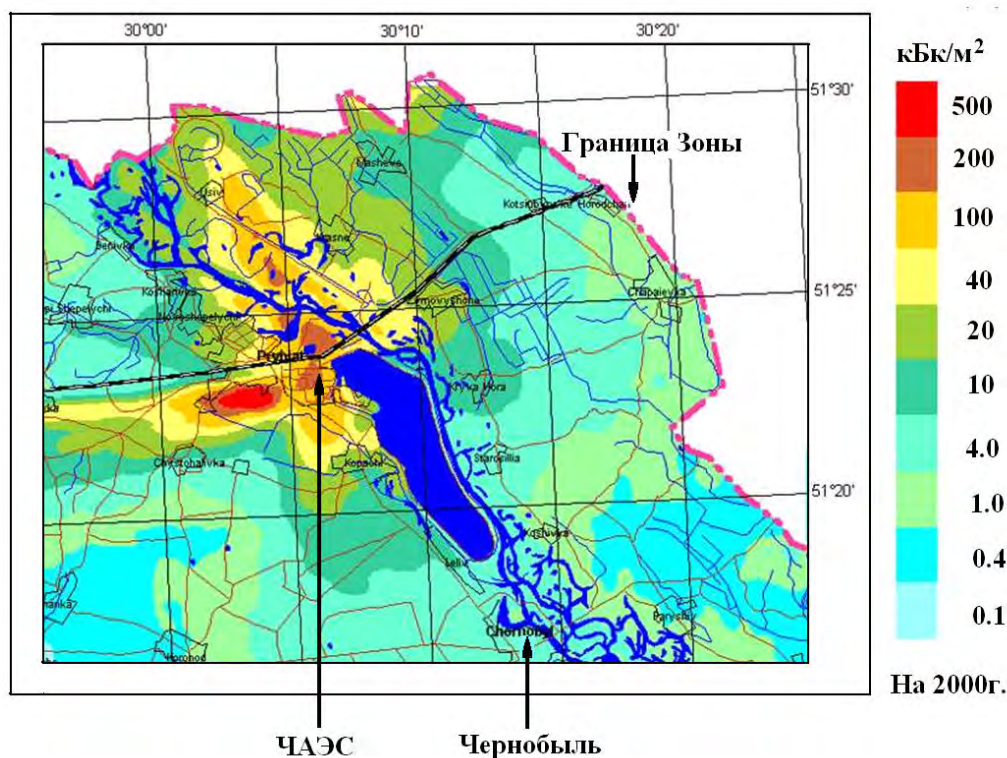


Рис. 16. Карта загрязнений почвы  $Pu^{238}$  вокруг ЧАЭС.

Еще через несколько лет (1999 – 2000 гг.) тщательные исследования, проведенные группой В.А. Кашпарова в 30 километровой зоны, еще раз показали, что величина выброса радионуклидов топливной компоненты радиоактивных выпадений (включая трансурановые элементы) при прежних оценках даже завышалась (см. [Ч21] и рис. 16).

**Поиски местоположения топлива в самом разрушенном блоке** и попытки оценить его полное количество, оставшееся в помещениях, также начались с первых дней после аварии. При этом разведывательные группы встретили на своем пути, по крайней мере, три основных вида препятствий. Во-первых, завалы разрушенных конструкций, во-вторых, большие дозовые поля, в-третьих, бетон, попавший сюда при строительстве объекта «Укрытие» и заливший часть помещений и коридоров.

Часть скоплений топлива удалось обнаружить визуально, но приблизиться к ним для сколько-нибудь детальных исследований не удавалось из-за сложных радиационных условий.

Несколько больших скоплений топлива были найдены **методами тепловой разведки**.

Именно они позволили впервые определить место нахождения основной части застывшей топливной лавы - подаппаратное помещение 305/2



Тепловая разведка широко использовалась при работах в «Укрытии» в 1986 – 90гг. и подробно описана в [В4, В8].

Для некоторых помещений объекта она позволила не только обнаружить большие скопления ТСМ, но и оценить массу, сосредоточенного в них топлива. Само такое помещение оказывалось совершенно недоступным для человека из-за больших величин МЭД (порядка тысяч р/час). В то же время, дозовая обстановка в окружающих его комнатах могла быть приемлемой из-за разделяющих их достаточно массивных стен и перекрытий. И позволяла проводить измерения тепловых потоков, протекающих через все эти стены и перекрытия. В этом случае суммарный тепловой поток позволял определить мощность источника и вычислить массу топлива, попавшего в недоступное помещение.

Отметим, что в ходе создания «Укрытия», в рамках программы «Буй» (август - ноябрь 1986 г.) (подробнее см. [В4, В8]) удалось по измеренным тепловым потокам, выходящим из развала 4-го блока, оценить порядок общего тепловыделения находящегося в нем топлива.

И согласно таким оценкам **более 90 % топлива осталось в помещениях 4-го блока** (рис. 17).

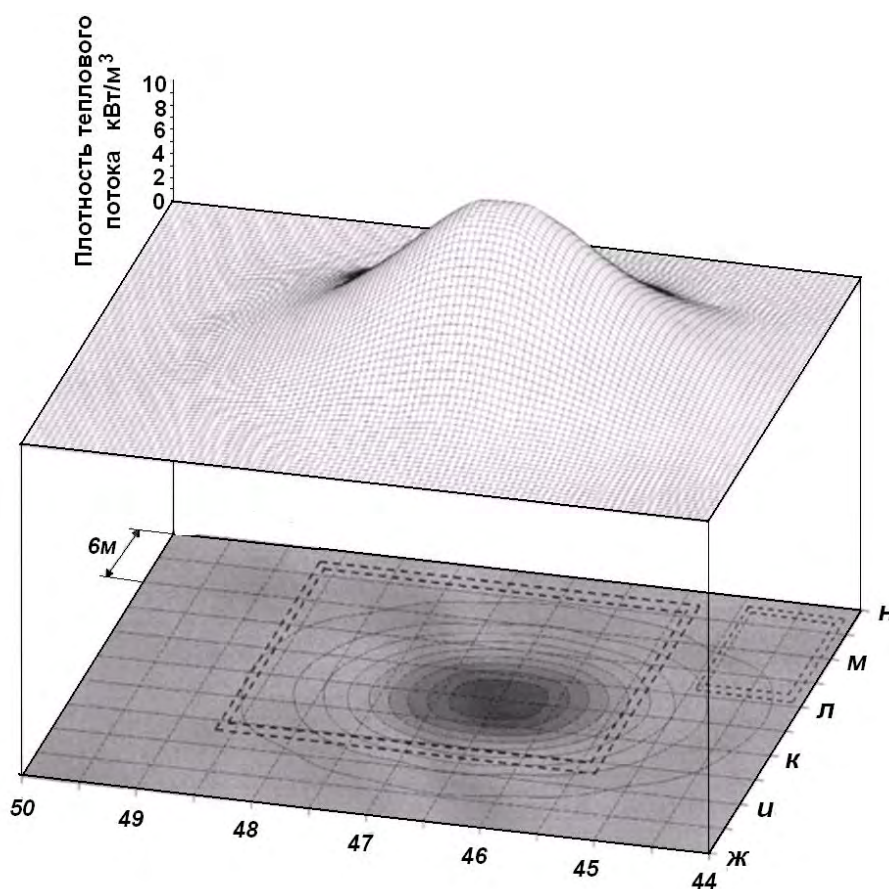


Рис.17. Распределение плотностей конвективных тепловых потоков на поверхности развала реактора 4-го блока, приведенное к 25.10.86г. (На пересечении оси 47 и ряда Л находится ось шахты реактора). Суммирование всех потоков позволило определить мощность источника и массу создающего ее топлива.

В конце 1987г. для продолжения исследований и получения информации о ядерной и радиационной безопасности топлива в «Укрытии» в «Курчатовском институте» была разработана **специальная программа, позволившая подвести детекторы к скоплениям ТСМ, взять пробы этих материалов и определить их физико-химическое состояние.** [В4, В8].

Следуя этой программе были очищены и дезактивированы помещения сначала с западной, позднее с южной стороны блока (рис. 18). В них были установлены буровые станки, и через бетон и металлические конструкции пробурены скважины к местам предполагаемых

скоплений топливосодержащих материалов. Визуальными наблюдениями (перископы, телевизионные камеры), а также с помощью специально разработанных тепловых, гамма и нейтронных детекторов был проведен большой объем исследований. Одновременно анализировались отобранные при бурении образцы материалов<sup>11</sup>.

К концу 1989г. число скважин превысило 100. Активные исследования с помощью скважин продолжались до 1991г.

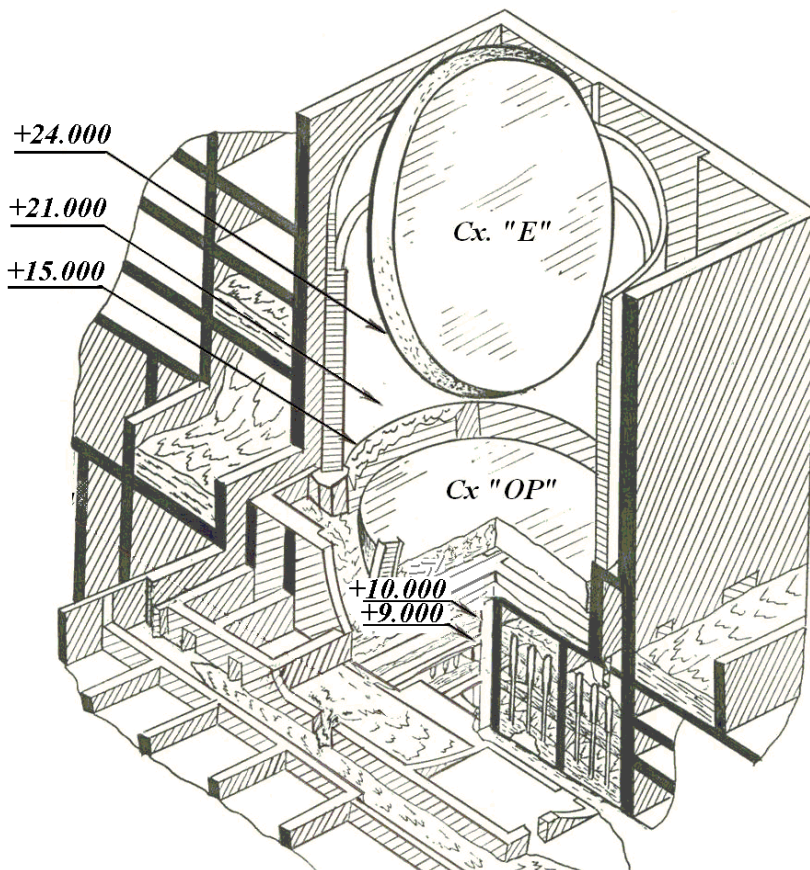


Рис. 18. Направления бурения скважин с западной стороны блока. Указаны основные отметки, на которых прошли скважины.

Исследования этого периода позволили.

1. Оценить внутренние разрушения реактора, выяснить состояние конструкций блока.
2. Определить основные места скоплений ТСМ и изучить их модификации.
3. Исследовать пробы, взятые из этих скоплений.
4. Создать систему постоянно работающих датчиков, максимально приближенных к скоплениям (система «Финиш»).
- 5. Оценить общее количество ТСМ, оставшееся в «Укрытии» от разрушенного реактора.**

На основе полученных данных были приняты необходимые контрмеры против ядерной, тепловой и радиационной опасности<sup>12</sup>.

Согласно результатам выполненных работ по пункту «5» во всех редакциях принятого ЧАЭС и регулируемыми органами документа - «Анализ текущей безопасности объекта «Укрытие» и

<sup>11</sup> С 1988 г. дозиметрические, спектрометрические и радиохимические исследования образцов топливосодержащих материалов стали проводиться в созданной в Чернобыле лаборатории. К анализам образцов подключились также научные центры Москвы, Киева и Ленинграда.

<sup>12</sup> Ниже мы еще вернемся к описанию объема выполненных работ и полученным результатам.



прогнозные оценки развития ситуации», в редакции 1996 г., 1998г. и 2001г. [В22] делается вывод.

*«При самом осторожном подходе к оценке общего количества топлива обнаруженного в «Укрытии» цифра получается всегда большая 125 т (для топлива из разрушенного реактора). Менее осторожная оценка - около 150 т.*

*На площадке объекта под слоем гравия, песка, бетона находится примерно 0,75 т топлива».*

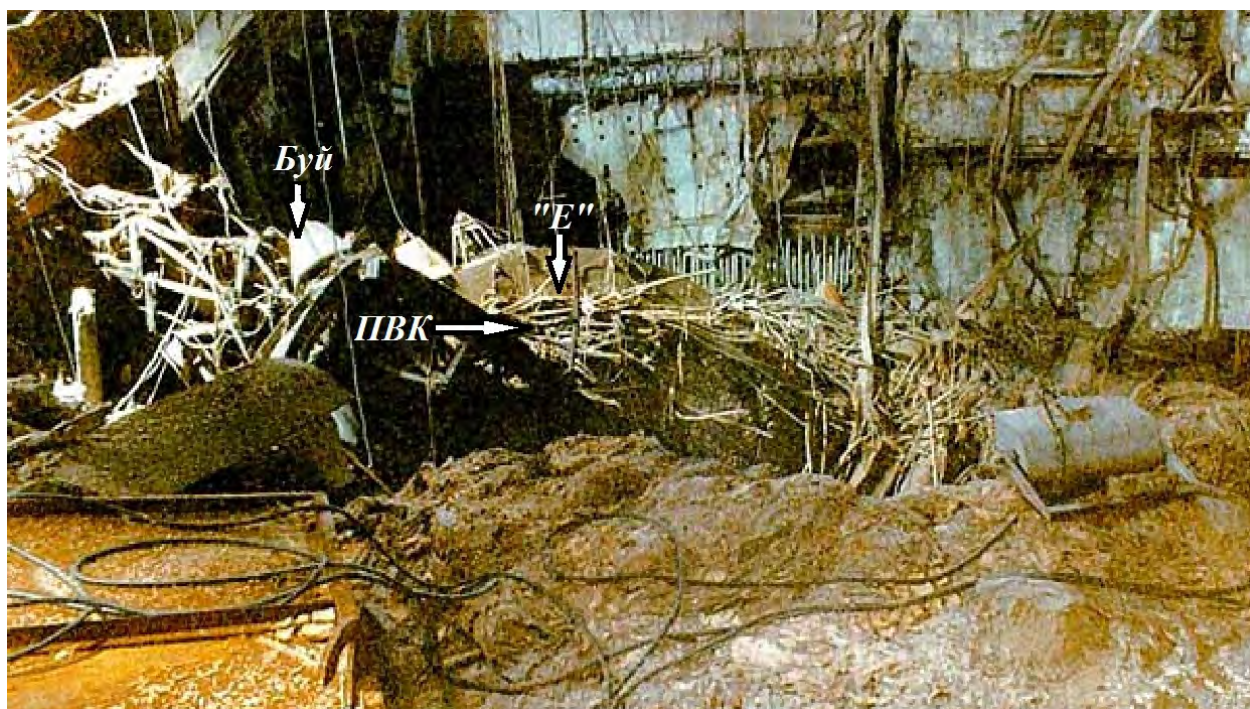
Не удалось получить необходимой информации о топливе, находящемся в ЦЗ, под слоем материалов, под каскадной стеной, внутри в помещении 305/2, в помещении 307/2 (см. рис. 4).

### *1.3. МЕСТОНАХОЖДЕНИЕ И СОСТОЯНИЕ ОСНОВНЫХ СКОПЛЕНИЙ РАЗРУШЕННОГО ТОПЛИВА В «УКРЫТИИ» [В4 – В8].*

Важным результатом исследований ТСМ, находящихся в «Укрытии» было определение физико-химических свойств различных модификаций этих материалов. Их было найдено четыре.

#### **Фрагменты активной зоны (АЗФ).,**

Большая часть фрагментов выброшена при взрыве на верхние этажи блока, в частности, в Центральный зал (рис. 19), часть находится в шахте реактора и подаппаратном пом. 305/2.



*Рис. 19. В ЦЗ 4-го блока. Видно выброшенную взрывом верхнюю плиту биологической защиты реактора (схему «Е») вместе с трубами пароводяных коммуникаций (ПВК), исследовательские «Буи», фрагменты твэлов, холмы сброшенных материалов.*

#### **Мелкодиспергированное топливо (пыль) – горячие топливные частицы (ГТЧ).**

Размеры частиц изменяются от долей микрона до сотен микрон (рис.20). Они наблюдаются практически во всех помещениях объекта и в образцах почвы в ближней и дальней зоне.



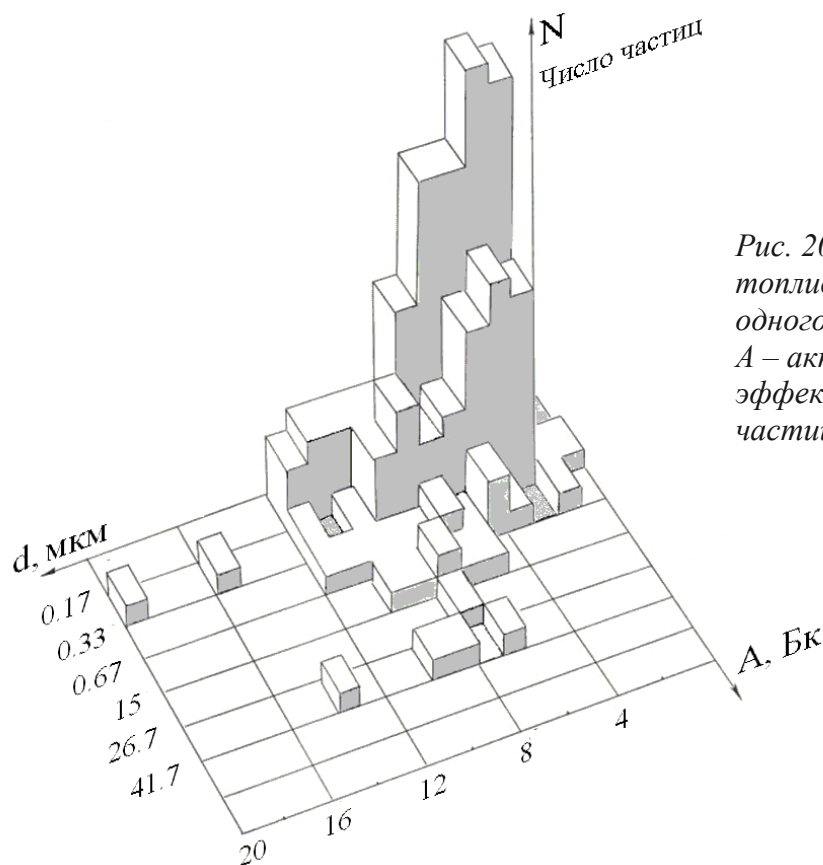


Рис. 20. Типичное распределение топливных частиц на поверхности одного из помещений «Укрытия».  $A$  – активность частицы,  $d$  – эффективный диаметр,  $N$  – число частиц.

#### ***Застывшие лавообразные топливосодержащие материалы (ЛТСМ).***

Они образовались во время активной стадии аварии при высокотемпературном взаимодействии топлива с конструкционными материалами блока.

Центром образования лавы стала юго-восточная часть подаппаратного помещения (305/2) на отметке +9.00.

Образовавшийся расплав распространялся по полу, достигал паросбросных клапанов, переливался внутрь и попадал через систему труб в нижние помещения, созданные для локализации пара при проектной аварии.

Эти помещения ((рис.21, сверху вниз):

- парораспределительного коридора (ПРК), расположенные на отметке +6.00;
- второго этажа бассейна-барботера (ББ- 2), расположенные на отметке +3.00;
- первого этажа бассейна-барботера (ББ-1), расположенные на отметке +0.00;

Одновременно расплав распространялся и в горизонтальном направлении, т.к. как в стене между помещениями 305/2 и 304/3 при аварии образовался пролом (рис. 22).

Этот поток лавы через открытую дверь проник в коридор 301/5 и растекался по нему на восток и запад (перпендикулярно плоскости рис. 22).

\

На рис. 23, 24 приводится схема расположения и фотография (1989г.) скопления лавообразных ТСМ, находящееся на 1-ом этаже бассейна-барботера – «куча 1-го этажа» (по своему внешнему виду скопление напоминает кучу шлакообразного материала).

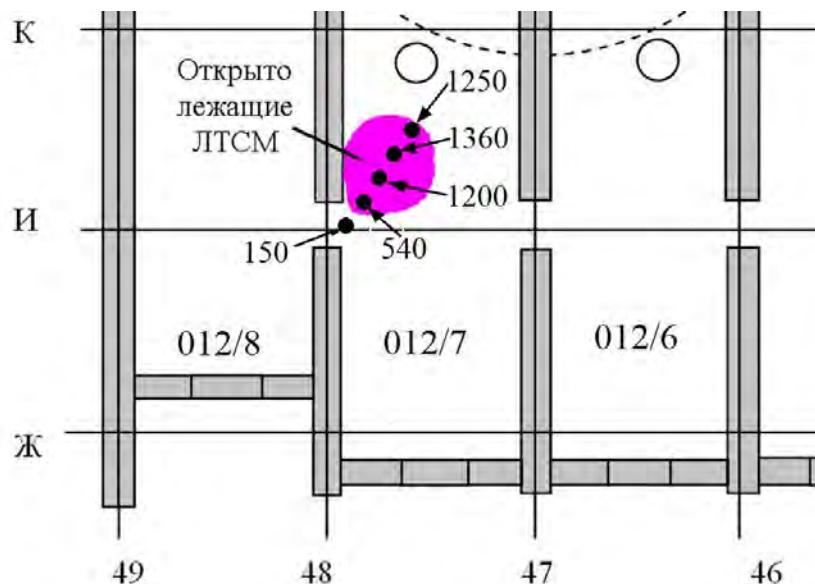
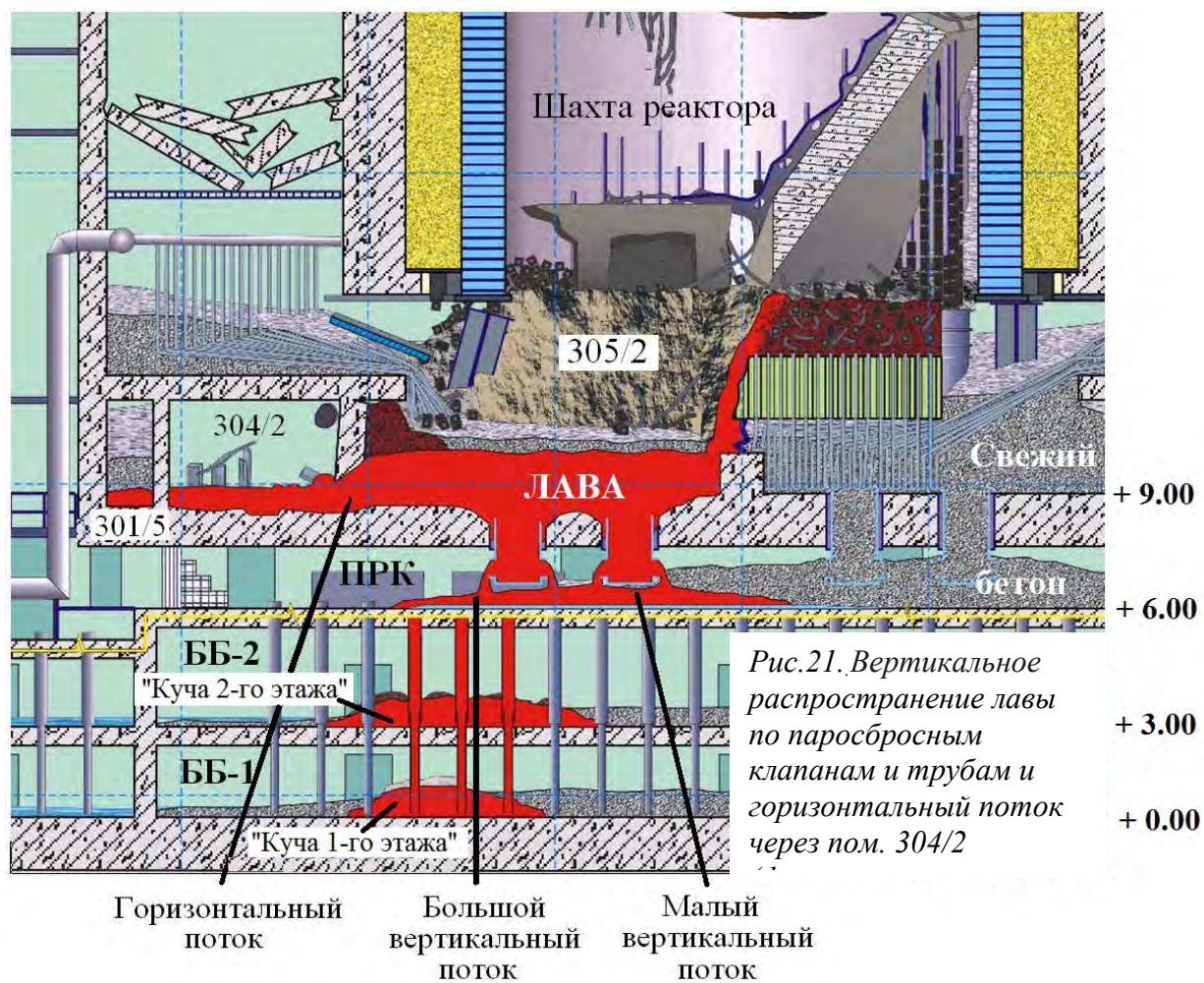


Рис. 22. Схема помещений ББ-1 и место расположения скопления ЛТСМ «Куча 1-го этажа». Приведены некоторые результаты измерений МЭД (Р/час), выполненные в январе 1989г.





*Рис.23. «Куча 1-го этажа» (1989г.).*



*Рис. 24. Скопление воды на 2-ом этаже бассейна-барботера.*



***Вода, содержащая растворимые формы урана, плутония, америция.***

В «Анализе безопасности...» [Ч22] перечислены основные виды опасности, которые могли быть связаны с водой, попадающей в «Укрытие» Основные из них три.

1. Попадая на скопления топливосодержащих материалов, вода может приводить к увеличению эффективного коэффициента размножения нейтронов в системе (уменьшению ядерной безопасности).
2. Водные потоки, образующиеся в помещениях «Укрытия», являются одним из основных факторов разрушения топливосодержащих материалов. Взаимодействуя со скоплениями топлива, они уносят с собой как мелкие частицы ТСМ, так и образующиеся на их поверхности растворимые соединения, в том числе и соли урана и способствуют неконтролируемому перемещению радиоактивности по помещениям «Укрытия» и выносу радионуклидов за пределы объекта.
3. Переноса растворенные соли обогащенного урана, вода может создавать потенциальную ядерную опасность объекта.

*Общее представление о ТСМ в объекте дает рис. 25.*

Более детальное описание модификаций и количества ТСМ, находящихся в конкретных помещениях «Укрытия» приводится ниже в разделах, относящихся к методам их извлечения.

1. Центральный зал, другие верхние помещения  
Фрагменты активной зоны, топливная пыль.
2. Южный бассейн отработанного топлива.  
Топливные сборки.
3. Большинство помещений.  
Топливная пыль.
4. Помещения 305/2 + 307/2 + завал на  
схеме "ОР" в шахте реактора.  
ЛТСМ, фрагменты АЗ.
5. Парораспределительный коридор  
ЛТСМ
6. Бассейн-барботер (2-этаж) □  
ЛТСМ
7. Бассейн-барботер (1-этаж)  
ЛТСМ
8. 304/3, 303/3, 301/5, 301/6, слоновья нога.  
ЛТСМ (нет на рис.)
9. Реакторный блок, машинный зал  
Вода с солями урана (нет на рис.)
10. Под каскадной стеной  
Фрагменты АЗ? (нет на рис.)
11. Топливо на площадке.  
Фрагменты АЗ, пыль

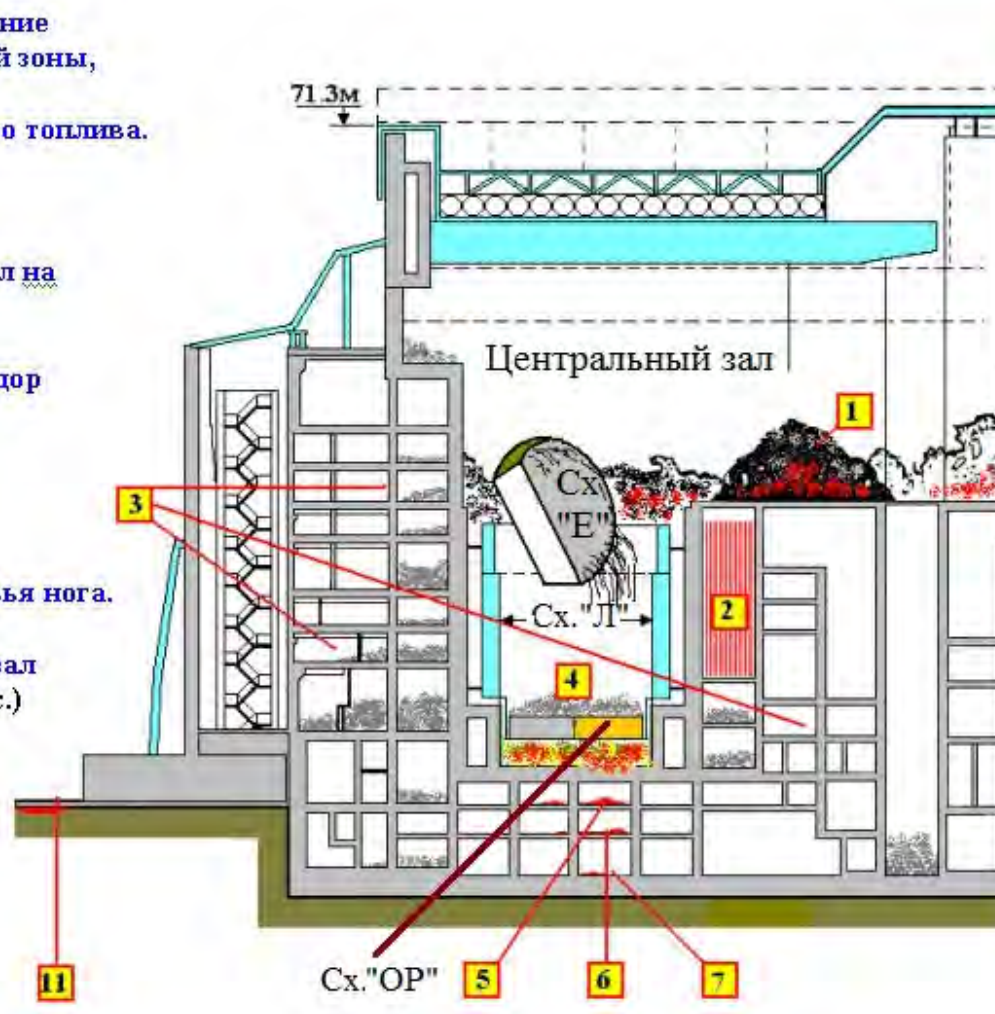


Рис. 25. Схема расположения ТСМ в 4-ом блоке (разрез).

#### *1.4. ОПЫТ ИЗВЛЕЧЕНИЯ РАЗРУШЕННОГО ТОПЛИВА, ПОЛУЧЕННЫЙ ПРИ РАБОТАХ ПО РАСЧИСТКЕ И ДЕЗАКТИВАЦИИ ПРОМПЛОЩАДКИ И КРОВЛЕЙ БЛОКОВ (см.[В4, Ч23]).*

После окончания активной стадии аварии значительное количество ядерного топлива выброшенного при взрыве, находилось на верхних отметках 4-го блока (в так называемом «развале»). Кроме того, отдельные фрагменты активной зоны – графитовые блоки и части твэлов попали на кровлю деаэрационной этажерки, машинного зала, третьего блока, на площадки вокруг вытяжной трубы (рис. 26) и т.п. Радиоактивные обломки буквально покрывали часть территории, примыкающей к аварийному блоку.



*Рис. 26. Части твэлов, собранные на площадке вентиляционной трубы.*

Территория станции, стены и кровли зданий были сильно загрязнены топливной пылью. Первое, что было необходимо - провести очистные и дезактивационные работы. Обломки и грунт из наиболее загрязненных мест собирались в контейнеры, которые позднее помещали в разрушенный блок или вывозили в места захоронения - «могильники». Одновременно с этим шла постоянная засыпка площадки станции щебнем, песком и укладка на его поверхность бетонных плит. В результате слой чистых материалов достигал в отдельных местах 1,5 м. Сотни единиц строительной, а также специальной техники инженерных войск, были направлены на ЧАЭС.

Определяющую роль для разбора радиоактивных завалов сыграли инженерные машины разграждения (чаще всего – ИМР и ИМР-2<sup>13</sup>). Они же использовались для покрытия

---

<sup>13</sup> Машина была разработана на базе танка Т-72А и серийно выпускалась ПО «Уралвагонзавод» в городе Нижний Тагил. Ее основное назначение - помощь в продвижении войсковых колонн по территории, подвергшейся применению ядерного оружия. Технические характеристики ИМР позволяли прокладывать проходы, как в сплошных завалах леса в пересеченных условиях местности, так и проделывать путепроводы для военной техники в городских завалах. С помощью ИМР могла происходить загрузка материалов в контейнеры.



территории сыпучими материалами, загрузки и выгрузки контейнеров с радиоактивным мусором [Ч24].

Эти машины появились на площадке в первых числах мая 1986г.

Именно с их помощью радиоактивные обломки сгребались и загружались в металлические контейнеры, затем контейнеры захватом-манипулятором устанавливали на бронетранспортеры и грузовые машины (см. рис. 27, 28), использовавшиеся для транспортировки опасных материалов.



*Рис.27. Инженерная машина разграждения.*



*Рис. 28 ИМР на площадке 4-го блока. В мае 1986г. на ЧАЭС работали 12 машин.*

ИМР были герметизированы, имели фильтровально - вентиляционные установки (для работы на загрязненной местности), были снабжены пассивной защитой от проникающей радиации, радиометрами и приборами химической разведки. Проектный коэффициент снижения дозы внешнего облучения составлял для них ~10.

Машины были оснащены бульдозерным и крановым оборудованием, в том числе **телескопической стрелой** с захватом-манипулятором.

Связь с ними осуществлялась по радиоканалу.

К сожалению, сразу же выяснилось, что для работы в специфических условиях локальной зоны 4-го блока ИМР имеет и ряд существенных недостатков.

Ее конструкция предусматривала защиту от радиоактивных источников, расположенных на земле. В то же время, вблизи разрушенного блока излучение падало на ИМР и с боков, и

сверху. Пришлось устанавливать на машину дополнительную пассивную защиту. Согласно документам эта защита ослабляла радиацию в  $\sim 100$  раз в полях с МЭД до 100 Р/ч. В случае если поля достигали 200 - 250 Р/ч, приходилось и ее усиливать. Заметим, что при работе в таких больших радиационных полях даже небольшая щель или неоднородность в защите, установленной в полевых условиях, может привести к опасному переоблучению работающего персонала.

Другим важным недостатком ИМР являлись значительные трудности, возникавшие при ее дезактивации, приводившие к тому, что после нескольких дней работы у 4-го блока неустраняемая собственная загрязненность машины делала невозможным нахождение внутри нее экипажа. По мере выявления недостатков ИМР шла ее модернизация, которая выполнялась буквально за считанные дни. В качестве примера можно привести то, что уже к концу мая на заводе была создана и доставлена на ЧАЭС машина ИМР-2Д, с множеством усовершенствований, связанных с обеспечением безопасности работы - усиленной защитой, возможностью наблюдения за движением и действиями ее инструментов не визуальным, а с помощью телекамер и т.п.

\* \* \*

Как уже говорилось, часть персонала была занята вывозом радиоактивного грунта и засыпкой площадки около разрушенного блока песком и щебнем. Производились эти работы с помощью переоборудованных грузовых машин. Их кабины защищались свинцовыми листами, что позволило значительно снизить дозовые нагрузки на водителя (см. рис. 29).



*Рис. 29. Для защиты водителей грузовых машин, вывозящих радиоактивный грунт, кабины машин облицовывались свинцовыми листами*

Отдельно следует остановиться на использовании дистанционно-управляемых и робототехнических устройств.

Практически сразу после начала работ Правительственной Комиссией была поставлена задача заменить людей, работающих на площадке и крышах зданий такими устройствами.

В первую очередь были сделаны попытки на основе имеющихся механизмов создать радиоуправляемые бульдозеры и погрузчики [Ч25, Ч26].

В сжатые сроки целым рядом предприятий были изготовлены комплекты аппаратуры для радиоуправляемой партии бульдозеров. Прошли срочную подготовку механики-водители, а в цехах ряда заводов Москвы, Киева, Ленинграда, других городов были собраны партии таких машин.

В эти же дни специалисты ГосИФТП совместно с ВНИИТРАНСМАШ и ВНИИ АЭС НПО «Энергия» разработали специализированный транспортный робот СТР-1 для работы на кровлях (см. рис. 30) и комплекс «Клин-1» для работы на территории ЧАЭС.



*Рис.30. СТР-1 участвовал в очистке крыши на ЧАЭС от выброшенных при аварии радиоактивных материалов. Эксплуатировался при уровнях гамма-фона вплоть до 3000 Р/час.*

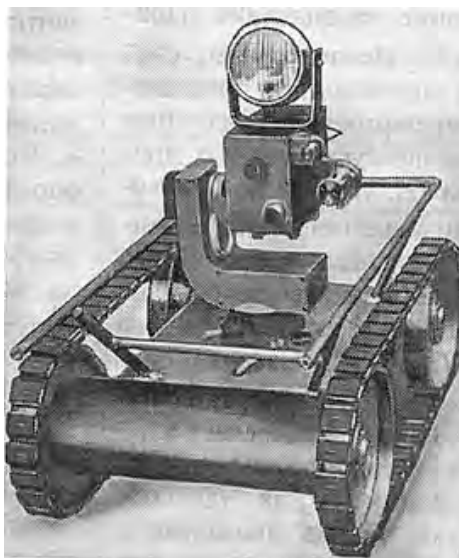
«Клин-1» был создан на базе инженерной машины разграждения ИМР-2 и состоял из машины-робота и машины управления.

Институт монтажной технологии (НИИКИМТ) предложил манипулятор М-133 с грейфером. Предприятие «Белоярский атомэнергоремонт» создало управляемый по кабелю механизм для сухой дезактивации – «пылесос».

В ЦНИИ РТК при ЛПИ им. Калинина (С.-Петербург) были созданы роботы-разведчики РР-1, РР-4, РР-Г1 (см. рис. 32), РР-Г2, тяжелые гусеничные роботы ТР-Г1, ТР-Г2.

В Германии были приобретены радиоуправляемые манипуляторы MF-2 и MF-3<sup>14</sup>, радиоуправляемые бульдозер PR-751, экскаватор и погрузчик. Япония поставила радиоуправляемый бульдозер Д-155.

Однако, необходимость работы среди массивных построек и в развалинах препятствовала использованию радиоуправляемых изделий, а высокие радиационные поля, создавали помехи для работы электроники.



*Рис.31. Легкий робот – разведчик РР-Г1*

<sup>14</sup> Оба манипулятора ФРГ практически при первых же попытках их использования вышли из строя под действием радиационных полей в сотни Р/час.



Механизмы, управляемые по кабелю, имели свои недостатки – недостаточную проходимость, невозможность управления ими оператором в условиях отсутствия прямой видимости и т.п. **В результате дистанционные механизмы сыграли достаточно скромную роль при работах по очистке и дезактивации площадки и крыши зданий. Основная тяжесть легла на плечи людей, непосредственно управлявших механизмами или работавших вручную на этих объектах** (рис. 32).



Рис. 32. Дезактивация площадки ЧАЭС.

Результаты проведенных работ (и естественного радиоактивного распада радионуклидов) привели к тому, что величины МЭД в локальной зоне к моменту завершения строительства «Укрытия» упали в сотни раз [В4, В8].  
Величины МЭД измеренные сотрудниками «Курчатовского института» по периметру сооружения в ноябре 1986г. приведены на рис. 33, 34 (сравните с рис. 11).

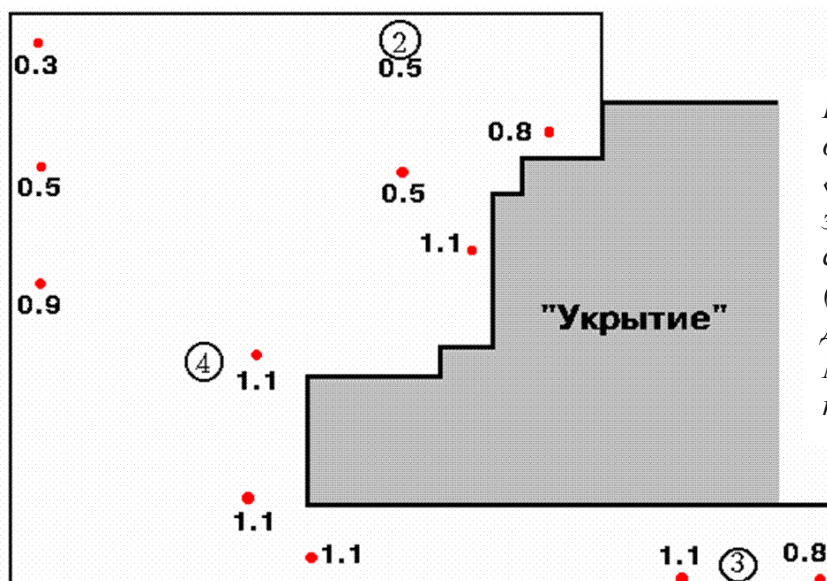


Рис.33. Радиационная обстановка на площадке «Укрытия» в момент завершения строительства объекта (МЭД – Р/ч).  
Дальнейшая динамика МЭД для точек 2÷4 приведена на рис. 34[В4]

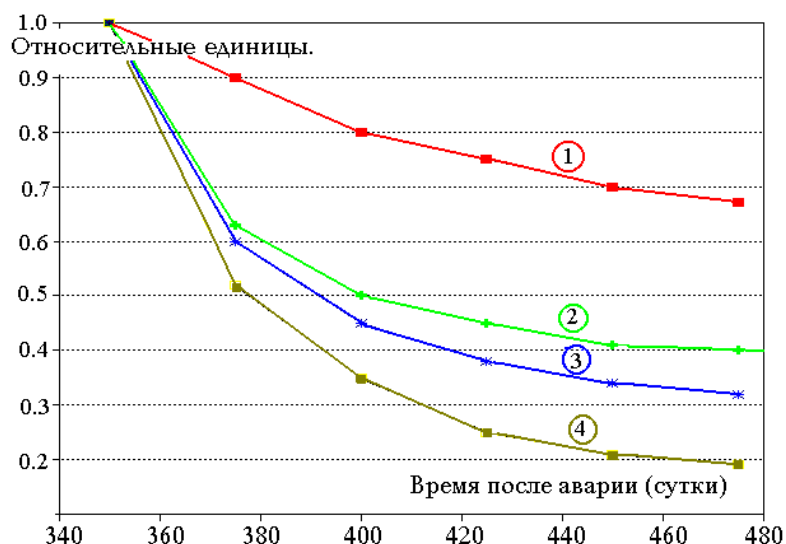


Рис.34. Результаты измерений МЭД в 3-х точках (2, 3, 4 рис. 11) вокруг «Укрытия», проведенных в период времени от 340 до 480 дней после аварии. Кривая 1 – расчет падения гамма-активности для топлива разрушенного блока [B4].

Особые трудности вызвали работы по очистке и дезактивации крыш зданий, примыкающих к реакторному отделению аварийного блока. (см. рис. 35).

На первом этапе ликвидации аварии летом и осенью 1986 г. крупные радиоактивные осколки были убраны практически вручную. При этом предполагалось, что оставшийся уровень радиационного загрязнения кровельных покрытий (с учетом радиоактивного распада) вскоре достигнет безопасной величины и позволит проводить регламентные работы в помещениях машзала 3-го блока, который должен был быть введен в строй в начале 1987г.

Однако, уже в конце 1986г. выяснилось, что частицы ядерного топлива, графита, разрушенных конструкций реактора, попавшие в разогретом состоянии на рубероидную кровлю машзала, проникли в нее на большую глубину и стали источниками сильных радиационных полей. Встал вопрос о полной замене загрязненной кровли, а это грозило дополнительной многомесечной задержкой пуска блока и очень большими материальными и дозовыми затратами.

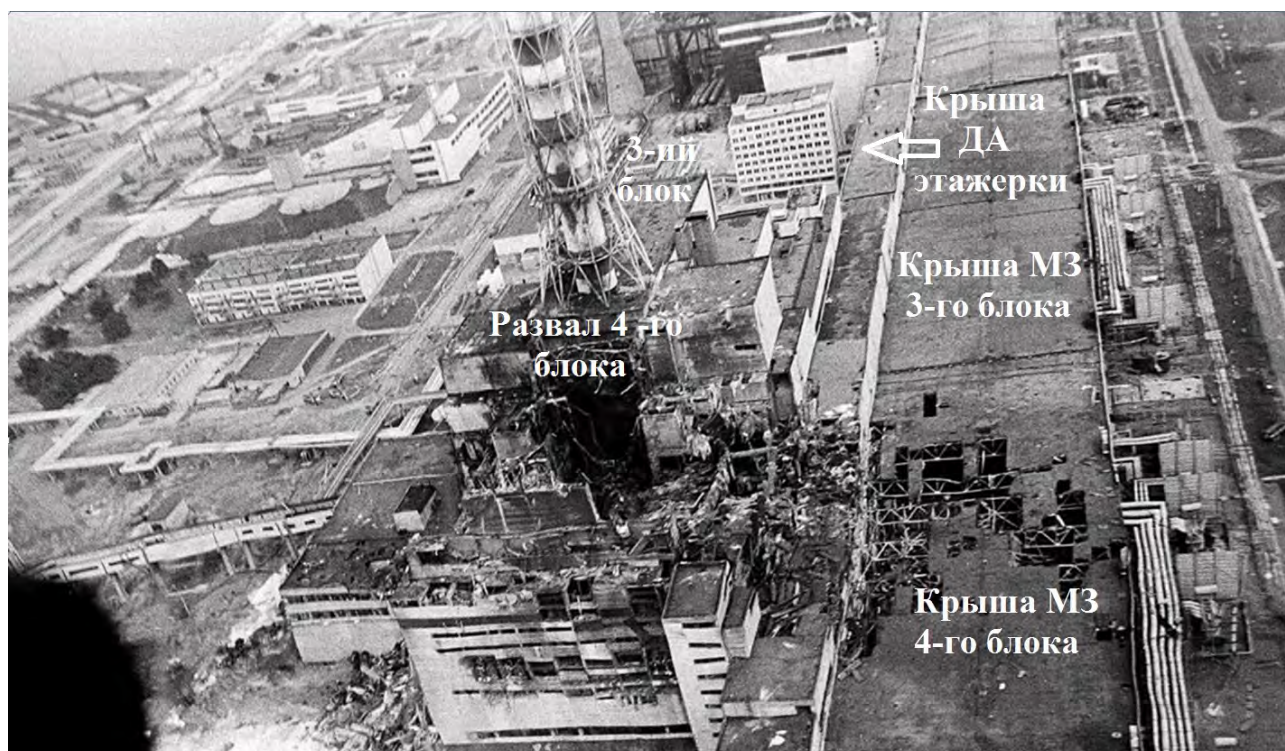
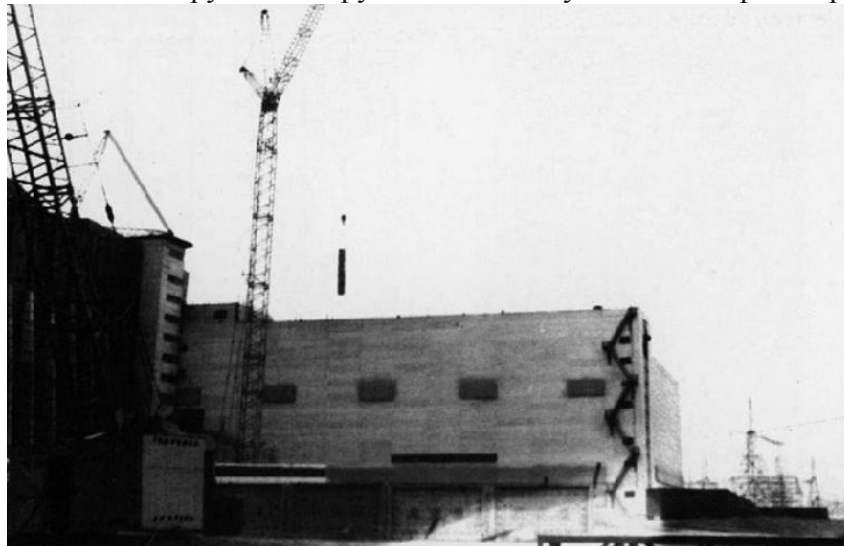


Рис.35. Крыши 4-го блока после аварии.

Решение проблемы было найдено специалистами НИКИМТ, разработавшими технологию позволяющую дистанционным образом удалять радиоактивный мусор (в том числе и фрагменты ядерного топлива), внедрившийся в материал кровли.

В ее реализации участвовал целый ряд организаций, выполняющих работы по ЛПА. Выполнялась очистка с помощью «промокашек» (рис. 36). Такое название получила конструкция в виде сваренной из металлических швеллеров рамы, размером в несколько квадратных метров. Снизу к ней прикреплялась металлическая сетка с привязанными к ней тканевыми лентами. Вся конструкция погружалась в ванну с клеящим раствором.



*Рис. 36. Укладка «промокашки» на кровлю машзала*

Затем, с помощью вертолета (а в более поздний период работы - краном) «промокашка» переносилась на кровлю, где через определенное время (1,5 – 2 суток), клей схватывался. После этого конструкция также вертолетом (краном) отрывалась от кровли и вместе с приклеившимся к ней мусором и частью верхнего слоя покрытия, грузилась на самосвал и перемещалась к месту захоронения

#### *1.5. ОПЫТ ИЗВЛЕЧЕНИЯ РАЗРУШЕННОГО ТОПЛИВА ИЗ МАШЗАЛП 4-го БЛОКА (см.[В4, Ч23]).*

Крупным мероприятием, сопровождавшимся извлечением радиоактивных материалов из объекта «Укрытие», стало укрепление конструкций машзала и деаэрационной этажерки 4-го блока. Эта работа была выполнена Комплексной экспедицией при Институте атомной энергии им. Курчатова (КЭ)<sup>15</sup> в 1988г. [В4, В5].

Необходимость проведения работы диктовалась тем, что в результате взрыва реактора верхние части каркаса деаэрационной этажерки оказались либо полностью разрушенными, либо сильно деформированными. Из-за этого вся конструкция находилась в крайне неустойчивом положении. А ее обрушение (например, в случае землетрясения) могло привести к падению основных опорных балок кровли «Укрытия»<sup>16</sup> и, как следствие, разрушению всего здания.. Строительные и монтажные работы по укреплению конструкций можно было провести только после очистки помещения от многочисленных радиоактивных обломков (см. рис. 37, 38).

<sup>15</sup> КЭ была организована 03.12.1987 г. - приказом Минсредмаша для проведения на объекте «УКРЫТИЕ» НИР и организации сопутствующих строительно-монтажных работ.

<sup>16</sup> Так называемых, «Мамонт» и «Осьминог»





*Рис. 37. 1986г. Машинный зал 4-го блока после аварии.*



*Рис. 38. МЗ после работ по очистке и дезактивации.*

Активная подготовка к очистке МЗ была начата в 1988г. За период 1988 – 89гг. в нем были возведены разделительно-подпорные стены, усилен каркас деаэрационной этажерки, произведено укрепление и бетонирование еще целого ряда конструкций «Укрытия» (рис. 39), выполнено новое покрытие над машинным залом (в осях 41 – 49), опирающееся на вновь возведенные стены (рис. 40).

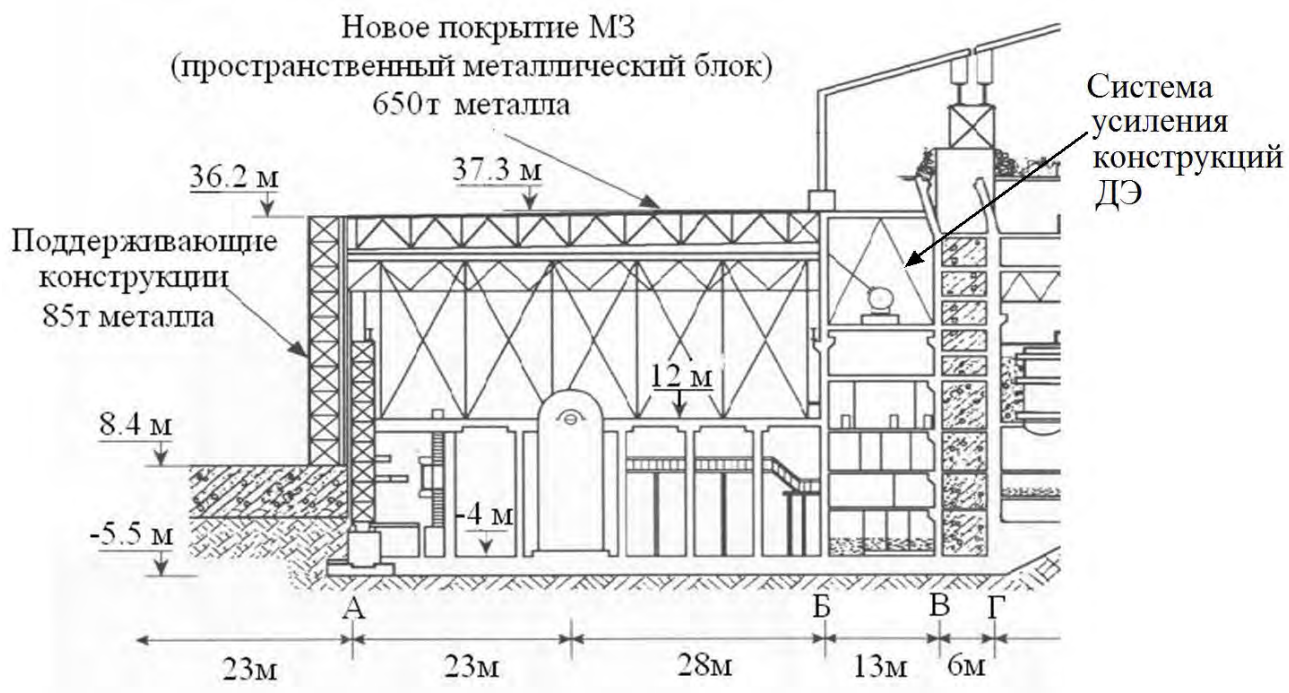


Рис. 39. Схема усиления конструкций машзала и каркаса ДЭ (южная зона «Укрытия», разрез по оси 50).



Рис. 40. Кровли машинного зала.

Разборка завалов в машзале и последующее укрепление его конструкций и каркаса ДЭ стали первыми работами по обращению с большим количеством ВАО, выполненными в

относительно спокойных условиях<sup>17</sup>. До этого острая нехватка времени и отсутствие необходимых технических средств, не позволяли провести полноценную подготовку к работам такого масштаба..

В результате удалось добиться значительного уменьшения коллективной дозы для, сотрудников КЭ.

***Одновременно, стал более понятным объем и стоимость предстоящих работ по выводу из эксплуатации 4-го блока и сделаны первые оценки стоимости разборки «Укрытия» и извлечения топлива.***

В этих оценках указывалось, что работы, проведенные в 1988 г., потребовали затрат в ~ сто миллионов рублей (по ценам 1988г.) и привлечения к работе в условиях повышенной радиации ~ 3 тысяч людей. В то же время, по оценкам, в машинном зале находилось почти в сто раз меньше топлива, чем в целом в «Укрытии». При этом в МЗ радиоактивные материалы находились в открытом, относительно удобном для удаления виде.

***1. 6. НЕБОЛЬШОЕ ОТСТУПЛЕНИЕ. НАДО ЛИ ВООБЩЕ БЫЛО СТРОИТЬ «УКРЫТИЕ», А ЗАТЕМ РАЗРАБАТЫВАТЬ ПЛАНЫ ПО ЕГО РАЗБОРКЕ И ИЗВЛЕЧЕНИЮ РАЗРУШЕННОГО ТОПЛИВА?***

Напомним, что после окончания активной стадии аварии и падения на много порядков выброса радиоактивности встал вопрос о необходимости надежно закрыть разрушенный блок.

Было ли это так уж необходимо в тех условиях?

Чем больше времени проходит, тем чаще слышатся голоса, что строительство такого сооружения было вообще бесполезным, а с учетом огромных дозовых и финансовых затрат, вредным мероприятием. Говорят, что не надо было вообще ничего делать, просто ждать несколько лет, продумать все шаги, разработать необходимые технологии, потом разобрать 4-ый блок, а топливо захоронить.

Насколько обоснованы эти высказывания?

В начале мая 1986г. 4-ый блок представлял собой открытый источник огромной активности. На поверхности развала реактора, в разрушенных и сохранившихся помещениях, на кровлях, и внешних поверхностях здания было сосредоточено множество выброшенных фрагментов активной зоны и топливной пыли. Согласно более поздним оценкам только на поверхности и внутри развала в центральном зале находилось (5 - 10) т такой пыли. Через десять дней после аварии активность ее составляла около 50 миллионов Кюри. Ветровой перенос из открытого источника такой мощности привел бы к быстрому расползанию высокоактивного пятна. Ни о каком пуске 1, 2 и, тем более, 3-го блока не могло быть и речи.

Ежегодно на территорию ЧАЭС выпадает около 600 мм осадков. Пройдя через помещения «Укрытия» и сделавшись радиоактивной, она рано или поздно должна попасть в грунт. До 10 тысяч кубометров высокоактивной воды в год !

Наконец, попадая в скопления ТСМ, вода может провоцировать повышение их критичности, т.е. представляет и ядерную опасность.

***Поэтому было признано необходимым возможно быстрее создать барьеры на пути вторичной миграции радионуклидов и интенсивного загрязнения окружающей среды. Максимально повысить ядерную безопасность объекта . Без этого было невозможно пытаться восстановить работу первых трех блоков, снизить дозовые нагрузки для людей,***

---

<sup>17</sup> В течение 1988-1992г.г. было выполнено и реализовано более 50 проектов (меньших по масштабам, чем в МЗ) по усилению наиболее ответственных конструкций. Это значительно повысило надежность и безопасность «Укрытия».



*работающих на ЧАЭС и в Зоне. Преобразовать 4-ый блок в экологически безопасную систему*<sup>18</sup>.

Через 25 лет, после аварии на АЭС Фукусима-1 эти же вопросы встали перед японскими специалистами. Что дальше делать с разрушенными блоками? Как они предполагают поступать и как используют опыт ЧАЭС, мы обсудим во второй части настоящего обзора.

Итак, специалисты приняли решение. Как его выполнить быстрее и эффективнее с минимальными дозовыми и материальными затратами?

По этому вопросу в Минсредмаше проходили постоянные совещания. На одном из них Министр (Е. П. Славский) выступил с предложением забетонировать целиком аварийный реактор, превратить весь четвёртый блок в огромный бетонный куб.

Однако с этим не согласился Директор «Курчатовского института» академик А.П. Александров, сказавший, что продолжающееся тепловыделение топлива приведет к вскипанию находящейся в бетоне и воды и к разрушению конструкции.

Неудачный опыт такого бетонирования уже был. Вот что вспоминает академик Е.П. Велихов: «... мы отвал блока залили бетоном, настояли тогда ... что необходимо залить. Приехали на следующий день, а там фонтанчики – весь бетон кипит» [В27].

Мы упомянули о идее Е. П. Славского залить 4-го блок бетоном (омоноличивание) поскольку она позднее возродилась и активно разрабатывалась вплоть до начала 2000-х годов. При этом предлагалось замоноличивать уже созданное «Укрытие» (см. ниже).

## *1. 7. ПУТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ «УКРЫТИЯ».*

Как уже говорилось в Введении к 1990г. специалисты смогли подробно обследовать большинство помещений «Укрытия» и выяснить, что платой за рекордно короткие сроки создания объекта (6 месяцев) стала не только большая коллективная доза, полученная строителями, но и принципиальные недостатки самого объекта, делавшие достаточно ограниченным срок его службы. Объект мог представлять опасность для работающих на станции людей и окружающей среды и эта опасность с течением времени возрастала.

«Курчатовским институтом» была предложена концепция преобразования «Укрытия».

Согласно ей над существующим объектом должно было быть возведено «Укрытие-2», позволяющее полностью изолировать внешнюю среду от радиоактивных материалов.

Одновременно, «Укрытие-2» должно было служить надежной оболочкой, под которой можно было бы провести разборку аварийного блока.

Авторы предложения обратились к Министру атомной энергетики и промышленности В.Ф.

Коновалову с докладной запиской, в которой просили предварительную проработку различных вариантов преобразования поручить ФГУП ГИ «ВНИПИЭТ» (Санкт-Петербург).

Предложение было принято и ТЭО появилось в марте 1991г.

В документе рассматривалось несколько вариантов (см. рис. 41).

- **«Зеленая лужайка»** (полная разборка «Укрытия» и захоронение р/а материалов).
- **«Холм»** (полная засыпка объекта, превращение его в большой холм, а в далеком будущем его разборка).
- **«Промежуточное омоноличивание», «Монолит»** (последовательная заливка бетоном помещений объекта, а в далеком будущем его разборка).
- **«Арка»** (создание герметичного «Укрытия-2» над существующим объектом, обеспечивающего длительное хранение топлива, вплоть до его окончательной разборки).

---

<sup>18</sup> Экологически безопасная система - экологическая подсистема (то есть составная часть природного кругооборота), состояние которой исключает угрозу ухудшения экологических условий и возникновения опасности для здоровья людей («Стратегия преобразования объекта «Укрытие» от 12.03.2001г.).

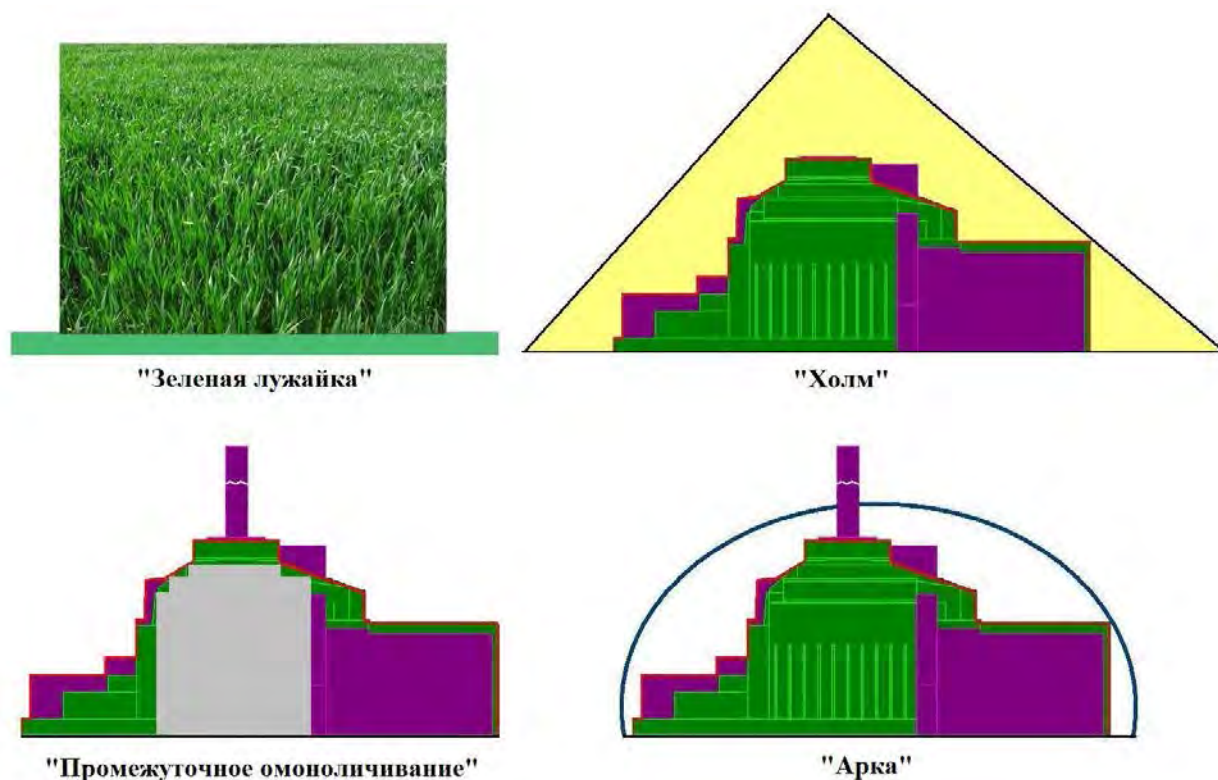


Рис. 42.. Варианты преобразования «Укрытия», рассмотренные в работе ВНИПИЭТ.

15 марта 1991г. результаты работы ВНИПИЭТ обсуждались на Научно-техническом Совете Минсредмаша СССР.

Большинство выступавших, в том числе и Министр, поддержали вариант омоноличивания. В решении Совета было записано: «Принять в качестве 1-го этапа для дальнейшей работы над проектом и практической реализации вариант «Промежуточного омоноличивания» и длительной консервации объекта «Укрытие».

Что касается прежних возражений, связанных с возможностью теплового разрушения конструкции, то они были сняты - по прошествии 4-х лет, остаточное тепловыделение топлива уменьшилось почти в 200 раз.

Однако, не все присутствующие были согласны с этим решением. Ряд экспертов выступил как на Совете, так и после него, против скоропалительных действий в этой области (В.Г. Барьяхтар, А.А. Боровой А.А., Г.А. Готовиц и др.). Их возражения против варианта «Промежуточное омоноличивание» позднее были поддержаны руководством Комплексной экспедиции и регулирующими органами Украины.

Мы приведем здесь кратко некоторые из этих возражений, тем более, что, как уже говорилось, идея «Монолита» постоянно возрождалась в разных вариантах и под разными названиями.

В предлагаемых проектах рассматривали частичное или полное омоноличивание обычным бетоном, заполнение помещений «легким бетоном», засыпка песком и заливка водо - песчаной смесью, полиуретаном, бутылкаучуковой мастикой и т. п.

Все проекты подразумевают значительную (до 500 лет) отсрочку начала извлечения РАО и ТСМ.

На первый взгляд идея заполнить, например, бетоном существующее «Укрытие», обезопасить тем самым внешнюю среду и значительно отодвинуть сроки разборки, кажется привлекательным по многим параметрам. В том числе по стоимости проведения работ, дозозатратам, надежности временного захоронения и т.п.. По первоначальным оценкам специалистов ВНИПИЭТ, работы можно было бы осуществить за 3,5 - 4 года. Для этого необходимо было уложить 200 тыс. куб. м бетона, что существенно меньше, чем было

использовано при сооружении саркофага. Ориентировочная стоимость всех работ оценивалась в ~ 200 млн. долл.

В высказанных на совещании в Минсредмаше возражениях говорилось о том, что для реалистичной оценки необходимо провести более детальное рассмотрение производства работ. А такое рассмотрение показывает, что при реализации проекта многие преимущества омоноличивания теряются.

Например, заполнение сотен помещений «Укрытия» бетоном потребует проведения значительных подготовительных работ не только на площадке, но и внутри самого объекта. Даже в целых, не имеющих серьезных повреждений помещениях, бетонирование «самотеком» вызовет образование объемных воздушных пузырей. Скорее всего, под потолком, если «смесь» вливается через дверь.

Пузыри опасны тем, что при заливании следующего этажа, при значительном увеличении нагрузки на перекрытия (часто поврежденных при аварии), могут произойти обрушения, сопровождающиеся выбросом и перемещением радиоактивности.

Можно вспомнить, что неконтролируемое бетонирование при создании опорных конструкций «Укрытия» в 1986г. сопровождалось обрушением части разрушенных внутренних стен и потолков и ухудшением радиационной обстановки на площадке из-за выброса пыли.

Что бы избежать этого, скорее всего, пришлось бы бурить скважины в помещения и уже контролируемым образом заливать бетон и выпускать воздух. А бурение скважин в объекте связано с проведением большой дополнительной работы по дезактивации помещений для буровых станков, укреплению полов, монтажу оборудования и т.п.

Далее, при заполнении бетоном помещений со скоплениями ТСМ возможно изменение геометрии и перемещение этих скоплений. При этом все проведенные до тех пор исследования местоположения и состояния топливных масс окажутся неинформативными. Кроме того, это приведет к полному нарушению работы только что созданной системы диагностики ТСМ.

Будет потерян контроль (с таким трудом установленный) над топливом.

В то же время, омоноличивание не перекроет путей поступления к ТСМ воды.

Говорилось и о том, что существуют пессимистические предсказания относительно устойчивости возможно поврежденного фундамента блока при значительном увеличении нагрузки на него.

Позднее (в 2000г.) в работе [Ч28] был сделан количественный анализ целесообразности экранирования радиоактивных отходов объекта «Укрытие» с помощью их засыпки или цементирования. Приводятся некоторые расчеты стоимости работ и дозовых затрат, которые оказываются не приемлемо большими.

Авторы отмечают следующее.

«Омоноличивание или заливка конструкций и завалов может привести к смещению существующих конфигураций ядерноопасных делящихся материалов, безопасность которых подтверждена временем эксплуатации объекта «Укрытие», и повышению риска ядерного инцидента.

Указанные недостатки свойственны и вариантам засыпки сыпучими материалами.

Работы по экранированию вызовут существенное дополнительное радиационное воздействие на персонал и окружающую среду...

Экран на пути к основным источникам ТСМ и РАО в конечном итоге становится дополнительным препятствием, на преодоление которого потребуются средства, время, а может быть и специальная техника».

Наконец, существуют и возражения, носящие общий характер.

При омоноличивании огромные массы заливаемой в «Укрытие» «смеси» придут в соприкосновение с РАО и ТСМ, загрязнятся и во много раз увеличат их объем в объекте, которых уже сейчас насчитывают более 150000 м<sup>3</sup>.



Такой подход противоречит основным документам МАГАТЭ.

В сформулированных этой организацией «*Принципах обращения с радиоактивными отходами*»<sup>19</sup> говорится.

***Принцип 7. Контроль за появлением радиоактивных отходов.***

***Появление радиоактивных отходов должно сохраняться на минимально возможном уровне***

Далее. В проекте «Монолит» окончательное извлечение РАО и ТСМ предполагается предоставить будущим поколениям. При этом, как отмечалось, омоноличивание может значительно затруднить этот процесс.

Снова обратимся к «Принципам обращения с радиоактивными отходами»

***Принцип 5. Обременение будущих поколений.***

***Обращение с радиоактивными отходами должно выполняться таким образом, чтобы не налагать дополнительных трудностей на будущие поколения***

Таким образом, выбор варианта «Монолит» и аналогичных ему означает отступление от основополагающих документов по безопасности.

#### ***1. 8. ОБРАЩЕНИЕ С РАДИОАКТИВНОЙ ПЫЛЬЮ И АЭРОЗОЛЯМИ (см. [B5], [Ч28 - Ч29]).***

При любых вариантах преобразования «Укрытия» проектировщики должны будут обратить особое внимание на защиту персонала и окружающей среды от негативного воздействия радиоактивных аэрозолей. И здесь важно полностью использовать опыт, полученный как при масштабных работах в период создания объекта, так и при проводимых в его помещениях локальных исследованиях. Именно разработанные в Чернобыле технологии и сконструированные установки позволили в течении десятилетий обеспечивать безаварийную эксплуатацию «Укрытия» - сохраняя параметры его влияния на окружающую среду в безопасных пределах.

Одной из таких установок стала стационарная система пылеподавления (СПП), сконструированная и смонтированная по инициативе руководства КЭ под кровлей ЦЗ. Ее периодическая работа началась в конце 1989г.

Первоначально в воздушное пространство над ЦЗ через люки в легкой кровле и проходки в трубном накате были опущены 14 форсунок, которые позволили проводить периодическое распыление специальных жидких составов (см. рис.43, 44).

Таким образом, смачивалась и связывалась пыль на поверхности развала. В дальнейшем жидкость высыхала, создавая поверхностную пленку, препятствующую пылеобразованию. Пленка обладала высокой радиационной и химической стойкостью. Она относилась к классу пожаро – взрывобезопасных и экологически безопасных материалов.

Пылеподавляющий состав приготавливался в емкостях-смесителях и подавался по напорному коллектору насосами, установленными в специальных помещениях, расположенных на бетонной площадке с северо-запада объекта.

Управление системой пылеподавления производится из операторского помещения, расположенного также на этой площадке.

---

<sup>19</sup> Основы безопасности МАГАТЭ: принципы обращения с радиоактивными отходами (Safety Series, No III-F, публикация МАГАТЭ в рамках программы RADWASS).

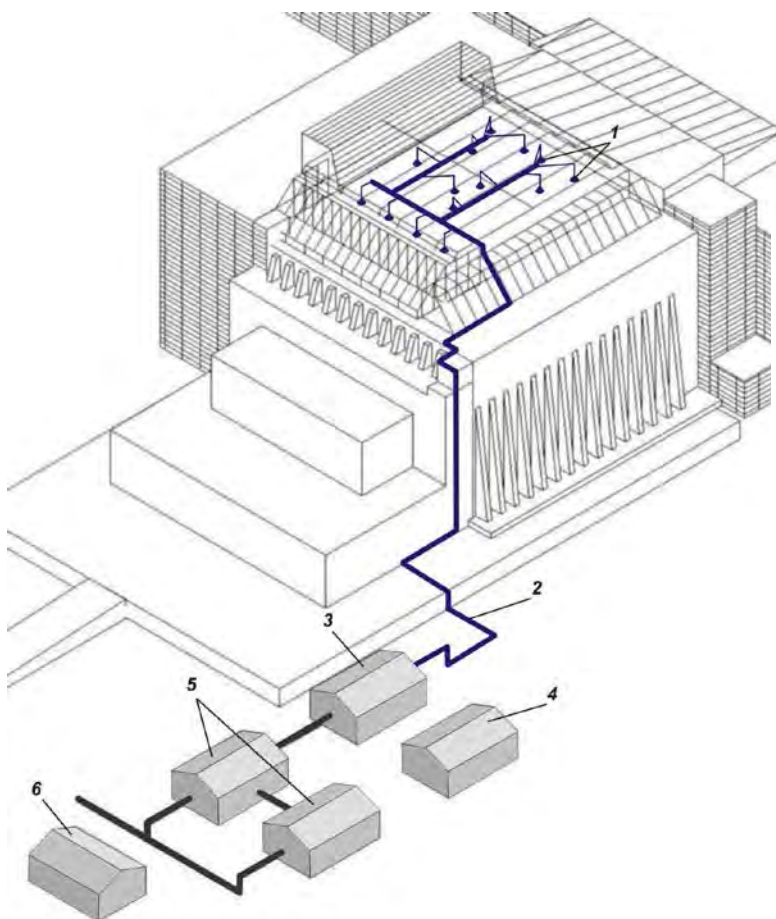


Рис. 43. Схема стационарной системы пылеподавления - СПП до модернизации.

1. Форсунки, закрепленные над развалом в ЦЗ.
2. Напорный коллектор.
3. Насосное отделение.
4. Операторская.
5. Реакторы (помещение для емкостей смесителей).
6. Склад химреагентов.



Рис.44. Пылеподавляющий «факел» СПП над развалом в ЦЗ

Эффективность работы СПП демонстрирует график зависимости средне – годовой концентрации плутония в аэрозолях на промплощадке объекта «Укрытие» в зависимости от времени в 1989 – 93гг. (рис. 45)

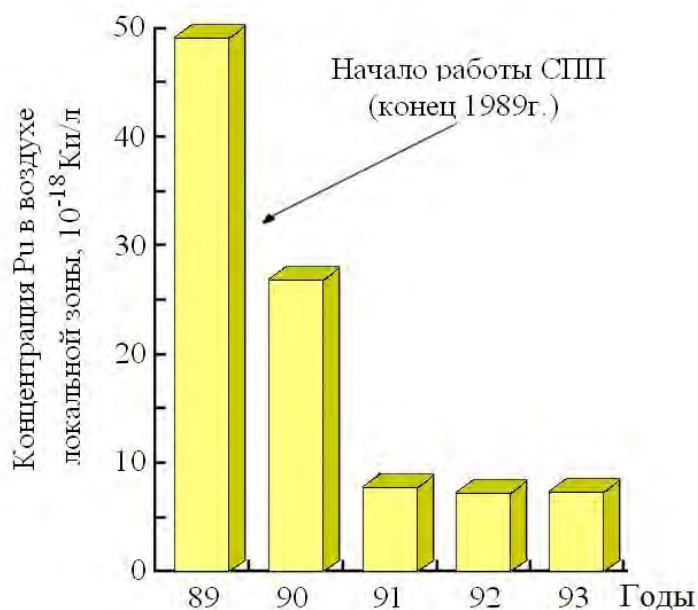


Рис. 45. Средне - годовая концентрация плутония в аэрозолях на промплощадке объекта «Укрытие».

При пылеподавлении в развал попадает дополнительное количество воды. И хотя ее было на порядок меньше, чем проникающей в «Укрытие» при атмосферных осадках, вода эта может распространяться другими путями. В результате нет гарантии в том, что пылеподавление отрицательно не скажется на подкритичности топливных скоплений. Поэтому при создании СПП было предусмотрено, введение в состав распыляемых растворов нейтронно-поглощающих веществ. В качестве такого вещества был выбран азотнокислый гадолиний. Это должно было компенсировать негативное влияние воды при проведении пылеподавлений и приводить к дополнительному уменьшению ядерной опасности ( $K_{\text{эфф.}}$ ) для скоплений ТСМ.

В 2003 – 2004гг. была проведена модернизация СПП (после этого система получила название МССП) [В5], [Ч30]. Был выполнен монтаж двух дополнительных коллекторов и форсунок по периферии подкровельного пространства, что позволило осуществлять нанесение пылеподавляющих покрытий на ранее не обрабатывавшиеся западную, южную и восточную зоны. Испытания показали, что напыляемое полимерное покрытие хорошо выполняет локализирующую функцию и надежно закрепляет радиоактивную пыль. Оно эластично и обладает необходимой радиационной и влагостойкостью. Предполагается, что при проведении работ по преобразованию объекта «Укрытие» стационарная система пылеподавления может быть использована (после соответствующей реконструкции) вплоть до ввода в эксплуатацию НБК.

В дальнейшем, при частичной разборке нестабильных конструкций «Укрытия» предполагается, что она будет демонтирована, а ее функции, при необходимости, перейдут к мобильным системам пылеподавления.

Вообще работы по ЛПА на Чернобыльской АЭС послужили мощным толчком в развитии методов и средств дезактивации. Основную роль здесь сыграли специалисты Минобороны и Минсредмаша, особенно НИКИМТ.

В качестве эффективных методов для очистки загрязненных помещений «Укрытия» и подготовке их к проведению работ (особенно, с участием персонала) использовались дезактивация (жидкостная и сухая<sup>20</sup>) и нанесение защитных полимерных покрытий различного

<sup>20</sup> Жидкостная дезактивация - это дезактивация, основанная на использовании растворов, приводящая к образованию жидких радиоактивных отходов. Основным средством воздействия на радиоактивное загрязнение при жидкостной дезактивации служит раствор химических реагентов, пара, травильных паст, расплавленных солей и т.д.

Сухая дезактивация - это дезактивация, основанная на использовании полимерных композиций. При этом в результате проведения дезактивационных работ образуются твердые радиоактивные отходы.



назначения (пылеподавляющих, локализирующих, аккумулирующих).

При этом могла проводиться как полная дезактивация всего помещения, так и частичная - отдельных его поверхностей, металлоконструкций, оборудования и т. п.

Опыт, приобретенный в этой области, подробно описан в монографии [B5]<sup>21</sup>.

Он еще раз подтвердил каким важным фактором уменьшения коллективной дозы и финансовых затрат является заранее спланированная и оптимизированная последовательность выполнения дезактивационных работ.

Одной из задач, которую пытались разрешить исследователи, была задача предотвращения образования радиоактивной пыли из-за разрушения поверхности ЛТСМ. Поскольку извлечение лавы планировалось проводить в течение длительного срока (десятилетия) ее поверхность, разрушаясь, могла стать постоянным источником такой пыли и затруднить последующую очистку помещений. Надо было найти специальный, особо устойчивый локализирующий состав и обработать им открытую поверхность лавы.

Первые практические шаги на этом пути были сделаны в 2000г. (см. ниже).

### *1.9. ОПЫТ ИССЛЕДОВАНИЯ ТСМ В «УКРЫТИИ», ПОЛУЧЕННЫЙ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РАБОТ ВНУТРИ ОБЪЕКТА В 1988 – 2004гг. (БУРЕНИЕ СКВАЖИН) [B4, B8] .*

Речь идет о проведении визуальной, радиационной разведки и отборе сравнительно небольших образцов различных видов ТСМ. Такие работы проводились, прежде всего, с помощью специальных скважин, которые бурились из очищенных помещений объекта в его труднодоступные области.

Во Введении и в разделе, связанном с нахождением ядерного топлива в «Укрытии», уже говорилось о том, что начиная с 1988г. Комплексная экспедиция начала осуществлять большую программу по исследованию ТСМ в «Укрытии» и осуществлению превентивных мер для поддержания его в безопасном состоянии.

Выполнение этой программы предполагало проведение масштабных и технически очень сложных работ (см., например. [4]).

- Необходимо было очистить и дезактивировать ряд помещений с западной (а позднее - с южной) стороны блока.
- Установить в этих помещениях буровые станки.
- Пробурить скважины через бетонные стены и другие конструкции в шахту реактора и прилегающие к ней помещения, в подреакторные помещения.
- С помощью специальных перископов, телевизионных камер, фото оборудования провести наблюдения через пробуренные скважины.
- Обнаружив скопления ТСМ, измерить их параметры с помощью гамма, нейтронных и тепловых детекторов.
- Отобрать и исследовать пробы различных материалов.
- После этого, оценить реальную опасность топливных скоплений и осуществить мероприятия по ее снижению.
- Создать систему мониторинга состояния крупных скоплений топлива.
- Выработать предложения по укреплению внутренних конструкций, грозящих серьезными обрушениями.
- 

Следуя намеченному плану, были очищены и дезактивированы помещения с западной, а позднее с южной части «Укрытия». В них были установлены буровые станки и через бетон и металлические конструкции пробурены скважины к местам предполагаемых скоплений ТСМ. Для того, чтобы дать представление о масштабах проведенных работ, на рис. 46 показана схема скважин, пробуренных только на отметках от +8.800 до +9.400.

---

<sup>21</sup> Глава 10. Радиоактивная пыль и аэрозоли. Горячие топливные частицы.

Следует особо отметить, что до этого времени нигде в мире буровых работ в таких тяжелых радиационных условиях не проводилось.

Процесс бурения сопровождался проведением сложных мероприятий по защите от проникающего излучения и радиоактивных аэрозолей (использовались коллективные и индивидуальные защитные средства).

***В дальнейшем, опыт, полученный при работах со скважинами, может (и должен) быть использован при работах по извлечению топлива.***

К 1992г. полное число исследовательских скважин составило почти 150.

Позднее бурение скважин было приостановлено.

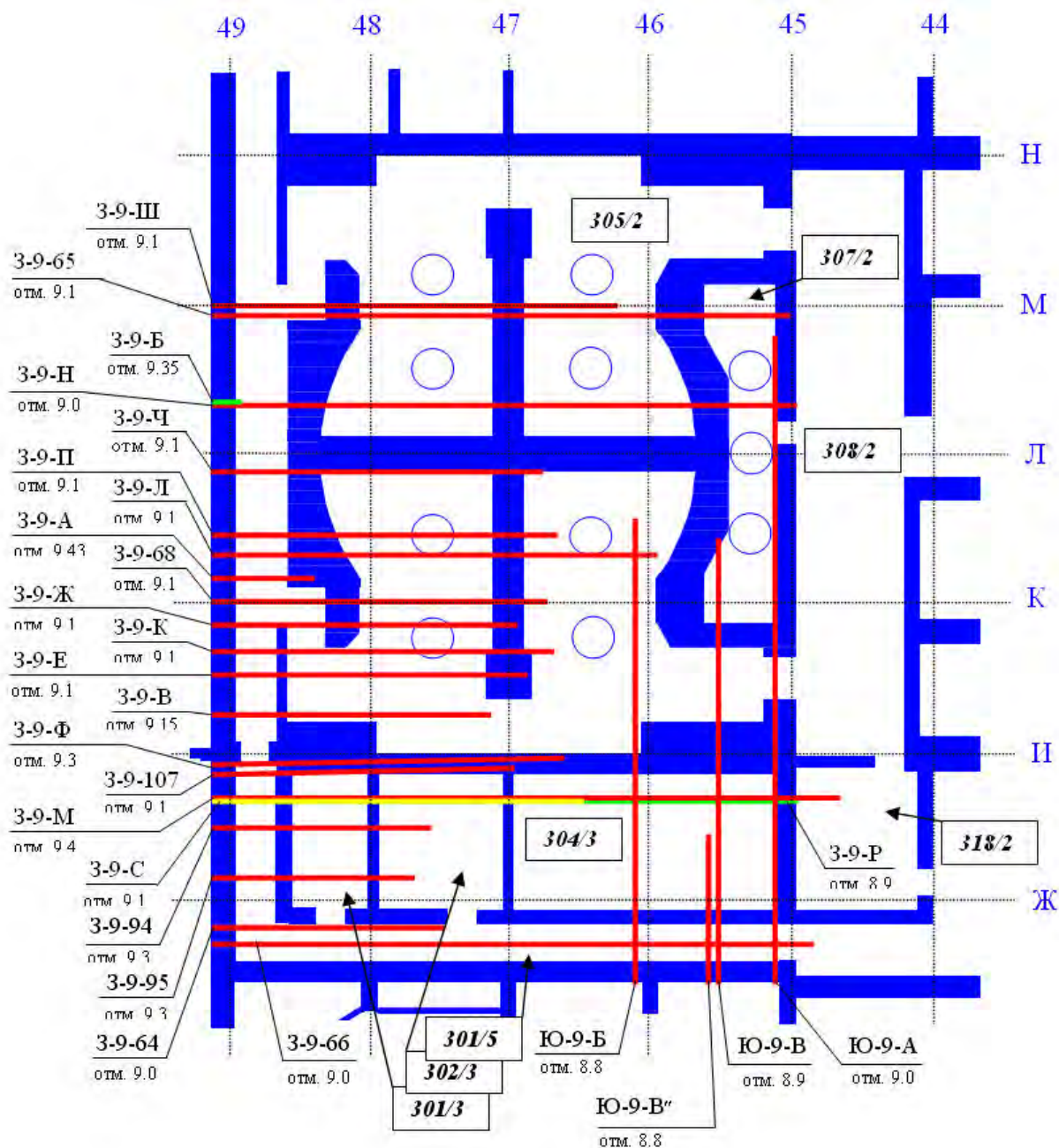


Рис. 46. Схема скважин, пробуренных в центральной части реакторного отделения на 4-ом блоке. Отметки от +8.800 до +9.400 [B4].

Наклонные скважины:

- 3-9-Ф (горизонтальный угол  $-1^\circ$ );
- 3-9-107 (горизонтальный угол  $-1^\circ$ , вертикальный  $-1^\circ$ ).

*1.10. ОПЫТ ИССЛЕДОВАНИЯ ТСМ В «УКРЫТИИ» (ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РОБОТОВ) [В6]. [Ч24 – Ч26].*

Хотя исследования с помощью скважин потребовали от специалистов КИ значительных усилий, именно они позволили получить основную информацию о местоположении и состоянии ТСМ в «Укрытии». Значительно менее успешно продвигалась работа по созданию дистанционно управляемых самоходных агрегатов (далее ДУСА или роботов), способных действовать в помещениях объекта.

Поскольку на этапе извлечения ТСМ использование ДУСА представляется необходимым, мы остановимся на возникавших проблемах.

Еще летом и осенью 1986г. на ЧАЭС стали поступать роботы, закупленные за рубежом и спешно изготовленные (чаще модернизированные) в лабораториях СССР. Предназначались эти устройства для проведения исследований внутри 4-го блока, в том числе, для отбора проб ТСМ в помещениях, недоступных для людей из-за больших радиационных полей.

К сожалению, все ДУСА оказались неработоспособными.

Основных причин, по которым это происходило, было три.

Во-первых, роботы не могли свободно передвигаться в разрушенных взрывами и пожаром, частично залитых бетоном помещениях, застревали в развалинах, в результате чего операторы много раз были вынуждены вытаскивать их на руках.

Во-вторых, при попадании в большие радиационные поля в электронных схемах ДУСА возникали помехи, которые делали механизмы неуправляемыми – они буквально «сходили с ума».



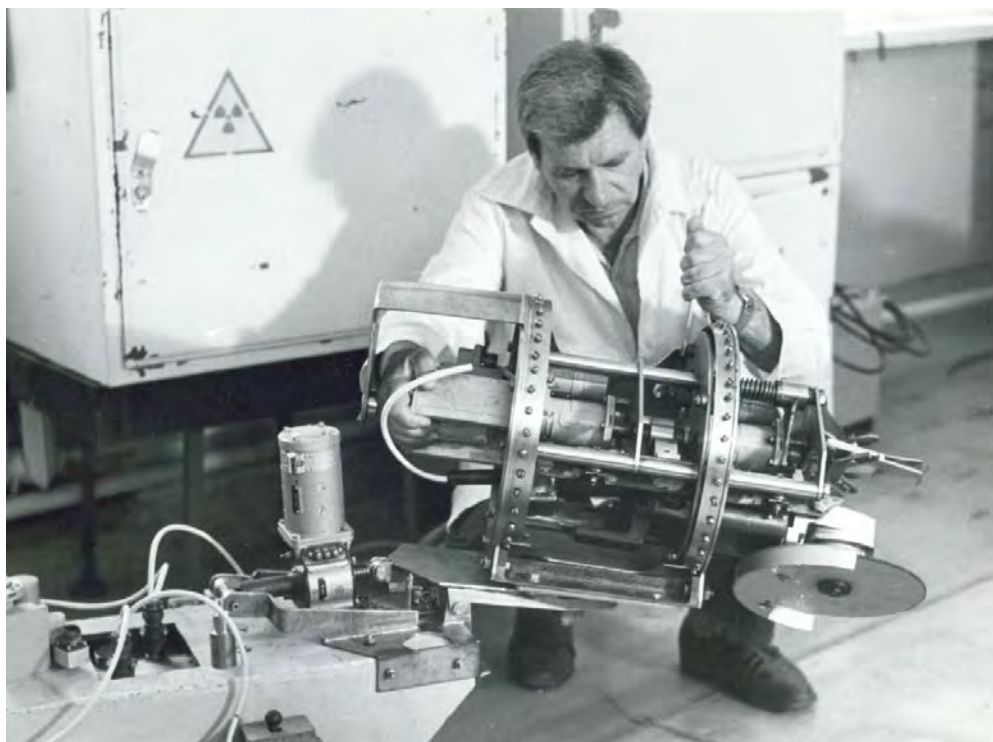
*Рис.47. Испытание робота полигоне в г. Чернобыль.*

Наконец, в-третьих. В условиях, когда перемещение робота практически всегда сопровождалось подъемом радиоактивной пыли, дезактивация большинства механизмов представляла значительные трудности и приводила к недопустимому облучению персонала или к необходимости отказа от дальнейшего использования ДУСА.

В результате проблема использования роботов отодвигалась по времени, пока в конце 1989г в «Курчатовском институте» не было решено самостоятельно приступить к изготовлению ДУСА для работы в «Укрытии». В КЭ была организована соответствующая лаборатория. Испытания



механизмов и обучение операторов проводились на специально оборудованном полигоне около лабораторного корпуса в г.Чернобыле (рис. 47). После создания в 1992г. в г.Чернобыле Межотраслевого научно-технического центра «Укрытие», продолжившего работы КЭ, лаборатория была преобразована в Отдел дистанционных комплексов и технологий (ОДКТ) (рис. 48, 49).



*Рис. 48. Наладка одного из роботов в лаборатории (г.Чернобыль)*



*Рис.49. Одно из помещений отдела дистанционных комплексов и технологий ОЯРБ МНТЦ «Укрытие» (г. Чернобыль).*

Опыт, полученный при работе на объекте «Укрытие», в том числе и результаты неудачных попыток, позволил специалистам ОДКТ сформулировать основные требования к создаваемым роботам.

- 1. В самом исполнительном механизме, находящимся при работе в области больших радиационных полей, необходимо использовать электромоторы, реле и другие элементы практически не чувствительные к радиации.**
- 2. Энергопитание и сигналы управления должны поступать к ДУСА по кабелю, соединяющему его с пультом управления. Назад, на пульт должна передаваться вся полученная информация. Здесь она может обрабатываться и храниться. Для того, чтобы оператор не подвергался опасности пульт должен располагаться в обслуживаемом помещении<sup>22</sup>.**
- 3. ДУСА должен обладать высокой проходимостью и быть небольших размеров для проникновения в проломы и работы в разрушенных помещениях.**
- 4. Из-за большого количества радиоактивной пыли в помещениях объекта (а иногда и присутствия ЖРО) в конструкции исполнительного механизма необходимо предусмотреть возможность его высокоэффективной и многократной дезактивации. Для этого большинство ДУСА перед работой «закутывались» в специальную ткань (рис. 50).**



*Рис.50. Робот, сконструированный в КИ. Специальное покрытие предохраняет его внутренние детали от запыления.*

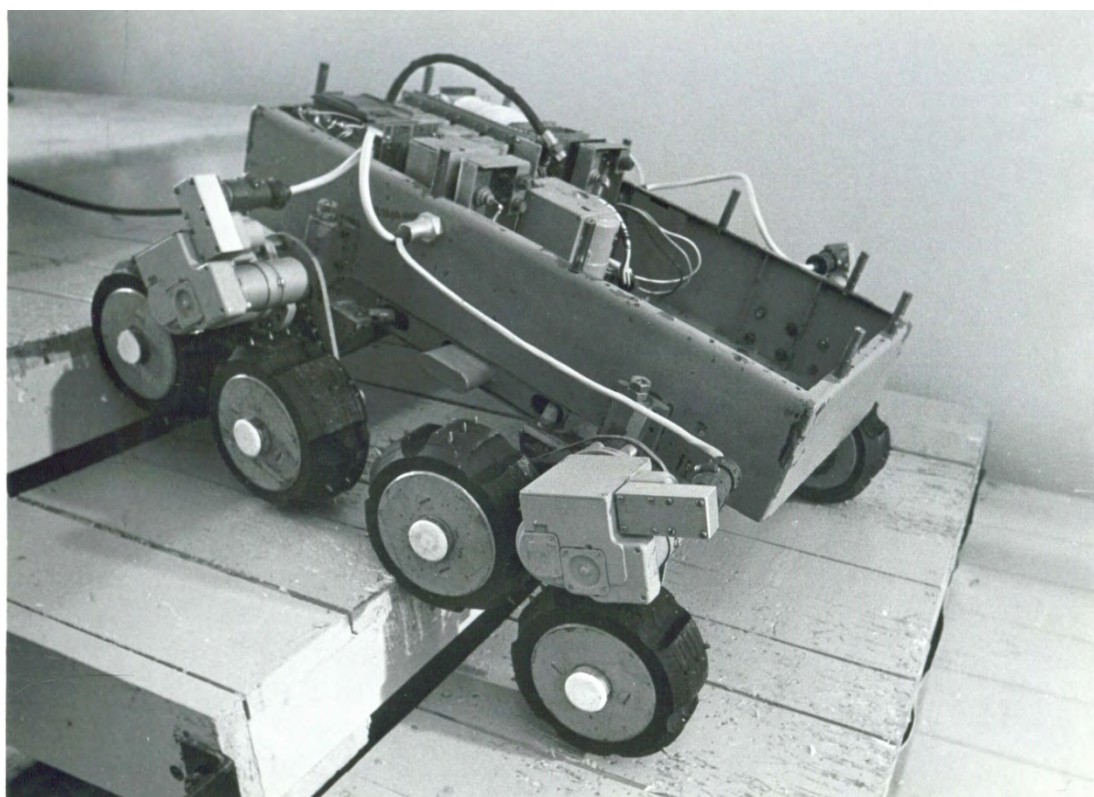
**5. В помещениях «Укрытия» наблюдается высокая влажность. Поэтому должна быть выполнена герметизация (и водоотталкивающая смазка) блоков и частей роботов, для которых опасно попадание воды.**

<sup>22</sup> Попытки передачи информации и управляющих сигналов по радио каналу во внутренних помещениях «Укрытия» окончились неудачей из-за экранирующего действия металлических конструкций.



**6. Желательно, чтобы большинство исполнительных механизмов имело унифицированную тележку (платформу).**

**Такие самоходные платформы для размещения самого различного оборудования были сконструированы и изготовлены в экспериментальных мастерских КИ (рис. 51).**



*Рис. 51. «Тележка» поднимается по ступеням лестницы.*

**7. Для выполнения сложных заданий надо предусмотреть возможность использования группы роботов, состоящей как из «исполнителей», непосредственно выполняющих работу, так и специальных «наблюдателей», с помощью которых оператор наблюдает и корректирует действия «исполнителей», ведет фото- и телесъемку.**

Кроме этих требований должны были выполняться и обычные – максимальная простота, надежность, простота ремонта, доступная стоимость и т. п.

Была разработана единая для серии ДУСА система передачи кодированных команд на борт установки, что позволило добиться унификации узлов пультов управления и бортовой автоматики.

В результате совместной работы «Курчатовского института» и МНТЦ было создано целое «семейство» роботов, которые в 1989 – 94 гг. успешно использовались при проведении исследований в «Укрытии» и позволили значительно уменьшить коллективную дозу, полученную специалистами, работавшими на объекте.

В это «семейство» входили ДУСА, оснащенные системой пылеподавления (они проникали в помещения блока и осаждали радиоактивную пыль с помощью распыления специальных составов), разведывательные (для ведения фото - и видеосъемки, отбора проб ТСМ и аэрозолей) и роботов, для проведения подготовительных и монтажных работ.

Их использование подробно описано в работе [В6] и др.

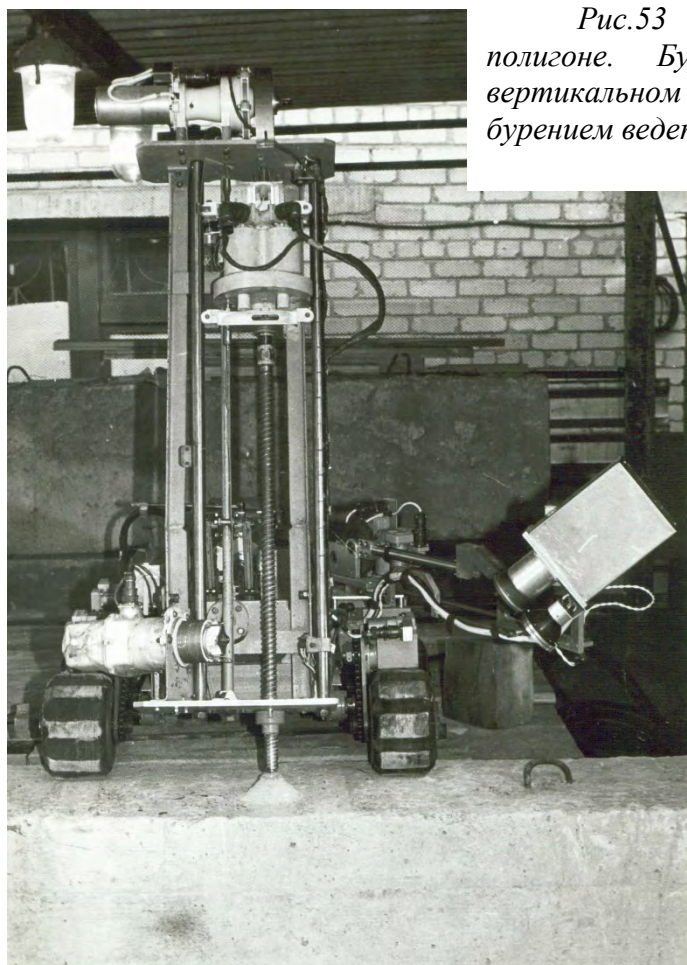
Здесь мы приведем только один пример – устройство для отбора проб ТСМ и бетона (название робота – «ТР-4»).



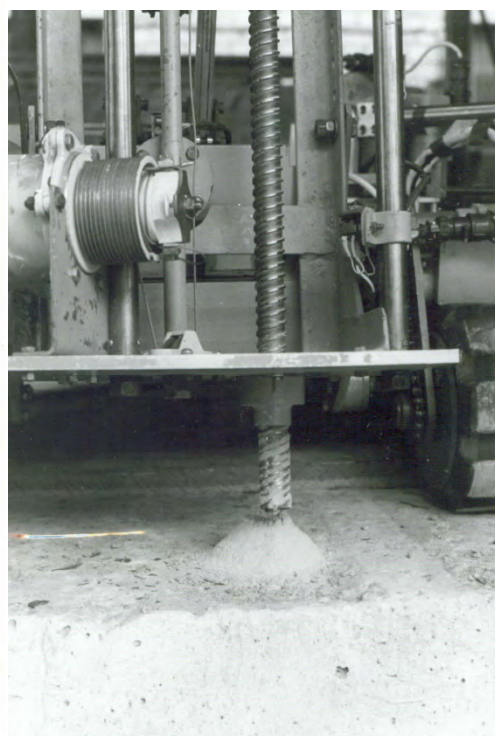
Он был изготовлен в конце 1990 года и мог отбирать пробы твердых материалов с глубины до 600 мм. (см. рис. 52 и 53).



*Рис 52 ТР-4 в транспортном положении, поднята только телекамера (она также может быть сложена).*



*Рис.53 Отбор проб на испытательном полигоне. Буровая установка работает в вертикальном положении. Наблюдение за бурением ведется с помощью телекамеры.*



Установка обеспечивала процесс бурения без использования промывочных жидкостей, чтобы не допустить вымывания фрагментов из образцов. Буровая головка установки могла придавать буровому инструменту как вращательное, так и ударное перемещение.

Специальный механизм поддерживал постоянство давления на забой в процессе бурения.

Буровым инструментом являлся полый шнек (винтовая трубка) длиной 750 мм, на конце которого размещалась буровая коронка. Внутри шнека находилось грунтозаборное устройство, которое заполнялось фрагментами породы по мере внедрения шнека в материал. Отбираемый керн автоматически помещался в специальный чехол из армированной ткани. При включении механизма выгрузки этот чулок с керном вытягивался из шнека, перевязывался через нужное количество сантиметров капроновой ниткой и наматывался на приемный барабан (Рис.54).

Таким образом, сохранялась последовательность слоев извлекаемых материалов, даже если они были сыпучими. В автоматике работа были максимально использованы электромагнитные реле, а системы пульта управления построены на микросхемах. На пульте управления помимо видеоизображения с работа поступали сигналы о срабатывании устройства подачи буровой головки и ее температуре.

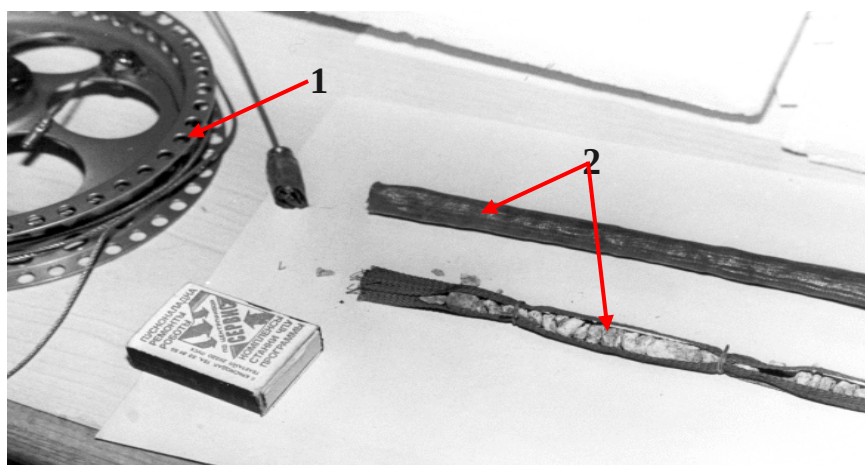


Рис. 54. Чехол из армированной ткани с пробой внутри (2) и приемный барабан (1)

Специальный управляющий кабель длиной до 50м содержал несколько жил для энергообеспечения, командные жилы, два коаксиальных кабеля для передачи видеосигналов и сигналов от детекторов излучения. Для возможности извлечения ТР-4 в случае отказа аппаратуры внутри управляющего кабеля был заложен кевларовый трос для извлечения установки.

Для обеспечения возможности проезда установки в разрушенные помещения буровое и телеоборудование в транспортном положении находилось в сложенном, компактном виде, а при подходе к рабочей зоне оно разворачивалось в штатное.

Летом 1991 года с помощью этого робота был проведен отбор проб в одном из коридоров (301/5), который находился с юга от шахты реактора. В него после аварии вытек один из основных потоков лавы – горизонтальный поток (см. рис. 22, 46 и 55).

Значительная часть ЛТСМ была залита сверху бетоном. Мощность дозы в этом помещении составляла несколько десятков рентген в час.

Контролируя движение и работу ТР-4 как с помощью собственной телекамеры, так и телекамерой, установленной на другом роботе (ТР-2), было проведено бурение и отбор проб в различных местах этого помещения. При этом бур проходил бетон, весь пласт лавы и углублялся в доаварийный бетон (пол) помещения (Рис. 56).

В результате впервые за время исследований на объекте «Укрытие» удалось провести отбор «горячих» кернов из вертикальных скважин.





Рис.55.  
Коридор  
301/5.

Анализ процесса бурения и полученных кернов показал (см. [57]), что доаварийный бетон пола помещения значительно деструктурирован (прожжен) и представляет из себя частично спекшуюся сыпучую массу, содержащую ЛТСМ.



Рис. 56. Схема работ по исследованию ЛТСМ и бетона в коридоре 301/5 с помощью ТР-4 (проводил бурение и отбор проб) и ТР-2 (осуществлял корректировку работы первого робота).

Успехи исследований, выполненных в помещениях «Укрытия» при бурении горизонтальных (и наклонных) скважин, позволили накопить достаточно большой массив информации о состоянии скоплений ТСМ. На этом фоне данные, полученные с помощью роботов, выглядели несравненно более скромными и, в то же время, требовали больших трудозатрат. Поэтому в дальнейшем к использованию ДУСА обращались только при решении отдельных специальных задач (см. ниже).

Позднее основная часть ДУСА была передана для эксплуатации персоналу ЧАЭС.



### *1.11. НОВЫЙ БЕЗОПАСНЫЙ КОНТАЙНМЕНТ. СОСТАВ НБК ([7] и др.).*

Уже в первом предложении о преобразовании «Укрытия» (С.Т. Беляев и А.А. Боровой [Ч32]) стратегия такого преобразования предусматривала не только создание герметичного и долговременного «Укрытия-2», но и использование этого объекта для безопасной разборки и кондиционирования радиоактивных материалов и ТСМ.

В дальнейшем, эта идея получила свое обоснование и развитие в рамках созданного международным коллективом ученых и инженеров уникального сооружения - НБК<sup>23</sup>. Главный его элемент - ограждающая металлическая оболочка, «Арка» для герметизации которой предусмотрены западная и восточная торцевые стены (см. рис. 57 - 59),



*Рис. 57. «Арка» установлена над «Укрытием». Оснащается технологический корпус и возводятся вспомогательные сооружения и здания.*

---

<sup>23</sup> Концептуальный проект НБК был разработан по заказу ЧАЭС консорциумом компаний Bechtel и Battelle (США), EDF (Франция) с привлечением украинского консорциума КСК, который был утвержден Кабинетом Министров Украины распоряжением №443-р от 5 июля 2004 года.

В консорциум входили:

- ОАО «Киевский научно - исследовательский и проектно- конструкторский институт «Энергопроект»;
- Государственный научно - исследовательский институт строительных конструкций;
- Межотраслевой научно-технический центр «Укрытие», Национальной академии наук Украины.

Управление проектом НБК осуществляли Государственное специализированное предприятие «Чернобыльская АЭС» совместно с американскими компаниями Bechtel International Systems и Battelle Memorial Institute.

Контракт на детальное проектирование и строительство НБК был подписан в 2007 году. Подрядчиком выступил французский консорциум Novarka, совместное предприятие в составе компаний Vinci Construction и Bouygues Travaux Publics (50/50). Субподрядчиками - компании Cimolai (Италия), PaR Systems (США) и Okyanus (Турция), а также около 50 украинских предприятий. Распорядитель финансирования - ЕБРР.

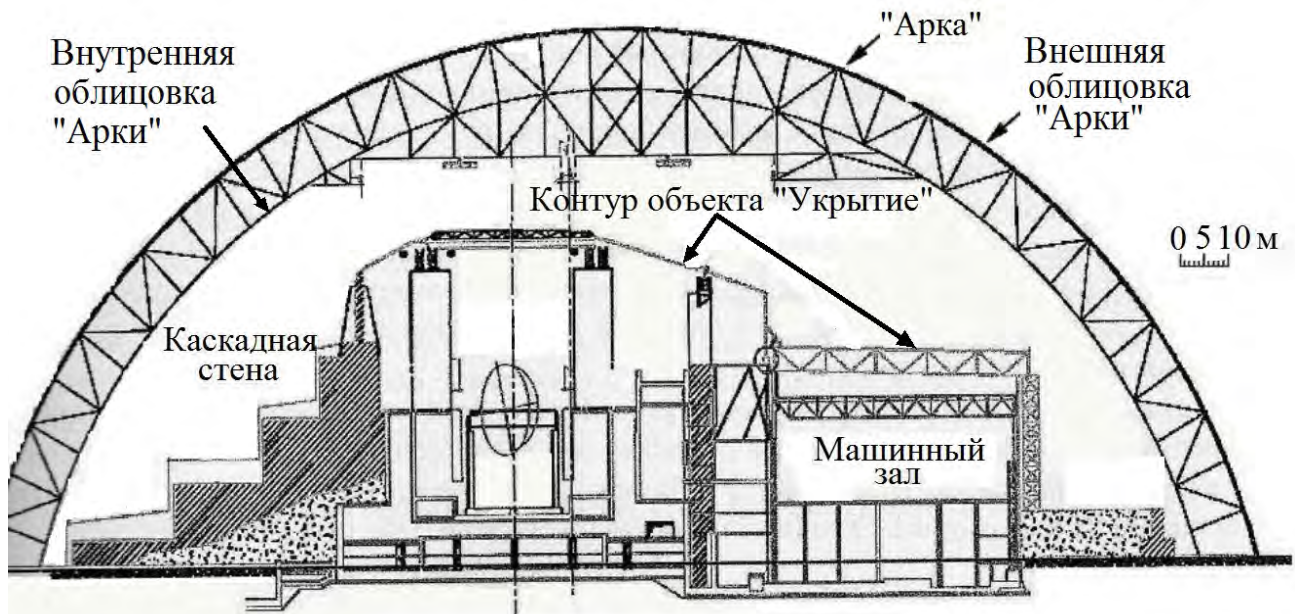


Рис. 58. Схема размещения «Укрытия» под «Аркай» (сечение север- юг) Металлический каркас и облицовка арки весят около 30 тыс. тонн. Монтаж основного оборудования увеличил этот вес до ~37 тыс. тонн.

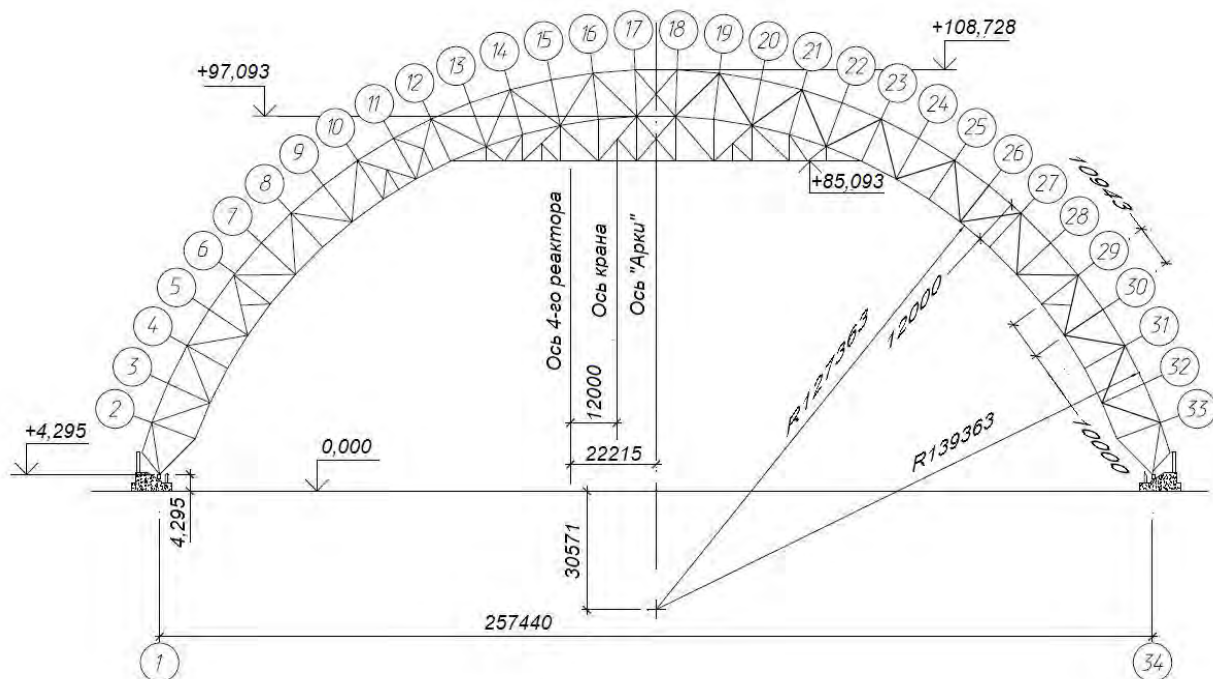


Рис.59. «Арка» - поперечный разрез [В7].

При этом западная торцевая стена опирается на собственный фундамент, а восточная - подвешивается к арочным конструкциям  
Геометрические размеры оболочки: пролет – 257 м, ширина - 150 м, высота - 108,4 м.

«Арка» накрывает объект «Укрытие», машзал и деаэрационную этажерку (за исключением небольших участков, которые выступают снаружи через западную стену) и здание блока «ВСПО» (см. рис. 57)



Кольцевое пространство между внутренней и внешней обшивками «Арки» вентилируется подогретым потоком внешнего воздуха. Это позволяет предотвратить образование конденсата на стальных конструкциях и на внутренней обшивке «Арки» и бороться с коррозией. Кроме того, за счет избыточного давления в кольцевом пространстве (по отношению, как к наружному, так и к давлению внутри «Арки»), реализуется принцип «воздушного замка». Он препятствует проникновению паров воды снаружи и радиоактивной пыли изнутри. На открытый грунт внутри НБК нанесено твердое изолирующее покрытие, которое предотвращает проникновение радиоактивных материалов в грунтовые воды. Это покрытие обеспечивает и безопасные условия для работ и перевозок внутри объекта.

Планируемый срок эксплуатации НБК (100 лет) потребовал выполнения целого ряда условий. Среди них следующие.

- Учет возможного воздействия на сооружение экстремальных нагрузок<sup>24</sup> (землетрясения, смерча и т.п.).
- Применение материалов с высокими антикоррозионными свойствами, способных работать в повышенных радиационных полях.
- Выполнение оптимального регламента эксплуатации.
- Возможность последовательной замены кровельных и стеновых панелей в период длительной эксплуатации без частичного раскрытия сооружения.

Конструкция «Арки» предусматривает размещение под ее защитой нескольких технологических участков (на рис. 60 представлено возможное расположение этих участков). В том числе **участок раскладки демонтированных конструкций**. В дальнейшем, при необходимости, эти конструкции должны передаваться на **участок фрагментации**. После того, как они пройдут соответствующий цикл обработки, при которой размеры фрагментов доводятся до соответствующей величины, они поступают на **участок дезактивации**.

Под «Аркой» планируется разместить и **участок временного хранения РАО**. Он предназначен для хранения РАО в контейнерах вплоть до отправки их к местам захоронения или в долговременное хранилище<sup>25</sup>.

Внутри арочного пространства сооружается новый коридор к объекту «Укрытие». Он необходим для доступа персонала к защитному боксу и в качестве аварийного выхода.

---

<sup>24</sup> Согласно расчетам НБК не разрушится от падения самолета, выдержит смерч класса 3 (вероятность события  $10^{-6}$  в год), землетрясение интенсивностью в 6 баллов по шкале MSK 64 ( $10^{-4}$  в год) и перепады температуры в диапазоне от  $-43$  до  $+45^{\circ}\text{C}$ .

<sup>25</sup> В качестве временного хранилища контейнеров с РАО в ТЭО НБК рассмотрена, в частности, возможность дополнительно использовать поверхность первого и второго ярусов каскадной стены.



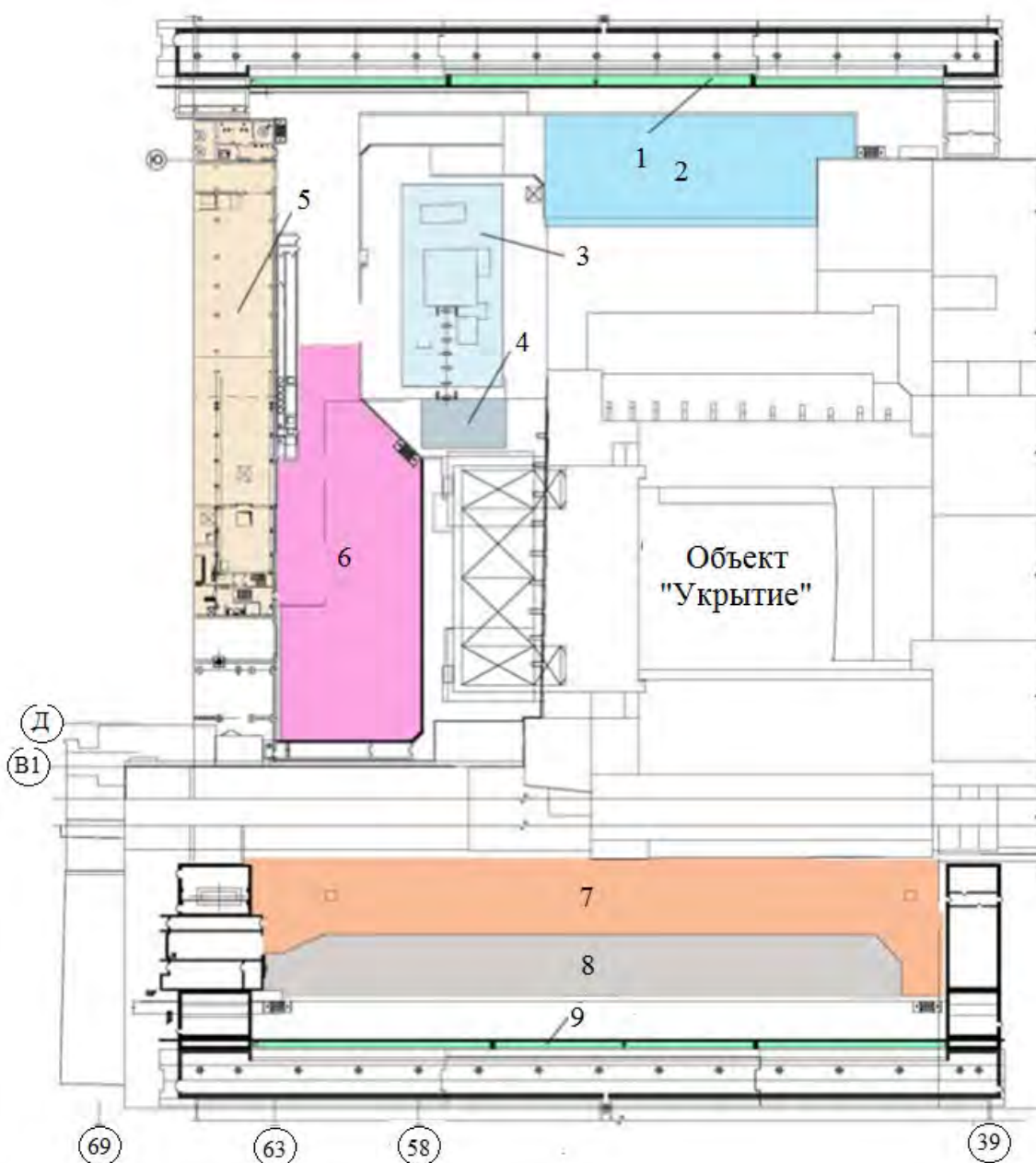


Рис. 60. Схема возможного расположения под «Аркой» площадок (участков) для проведения работ по фрагментации, дезактивации и других операций [В9].

Обозначения:

1. Северный бассейн для забора воды (противопожарный). 2. Площадка на каскадной стене. 3. Площадка действующей СПП (системы пылеподавления). 4. Площадка для новой мобильной СПП. 5. Часть технологического корпуса, находящаяся под «Аркой» 6. Площадка временного складирования. 7. Площадка для пожарных машин. 8. Площадка (участок) временного хранения упакованных РАО. 9. Южный бассейн для забора воды (противопожарный)

Кроме основного сооружения – «Арки» в состав НБК входят следующие основные объекты (см. рис. 61):

- технологическое здание (технологический корпус), который располагается с западной стороны и частично выходит за пределы «Арки»;  
вспомогательные сооружения и здания.

**Технологический корпус** состоит из двухэтажного здания и пристроек к нему с северной, южной и западной сторон.

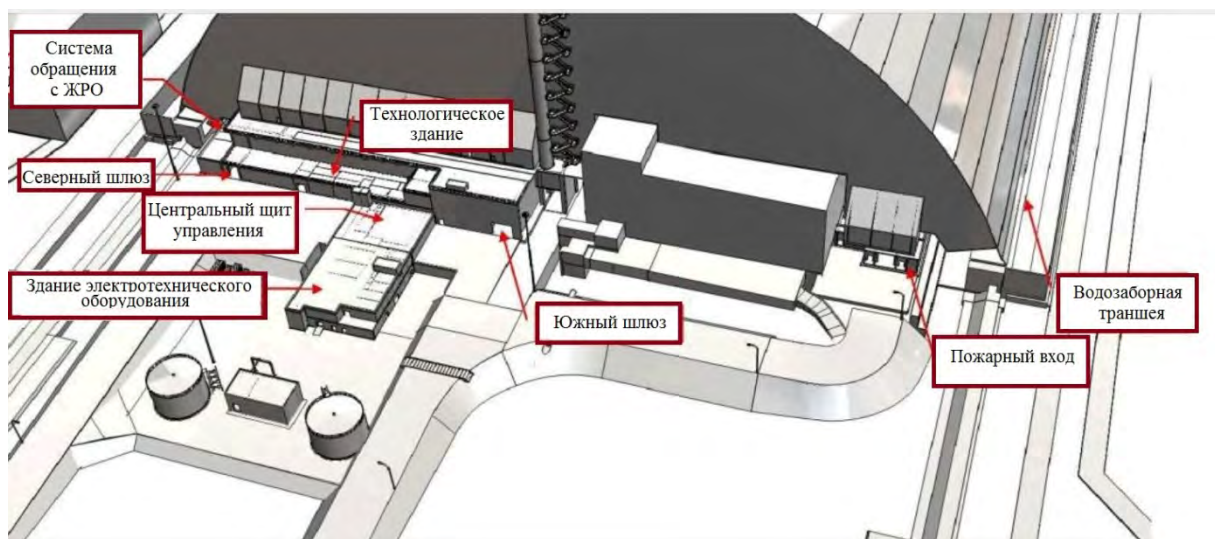


Рис. 61 Схема расположения сооружений НБК с западной стороны.

В корпусе располагаются участки дезактивации, вторичной фрагментации и упаковки, мастерская механического оборудования, цех технического обслуживания и ремонта оборудования, участок приготовления растворов для пылеподавления, офисные помещения и многие другие технологические помещения;

Корпус входит в общую схему обращения с РАО на ЧАЭС. Он оборудован двумя электрическими мостовыми кранами грузоподъемностью по 20 т и двумя тележками с электрическим приводом грузоподъемностью по 15 т.

**Северный шлюз** предназначен для перегрузки и вывоза автотранспортом контейнеров на объекты по обращению с РАО ЧАЭС, проведения радиационного контроля и дезактивации, доступа пожарной техники.

**Южный шлюз** может использоваться для поступления в НБК необходимого оборудования, транспортировки крупногабаритных фрагментов демонтированных конструкций, радиационного контроля и дезактивации автотранспорта, доступа пожарной техники.

В блоке **центрального щита управления** размещаются центральный щит контроля и управления (ЦЩКУ), щит управления системой основных кранов (ЩУ СОК), помещение устройств связи с объектом и другие вспомогательные помещения.

Одноэтажная пристройка для **системы обращения с ЖРО** расположена с северной стороны технологического корпуса. В пристройке для системы обращения с ЖРО размещаются помещения приема трапных вод, баков трапных вод и ЖРО, насосов трапных вод и ЖРО и ряд других.

В пространстве под «Аркой» у восточной стены технологического корпуса в двухэтажном здании расположен **блок фильтров НЕРА**<sup>26</sup> (на рис. не показан).

**Пожарный вход** (шлюз доступа пожарных подразделений - ШДПП) под «Арку» через МЗ располагается у западного торца Арки.

#### 1.12. СИСТЕМА ОСНОВНЫХ КРАНОВ.

Одной из главных систем НБК является система основных кранов (СОК). На ближайшем этапе разборки «Укрытия» она должна обеспечить **демонтаж нестабильных конструкций**.

Впоследствии она должна участвовать в **извлечении всех материалов, находящихся в «Укрытии», в том числе РАО и ТСМ**. СОК была изготовлена фирмой PaR Systems, США и установлена под «Аркой» в зоне монтажа (см. рис. 62 - 67). Она объединяет козловые краны, тележки, «гаражи» для ремонта оборудования и специальных операций (с 25-тонным краном), пульт дистанционного управления и система видеонаблюдения для кранов, работающих в радиоактивной зоне.

<sup>26</sup> Высокоэффективные фильтры, главная цель которых – удалять из воздуха мелкодисперсные частицы.

Предусмотрены также рабочие площадки для обслуживания тележек, ходовые мостики вдоль северной и южной сторон путей, лестница и лифт для подъема на площадку.

Основная механическая часть СОК состоит из следующих компонент:

- двух мостов по 96 метров, которые имеют подвесную конструкцию и передвигаются по 6 рельсовым путям направлении на отметке +82.000м. Длина каждого подкранового пути 150 м. Мосты кранов перемещаются в направлении «восток - запад».
- одной стандартной тележки (с аварийной лебедкой), грузоподъемностью в 50 тонн, которая движется над мостом в северо-южном направлении, собственный вес тележки составляет 60 тонн.

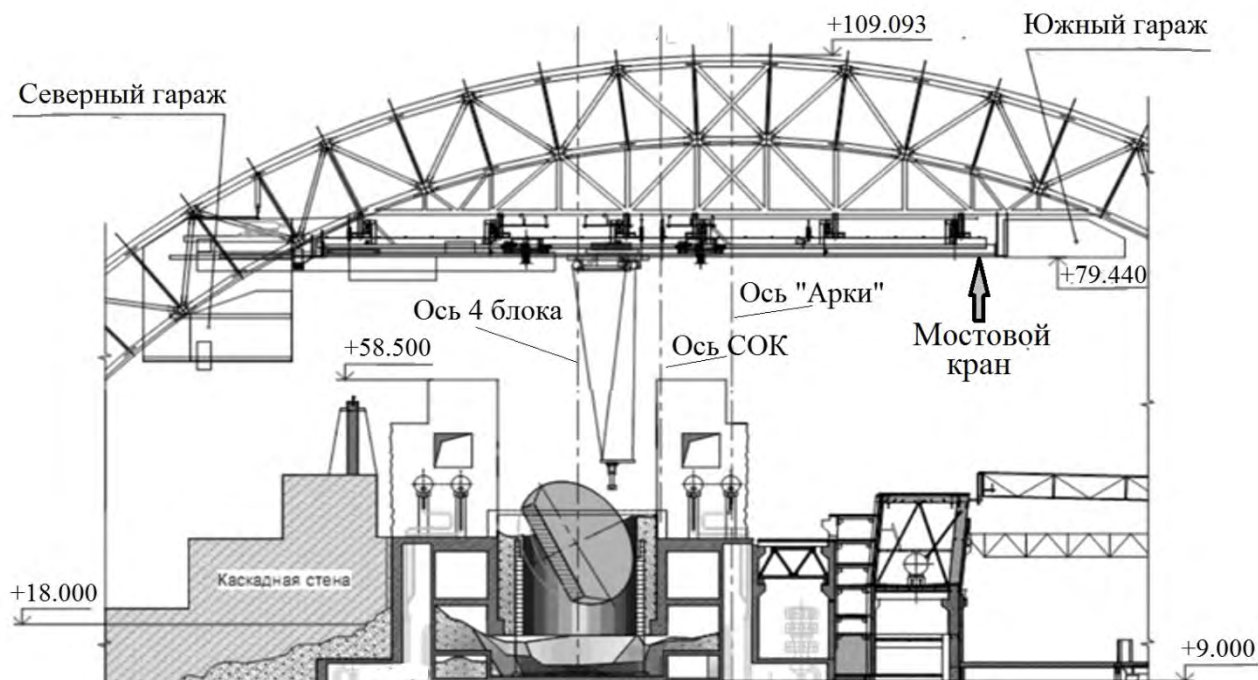


Рис. 62. Расположение СОК под «Аркой» и над объектом «Укрытие». Двутавровые балки крановых путей прикреплены снизу к нижнему поясу несущих ферм арочного типа.



Рис. 63. Схема расположения конструкций СОК под «Аркой» и над объектом «Укрытие» (конструкции кранового моста окрашены в желтый цвет).

- одной безопасной (защищенной) тележки (с аварийной лебедкой), грузоподъемностью в 50 тонн. Она движется над мостом в северо-южном направлении. собственный вес тележки составляет около 70 тонн. Две тележки могут работать в тандеме, чтобы выдерживать нагрузку до 100 тонн.





*Рис. 64. Сборка системы основных кранов под «Аркой» на монтажной площадке (конструкции СОК окрашены в желтый цвет).*

- одной тележки, оборудованной мобильной инструментальной платформой (МИП), вес МИП составляет около 110 тонн. На тележке монтируется мощная система для отсоса пыли, кабельная видеосистема, молот, рука-манипулятор, молотковый перфоратор, бур. Все это управляется дистанционно.

Предусмотрена возможность перемещения тележек с крана на кран, а также перемещение одного из кранов на соседний путь для подъема особенно тяжелых грузов одновременно тремя кранами. Для обслуживания тележек используются рабочие площадки, ходовые мостики вдоль северной и южной сторон путей, лестница и лифт (для подъема на площадку).

СОК обеспечивает доступ к верхним конструкциям «Укрытия» по всему пространству между северной контрфорсной стеной и балкой «Осьминог». Зона захвата созданной системы изображена на рис. 65. .

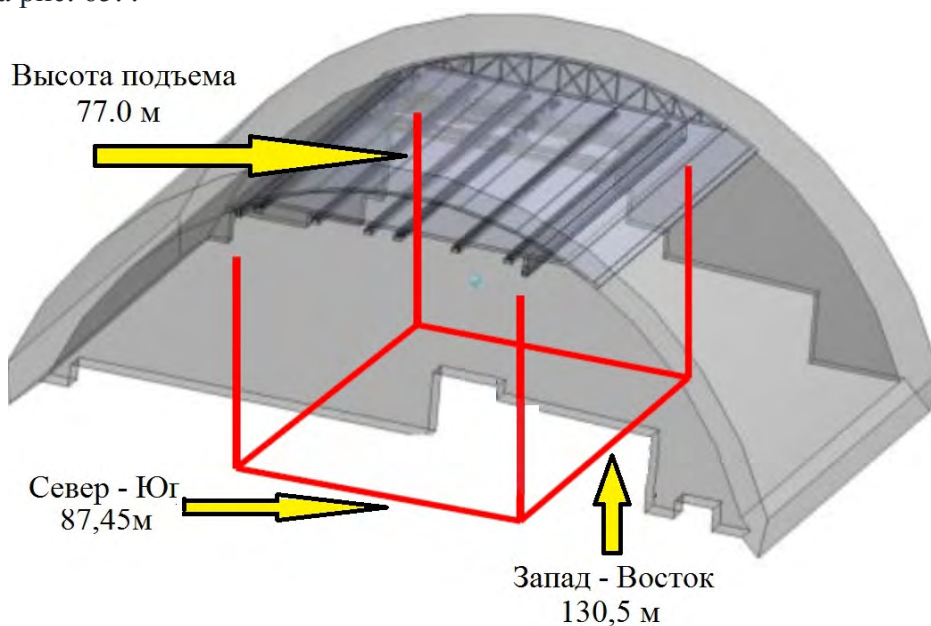


Рис.65. «Зона захвата» СОК.

Главные компоненты СОС приводятся на рис.66 и 67.

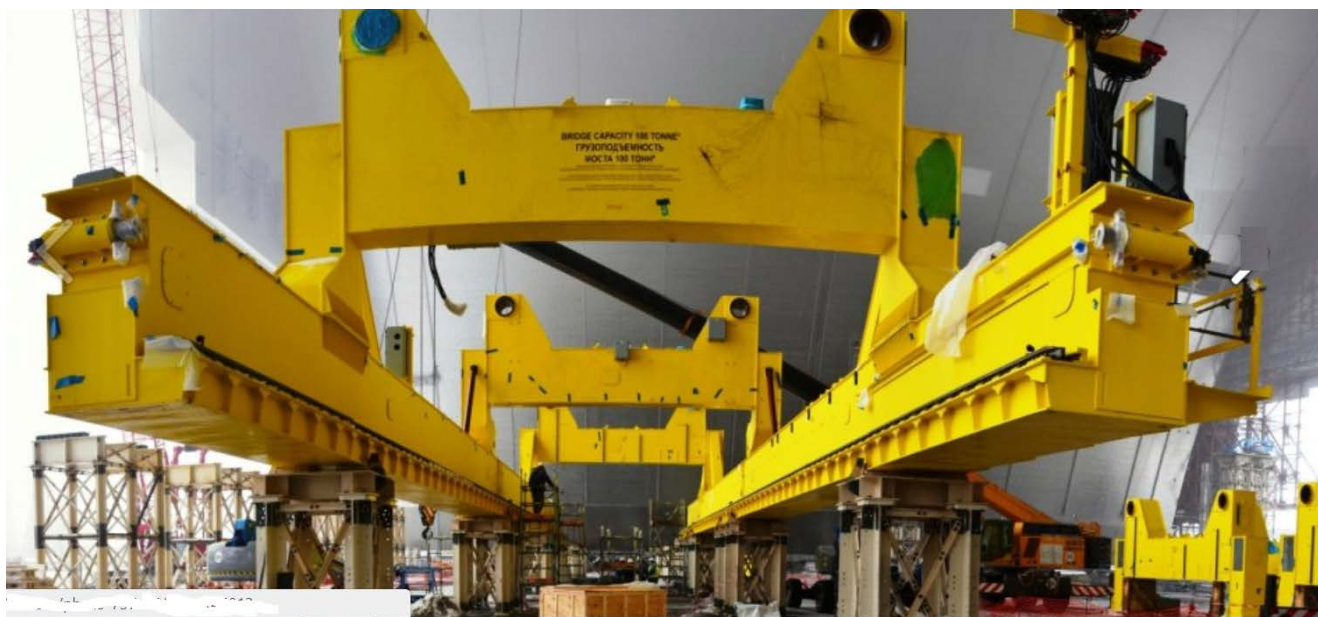


Рис. 66. Крановый мост. Его сборка и подготовка к подъему проводилась под «Аркой» на монтажной площадке.



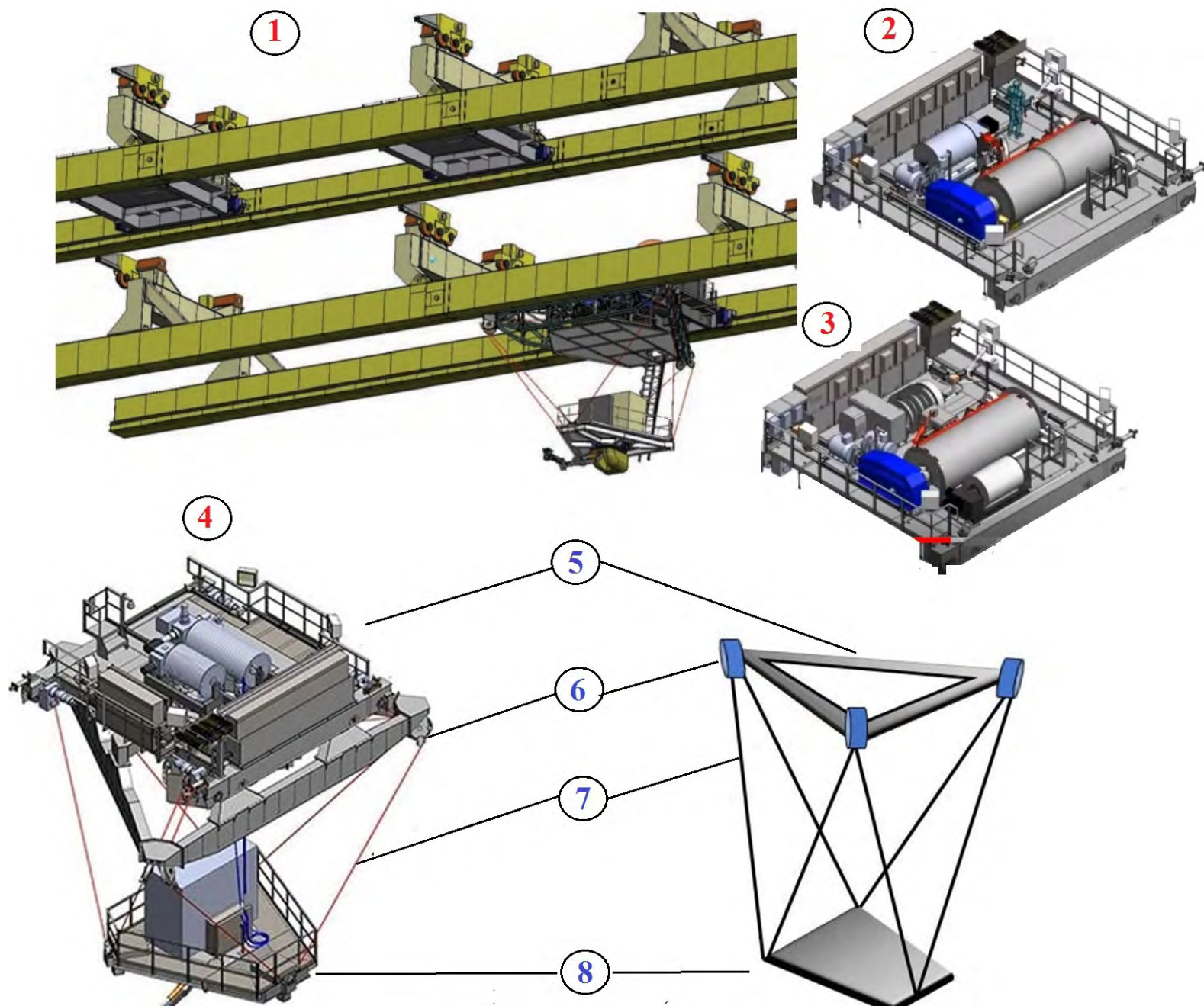


Рис. 67. Главные компоненты СОС.

- 1.** Мостовые краны и подкрановые балки.
- 2.** Обычная крановая тележка.
- 3.** Крановая тележка с дополнительной защитой для персонала.
- 4.** Крановая тележка, оснащенная мобильной платформой для multifunctional приспособлений
- 5.** Тележка
- 6.** Подъемное устройство
- 7.** Кабель
- 8.** Мобильная инструментальная платформа .  
(оснащена системой для отсоса пыли, видеосистемой, молотом, рукой-манипулятором, перфоратором, буром и т.д.)  
Все это управляется дистанционно.



### 1.13 ДЕМОНТАЖ НЕСТАБИЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ.

Если обратиться к графику планируемых работ (рис. 8, Введение), то из него видно, что следующий крупный этап преобразования «Укрытия» должен быть связан с демонтажем/усилением нестабильных конструкций<sup>27</sup>. Как уже говорилось, проблема возможного обрушения некоторых конструкций возникла сразу же после завершения строительства объекта. Строительные работы по дополнительному их укреплению проводились в 87 – 89гг. и позднее, в 90-х годах. Однако, они не решили до конца вопроса о гарантированно - безопасном состоянии объекта на время, которое было необходимо для сооружения НБК. Поэтому в 2004 - 2008 гг. на «Укрытии» был выполнен большой комплекс работ по стабилизации строительных конструкций (см., например, [В7]). Это позволило достигнуть приемлемого уровня безопасности объекта, который, по оценкам, экспертов, должен сохраниться вплоть до конца 2023г. Теперь, после ввода НБК в эксплуатацию, стало возможным приступить к окончательному решению вопроса о нестабильных конструкциях – их демонтажу/усилению.. Решено было проводить его в два этапа: **«ранний»** демонтаж/усиление (до конца 2023г.) и **«отложенный»** демонтаж.

При выполнении любых видов демонтажа необходимо выполнить следующие работы **Во-первых**, провести пылеподавление и дезактивацию перемещаемых конструкций, для фиксации радиоактивной пыли, снижения концентрации аэрозолей и повышения безопасности выполнения дальнейших операций.

**Во-вторых**, разрезать крупные конструкции, на отдельные фрагменты, и подготовить их к подъему. При этом следует максимально использовать дистанционные технологии, пылеподавление, эффективные средства коллективной и индивидуальной защиты и др.

**В-третьих**, необходимо обеспечить перемещение этих фрагментов в зону последующей обработки, проведение окончательной фрагментации и упаковки. После этого начинаются операции связанные их хранением и захоронением РАО.

Первоначальный список нестабильных строительных конструкций «Укрытия», подлежащих «раннему» демонтажу/усилению подвергся в последние годы частичному пересмотру и уточнению (см., например, [В9], [Ч33]). Часть из них перешла в список на «отложенный» демонтаж. Основные из оставшихся перечислены ниже.

1. Металлическая ферма, установленная при стабилизации \*.
2. Наклонные щиты \*, опирающиеся на покрытие машинного зала и южные щиты-клюшки.
3. Южные щиты-клюшки и .южные щиты
4. Легкая кровля над трубным накатом.
5. Объемный блок «Кошкин домик» \*.
6. Балка «Мамонт».
7. Балка «Осьминог».
8. Западная в восточная опоры балки «Мамонт».
9. Распределительная рама восточной опоры балки «Мамонт» \*.
10. Дополнительная опора балки «Мамонт» \*\*.
11. Завалы ДЭ на отметке 38,60. Основа балок «Мамонт» и «Осьминог».
12. Плиты перекрытия на отметке 38,60 вдоль осей 41-51 между рядами Б-В
13. Северные щиты-клюшки
14. Объемный блок «Мышкин домик» \*
15. Трубный накат в осях 43-50, ряды Ж-П

-----  
\* несмотря на удовлетворительное техническое состояние, поскольку препятствует демонтажу южных щитов и южных щитов-клюшек \*\* Для демонтажа балки «Мамонт» (вес 127т, длина 70м, высота 5.5м, ширина 1.5м) предусмотрена установка промежуточной опоры, которая после фрагментации балки демонтируется.

<sup>27</sup> 6 июл. 2017 г. - вкладчики Чернобыльского фонда утвердили финансирование проекта демонтажа нестабильных конструкций саркофага на ЧАЭС

С расположением большинства из них можно познакомиться рис. 68 – 70.

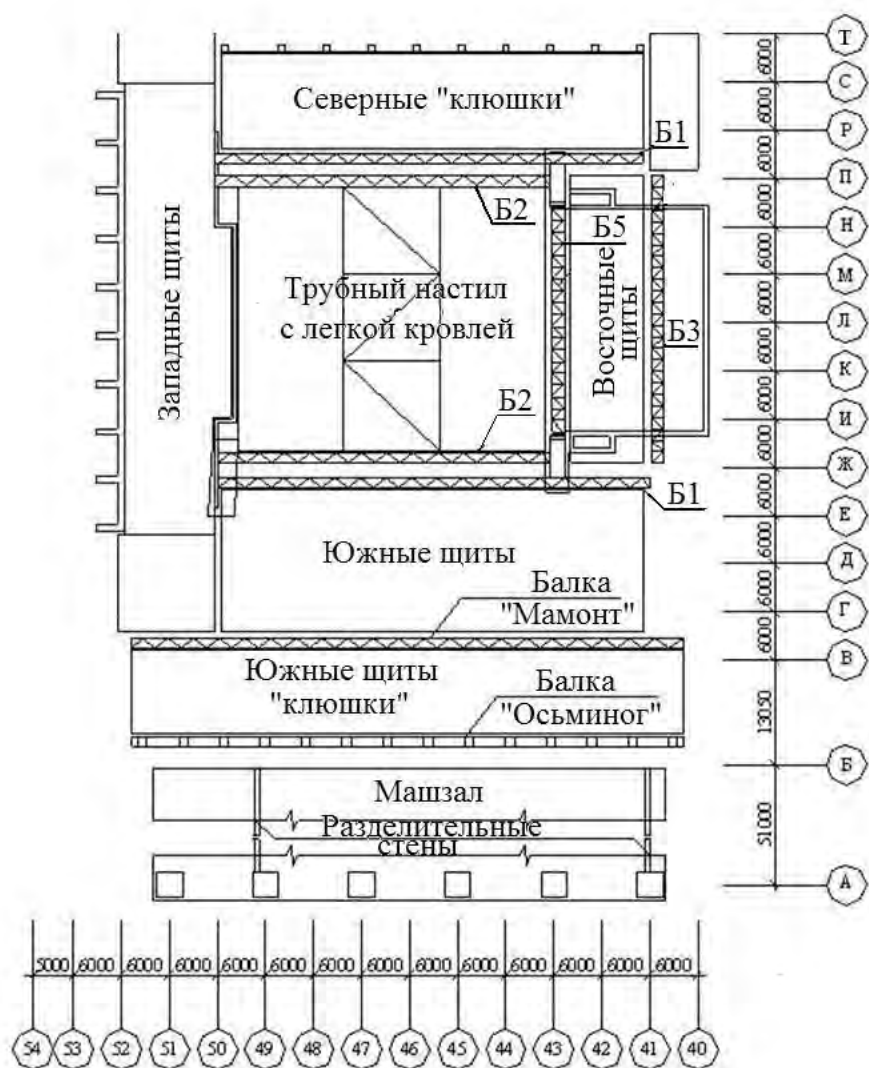


Рис.68. Схема расположения основных конструкций покрытия объекта «Укрытия».

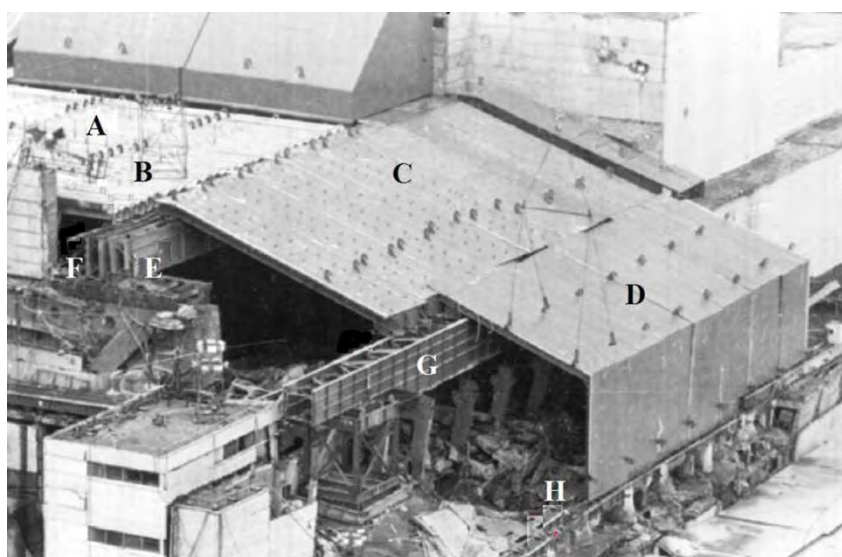


Рис. 69. 1986г. Строительство «Укрытия». Буквами указаны конструкции, которые предлагается демонтировать: легкая кровля центрального зала (А), трубный настил центрального зала под легкой кровлей (В), южные панели покрытия (С), южные щиты-клюшки (D); южная балка Б1 (Е); южная балка Б2 (F); балка «Мамонт» (G); балка «Осьминог» (H).



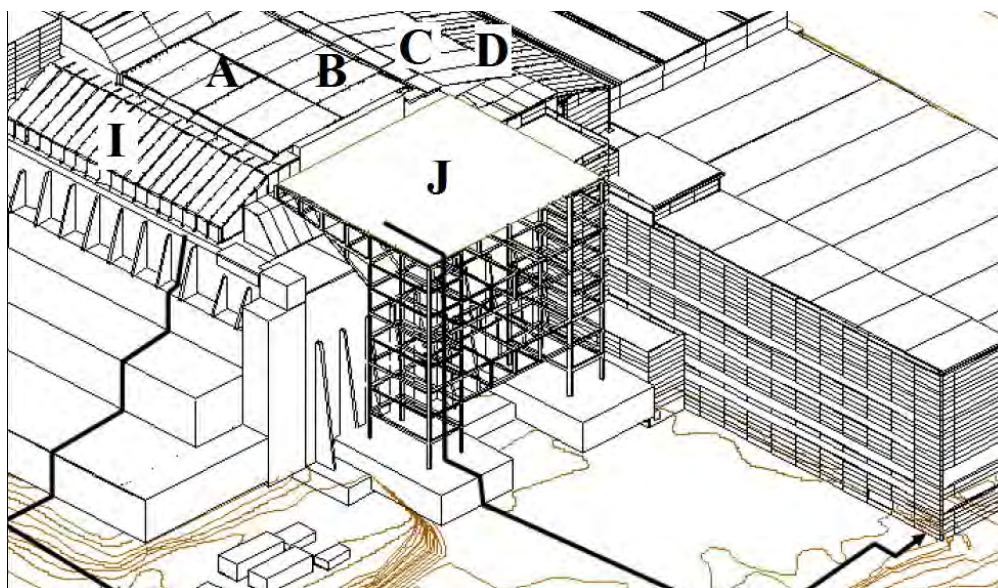


Рис. 70. 2004г. Внешний вид «Укрытия» с запада после выполнения работ по стабилизации. Буквами указаны конструкции, которые предлагается демонтировать: легкая кровля ЦЗ зала (А), трубный настил ЦЗ под легкой кровлей (В), южные панели покрытия (С), южные щиты-ключики (D); северные щиты-ключики (I); ферма, установленная при стабилизации.

Демонтаж будет выполняться в сложных радиационных условиях, как по проникающему излучению, так и по аэрозольной активности. В качестве примера таких условий можно привести значения радиационных полей, измеренных на кровлях «Укрытия» между осями 35 – 68 и рядами А – У<sub>1</sub> (рис. 71).

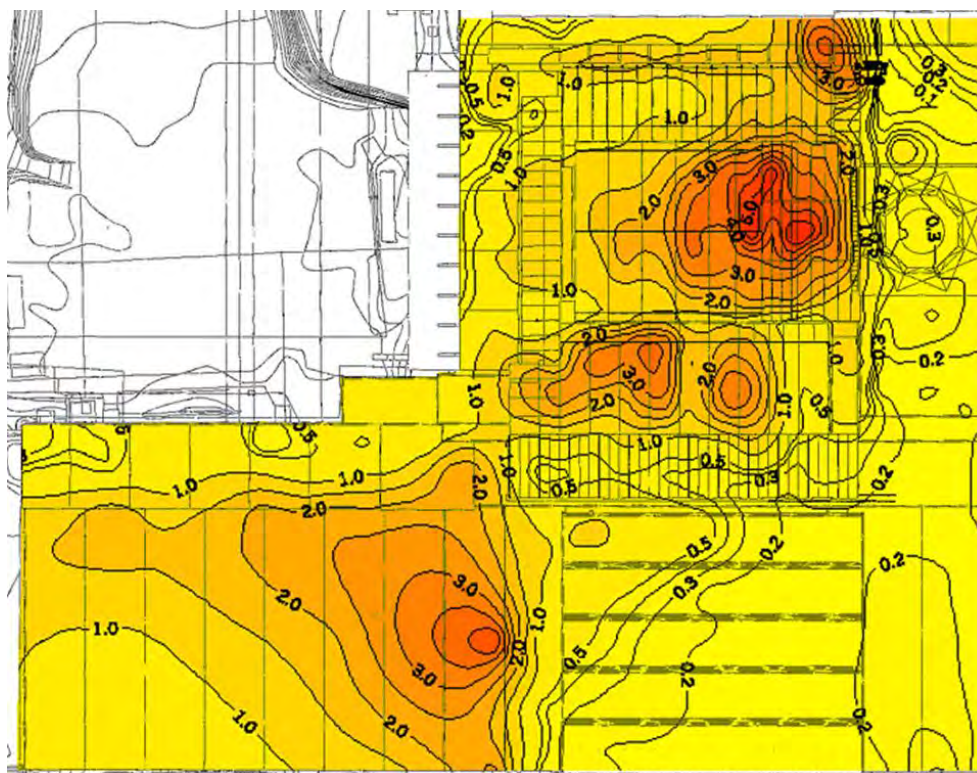


Рис. 71. Картограмма МЭД (в Р/ч) на кровлях «Укрытия»/ Оси 35 – 68 и ряды А – У<sub>1</sub> (ИПБ АЭС 2002г.).



Что касается поверхностных загрязнений конструкций внутри «Укрытия», то они могут достигать сотен тысяч  $\beta$  - частиц/(см<sup>2</sup> × мин) и тысяч  $\alpha$  - частиц/(см<sup>2</sup> × мин). Эти значения на много порядков превышают допустимые (см., например, рис. 72).

#### Загрязненность поверхностей:

$\alpha$  - излучателями до

200 част/см<sup>2</sup> \* мин

$\beta$  - излучателями до

35000 част/см<sup>2</sup> \* мин

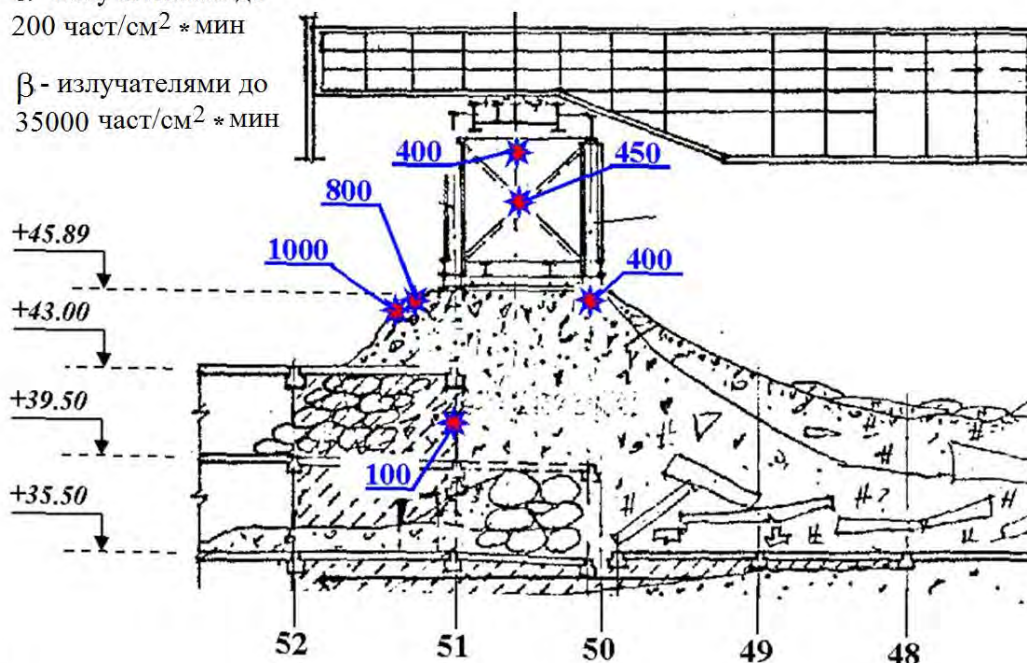


Рис. 72. Западная опора балки «Мамонт». Приведены значения МЭД в точках на поверхности (мР/час) и плотность поверхностного загрязнения (ИПБ АЭС 2002г.).

Предполагаемый цикл работ по «раннему» демонтажу должен включать работы по сбору сопутствующих РАО, их подготовки, транспортированию и передаче на объекты по обращению с РАО на ЧАЭС. А также технологическое обслуживание и ремонт используемых систем,

Рассмотрение возможной стратегии выполнения «раннего» демонтажа было сделано в работах [Ч34, Ч35]. В них проводится анализ «доз - затрат – выгод» для двух предлагаемых вариантов реализации этой работы.

Первый из этих вариантов был назван - **«интегрированный демонтаж/обращение»**.

Такой подход был выбран в технико-экономическом обосновании НБК [Ч36]

Он предполагает непрерывный во времени процесс. Его этапы показаны на рис. 73А

Второй вариант был предложен Международной консультативной группой (МКГ). Он получил название – **«демонтаж с отложенным обращением»**. Такой вариант предусматривает, что после выполнения демонтажа радиоактивные конструкции и материалы в течение 10 (или более лет) хранятся на специально оборудованных площадках внутри «Арки» и/или за ее пределами.

После завершения периода временного хранения РАО передаются на долговременное хранение или захоронение (рис. 73В).

Таким образом «демонтаж с отложенным обращением» предполагает как выполнение работ, присущих первому варианту, так и выполнение дополнительных этапов, связанных с обустройством площадок временного хранения и хранением РАО после демонтажа.

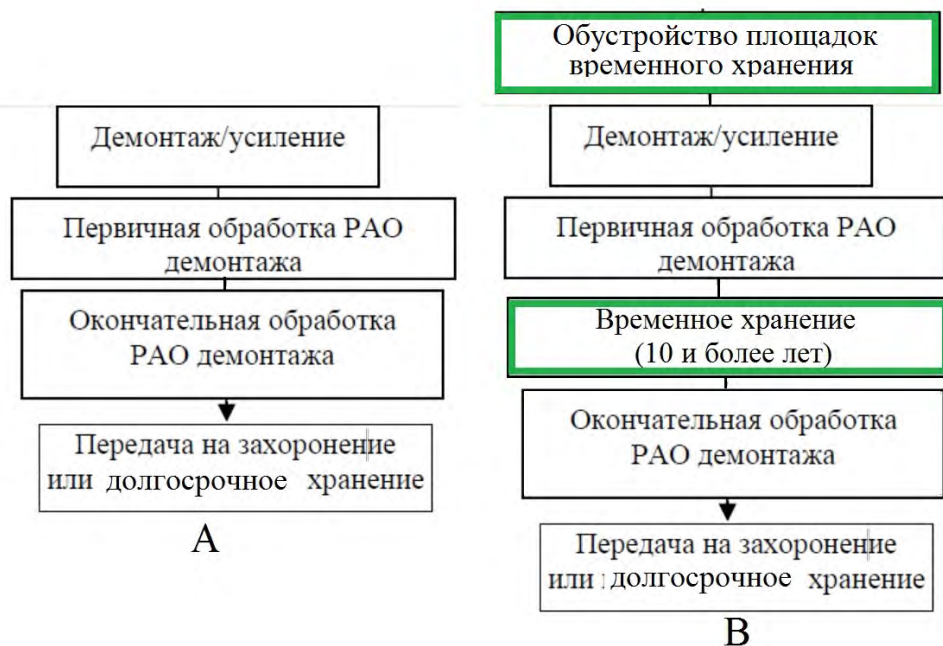


Рис. 73. Основные этапы «интегрированного демонтажа/обращения» и демонтаж с отложенным обращением.

Несмотря на отличие двух вариантов «раннего» демонтажа окончательные их результаты должны совпадать<sup>28</sup>.

Структура конструкций «Укрытия» определяет и последовательность работы по их извлечению. Отсутствие в объекте регулярной системы перекрытий делает неэффективным применение каких-либо горизонтальных технологий. Поэтому демонтаж будет производиться, начиная с верхних конструкций последовательно переходя к нижним, т.е. по схеме «сверху – вниз».

При этом выполнение самых различных операций требующих соблюдения высокой степени радиационной защиты, должно обеспечиваться созданной системой СОК при дистанционном управлении кранами и другими используемыми механизмами.

При демонтаже конструкций следует опираться на уже накопленный опыт работ на «Укрытии». Как тот, о котором рассказывалось в предыдущей главе, так и полученный при стабилизации строительных конструкций в 2004 -2008гг. и при возведении НБК.

При осуществлении демонтажа произойдет освоение и доработка подготовленных технологий. Вместе с тем, будет необходимо прогнозировать и преодолевать новые препятствия, которые могут возникнуть как при осуществлении защитных мероприятий, так и при использовании дистанционных механизмов.

**Работы по НБК, которые уже выполнены и те, что только разворачиваются, несомненно, являются одним из крупных завоеваний современной науки и техники.**

**Однако, еще большие трудности придется преодолеть специалистам на последнем этапе преобразования «Укрытия», при извлечении разрушенного ядерного топлива и переводом его в контролируемое состояние.**

<sup>28</sup> В работе [Ч35] делается следующий вывод: «... выполненный сравнительный анализ двух вариантов «раннего» демонтажа свидетельствует о том, что оба варианта в плане реализации практически равноценны. При принятии окончательного решения о выборе варианта «раннего» демонтажа необходимо точно оценить потенциальные риски, связанные с готовностью инфраструктуры по обращению с РАО, с учетом реальных перспектив и источников финансирования».

Следовательно, окончательный порядок выполнения работ будет определен в ходе рабочего проектирования.

#### 1.14. НЕКОТОРЫЕ ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ИЗВЛЕЧЕНИЮ (ДО НАЧАЛА РАБОТ ПО НБК).

Проблема извлечения ТСМ и РАО из разрушенного реактора начала обсуждаться почти сразу после аварии и время от времени поднималась в последующие годы.

Предложения по этому вопросу содержались и среди почти четырехсот проектов и заявок, представленных на Международный конкурс в 1992г.<sup>29</sup> Большинство из них особого интереса не вызвали, поскольку описываемые технологии либо включали методы, которые никак не могли быть применены в условиях «Укрытия», либо их описание носило слишком общий, неконкретный характер. Мы уже говорили об этом, описывая проект «Монолит».

В качестве примера можно привести и, на первый взгляд, интересную идею, использовать для выделения урана и плутония из ЛТСМ газотрихлоридную технологию (см., например, [Ч37, Ч38]<sup>30</sup>) Несмотря на то, что этот проект не вошел даже в тройку победителей<sup>31</sup>, вопрос об использовании такой технологии в дальнейшем периодически поднимался. Пока проведенный в 2007г. детальный анализ [Ч39] еще раз не подтвердил ее неэффективность.

Уже после Конкурса и до начала работ по НБК в печати появлялись все новые предложения по извлечению топлива из аварийного реактора.

Эти предложения можно, достаточно условно, разделить на две группы.

К первой относятся проекты, в которых обсуждались вопросы общей стратегии проведения работ.

Во второй группе предлагались отдельные технологии, которые могли бы быть востребованы при обращении с ТСМ и РАО, находящихся в «Укрытии»<sup>32</sup>.

В некоторых из работ первой группы разборку конструкций и отдельных скоплений материалов, извлечение ТСМ и РАО, предлагалось производить *«по горизонтали»* и даже *«снизу»*.

Так по мнению авторов [Ч41] под «Укрытием» необходимо было построить большой зал, в который с помощью дистанционных технологий (каких конкретно не указывалось) последовательно «сбрасывать» разрушаемые снизу конструкции и материалы. После этого предлагалось проводить дополнительно их дробление и сортировку и по специальным туннелям, с помощью транспортеров, перевозить к местам дальнейшей переработки. От выбора такой стратегии авторы ожидали значительные преимущества по стоимости и дозовым затратам. Никаких конкретных оценок и расчетов не приводилось.

Что касается «горизонтальной» разборки, то такой способ был не только предложен, но и запатентован [Ч42] (1996г.). Мы приведем, для примера, краткое изложение этого документа. Сначала, формула изобретения.

*«СПОСОБ РАЗБОРКИ ЗАВАЛА РАДИОАКТИВНЫХ МАСС, НАХОДЯЩИХСЯ В УКРЫТИИ, включающий создание временных транспортных площадок, разборку завала послойно горизонтальными проходками в нисходящем порядке, разрезку его твердых компонентов и загрузку в контейнеры в зоне разборки, погрузку и транспортирование радиоактивных масс с применением захватных устройств, отличающийся тем, что до начала*

---

<sup>29</sup> Разборка и окончательное захоронение радиоактивных материалов официально в задание на Тендер не входила.

<sup>30</sup> Технология основывается на том, что гексафториды урана и плутония обладают исключительными физическими и химическими свойствами – низкими температурами плавления (под давлением) и кипения, возгонки (сублимации) из твердого состояния, способностью образовывать фторокомплексы с фторидами щелочных и щелочноземельных элементов.

<sup>31</sup> Проект «Плутон», получивший на конкурсе поощрительную премию.

<sup>32</sup> Мы не касаемся здесь достаточно многочисленных публикаций и сообщений, в которых описывались общие принципы обращения с РАО и ТСМ объекта «Укрытие», повторяющие, по-сути, уже существующие документы регулирующих организаций (см., например, [Ч40]).



*разборки укрепляют положение тяжелых фрагментов завала, находящихся в неустойчивом равновесии, путем нагнетания под них сыпучего материала...»*

Предлагаемый способ достаточно подробно обсуждается в Патенте (см. ниже) и проиллюстрирован несколькими схемами (рис. 74 – 78), дающими общее представление о последовательности разборки «Укрытия». Для примера приведем и эту информацию

«Около «Укрытия» (1) вдоль каскадной стены (2) возводят эстакаду (3), высота которой соответствует отметке 41,15, что на толщину верхней горизонтальной проходки ниже высоты завала (4). На верхнем уровне эстакады (3) устанавливают временную транспортную площадку (5), которая подвижна в направлении завала (4), на которой устанавливают оборудование, и подводят ее под «Укрытие» (1).

Эстакаду (3) снабжают грузопассажирским лифтом (6) для обслуживающего персонала.

Стреловой кран (7) располагают так, чтобы в радиусе его действия находились подвижная временная транспортная площадка (5), цех дезактивации (8) и подъездные пути (9) для установки оборудования и материалов на площадку (5).

На уровне верхнего положения площадки (5) в стене (2) «Укрытия» (1) выполняют проем (10), в котором монтируют два бокса: специальный бокс (11) для шлюзования оборудования под укрытие и бокс (12) управления для размещения средств наблюдения за выполнением работ, управления оборудованием и персоналом.

Площадку (5) с помощью крана (7) продвигают под «Укрытие» до границ завала (4) и фиксируют в этом положении на эстакаде (3).

До начала разборки нагнетают сыпучий материал в полости под фрагментом (13) (многотонной плитой-схемой Е) для укрепления его неустойчивого положения. Перед горизонтальными проходками нечетных слоев уплотняют структуру завала (4) засыпкой сыпучего материала на глубину естественного проникания, фиксируя в массе завала крупные фрагменты (13), подлежащие разрезке.

Засыпку ведут с помощью подвижных в направлении завала (4) транспортеров (14) с поворотными лотками, установленных на площадке (5). На транспортеры (14) сыпучий материал подают в бункерах (15) с питателями. Для засыпки выбирают легкий и прочный материал с хорошей сыпучестью, с низкими адсорбирующими свойствами, сохраняющий эти свойства в условиях влаги.

Возможна комбинация нескольких материалов, например керамзита и песка.

При засыпке заполняют пустоты, уплотняя завал (4), фиксируют фрагменты завала, подлежащие разрезке, и при этом создают защитный от радиации слой.

Верхнюю нечетную горизонтальную проходку выполняют при прямом перемещении захватных устройств экскавационных машин со сменным инструментом для резки (16), для погрузки (17), для подачи бетона (18).

Работу выполняют повторяющимися циклами, включающими порционный вакуумный отсос сыпучих компонентов завала (4).

Разрезают крупные фрагменты завала (4) на куски, соответствующие размерам герметичных контейнеров (19), загружают контейнеры (19) непосредственно в зоне захвата выше уровня площадки (5), при этом дискретно по мере горизонтальной проходки формируют транспортную площадку (20), уплотняют ее засыпкой и укладывают твердым покрытием бетоном или готовыми бетонными плитами, тем самым на одном уровне с площадкой (5) образуют транспортную площадку (20) (твердое покрытие).

Транспортная площадка (20) является одновременно и защитной. Ширина площадки (20) должна обеспечивать доступность краевых участков разработанного слоя завала (4).

Экскавационные машины со сменным рабочим инструментом для резки (16), захвата и погрузки (17), а также контейнеры (19) заходят в зону работ поочередно.

Четную горизонтальную проходку второго слоя, расположенного ниже уровня транспортной площадки (20), ведут при отступлении экскавационных машин с инструментами (16), (17), (18) от завала (4) также повторяющимися циклами.

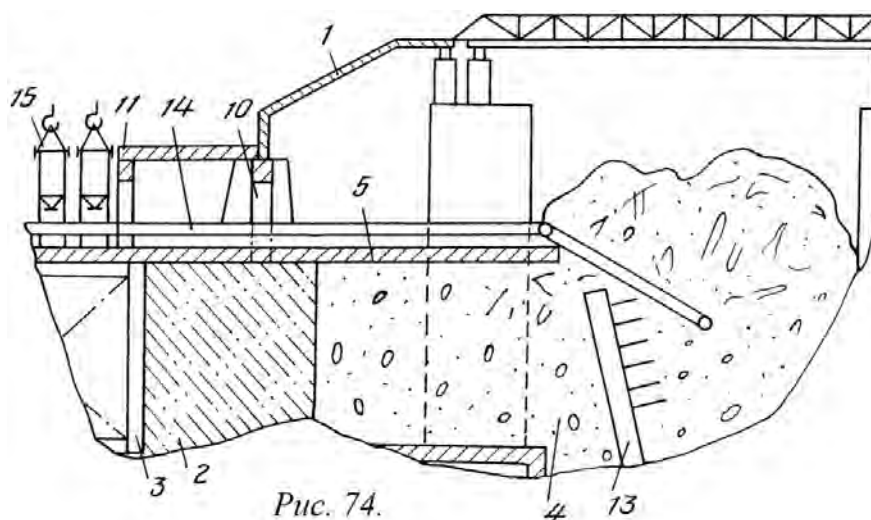
При этом дискретно по мере проходки слоя разрушают за собой твердое покрытие (20), так же порционно отсасывают засыпку приблизительно на глубину снимаемого слоя, разрезают крупные фрагменты завала (4), загружают контейнеры (19) нижним захватом.

Разрезку ведут механическим способом, например дисковыми фрезами.

Разрезку крупных фрагментов, которые находятся в напряженном состоянии в связи с неэластической их деформацией, выполняют бесконтактной, например лазерной, резкой во избежание заедания режущего инструмента в резе и его поломки от динамики частей разрезанного элемента. Контейнеры (19) с продуктами разборки завала (4) в пределах транспортной (20) и временной (5) площадок перемещают на экскавационных транспортных машинах, а далее в цех (8) дезактивации переносят краном (7). Все этапы работ сопровождают пылеподавлением и насыщением верхних слоев завала 4 поглотителем метабора́та калия.

По окончании двух горизонтальных проходок площадку (5) устанавливают на следующем уровне эстакады (3) с шагом, равным толщине двух горизонтальных проходок, увеличивают размер проема (10) в направлении сверху вниз, монтируют боксы (11) и (12) на новом уровне площадки (5), при этом верхнюю, нерабочую часть проема (10) герметизируют. Далее указанные циклы работ повторяют до полной разборки завала (4).

Проходку к нижнему слою завала (4) для эвакуации топливосодержащих масс выполняют проходкой ниже основания завала (4) со стороны машинного зала, упреждая по времени разборку надземной части завала (4), и эвакуируют топливосодержащие массы с помощью экскавационных машин с захватами».



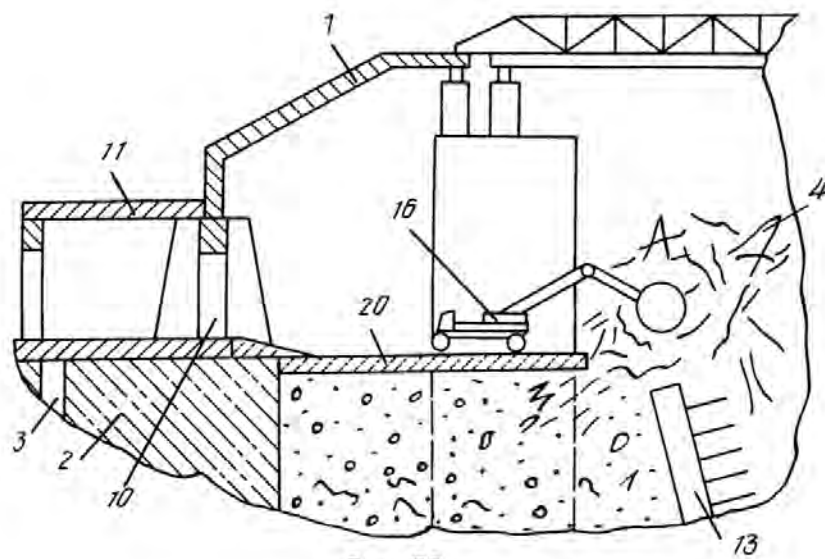


Рис. 75.

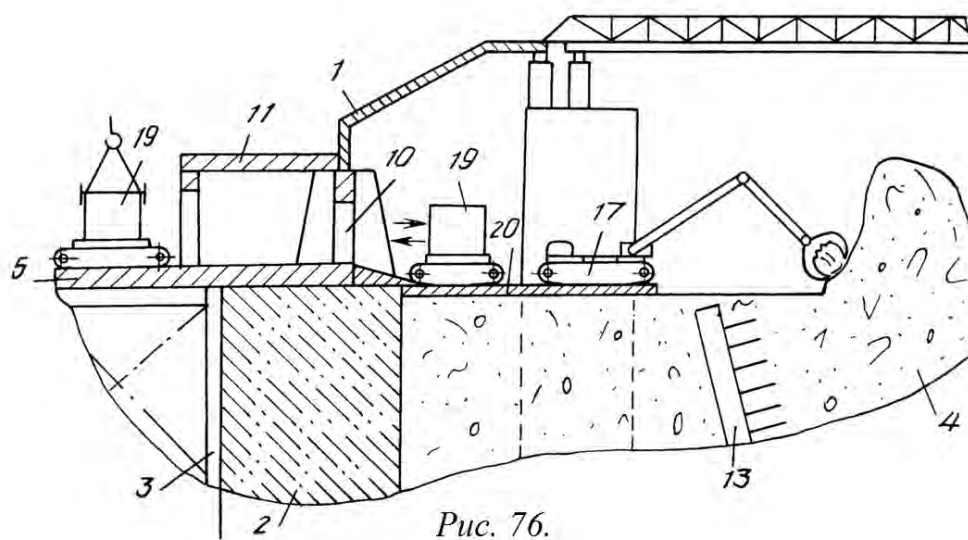


Рис. 76.



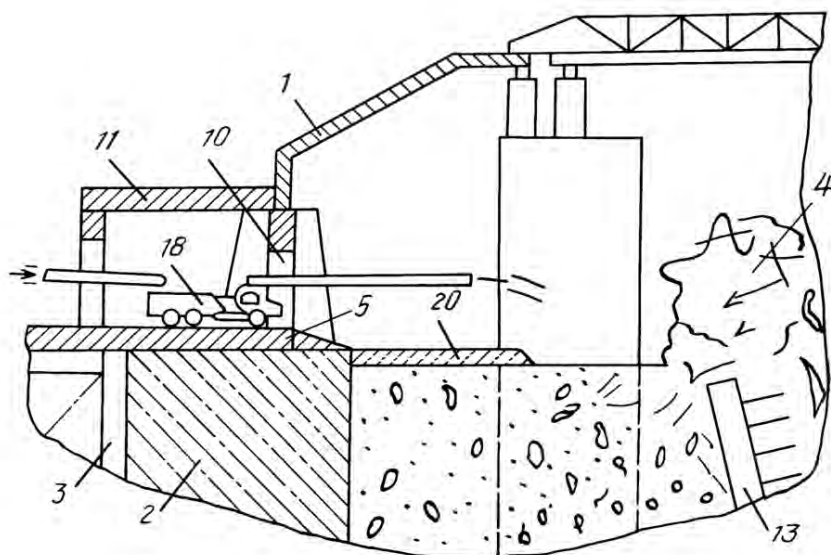


Рис. 77.

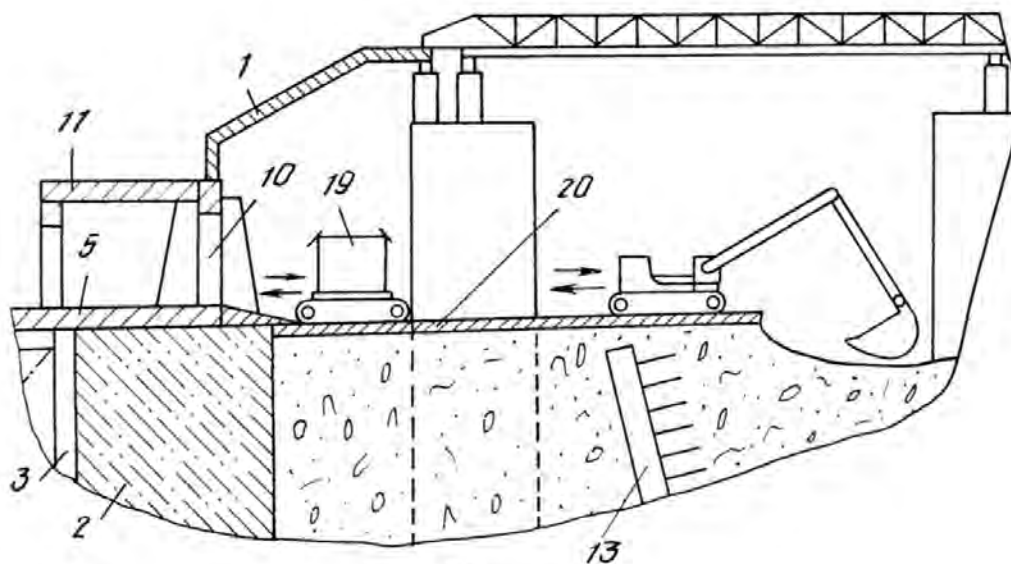


Рис. 78

Еще до окончательного оформления патента предложенный авторами способ подробно обсуждался коллективом Отделения ядерной и радиационной безопасности МНТЦ. «Укрытие». В ходе обсуждения были сформулированы два основных вывода.

**Во-первых, предложение представляло тот (к сожалению), редкий документ, в котором авторы не ограничились высказыванием общей идеи, а попытались предложить пути ее выполнения в конкретных условиях объекта «Укрытие». В будущем часть предложенных решений может быть использована.**

**Во-вторых, именно конкретность предложения иллюстрирует огромные трудности (по мнению сотрудников ОЯРБ практически не преодолимые) воплощения его на практике.**

Действительно, обратимся к опыту проведения внутри «Укрытия» работ, связанных с перемещением ТСМ (см. соответствующие разделы настоящей работы).

Наглядно их опасность демонстрировали, например, работы по бурению скважин и извлечению высокоактивных кернов. Несмотря на относительно небольшие объемы этих кернов (порядка одного литра) потребовались сложные меры по поддержанию безопасности при их извлечении и транспортировке. В том числе: постоянная очистка и дезактивация оборудования и помещений, эффективная вентиляция, специально разработанная пассивная защита от проникающего излучения и аэрозолей, высокоэффективные средства индивидуальной защиты.

Большую роль играли и такие барьеры безопасности, как цепочка независимых помещений, в которых происходила транспортировка и загрузка кернов в контейнеры. Эти помещения были специально герметизированы, снабжены независимой вентиляцией, их стены были закрыты материалом, пропитанным пылепоглощающими составами с локализирующим действием.



*Рис.79. Подготовка одного из помещений «Укрытия», в котором предполагалось проводить работу с ТСМ. Нанесение полимерного состава с локализирующим действием на поверхность стен.*

Несмотря на все меры предосторожности несколько раз из-за появления опасной концентрации радиоактивных аэрозолей («топливной пыли») приходилось эвакуировать то один, то другой из буровых участков. Последующие мероприятия по восстановлению его работоспособности, требовали использования дорогостоящего оборудования и материалов, работы десятка специалистов и занимали продолжительное время.

В заявке же предлагалось выполнить в десятки тысяч раз больший объем работы практически на «открытом воздухе». Поскольку само «Укрытие» не может рассматриваться, как полноценный барьер на пути распространения аэрозолей и, к тому же, производство работ делает необходимым его дополнительную разгерметизацию. Меры по пылеподавлению, как показывал опыт, не давали гарантии от недопустимого загрязнения окружающей среды.

***По сути, это предложение является еще одним обоснованием необходимости создания такого защитного сооружения, как НБК.***

#### ***1.15. «ЧАСТИЧНОЕ ОМОНОЛИЧИВАНИЕ»***

Из многочисленных работ второй группы, в которых рассматривались технологии обращения с ТСМ и РАО, находящимися в «Укрытии», можно выделить те, в которых предлагалось использовать «частичное омоноличивание».

Еще в 1987г. на одном из совещаний в ОГ «Курчатовского института» директор НИКИМТ Ю.Ф. Юрченко предложил для уменьшения образования пыли при хранении и перемещении легко разрушающихся и пористых высокоактивных материалов не только наносить на их поверхность покрытия, связывающие пыль, но и пропитывать весь объем твердеющими составами. И таким образом проводить омоноличивание и долговременную консервацию отдельных скоплений ТСМ.

В дальнейшем при помощи дистанционных технологий можно будет фрагментировать эти скопления, а затем извлекать и транспортировать отдельные фрагменты.

В качестве примера он привел несколько составов с низкой вязкостью, применяющихся для пропитки и упрочнения пористых бетонных конструкций и сыпучих материалов (например, жидкое стекло).

Идея вызвала большой интерес, было решено обсудить ее подробнее.

Однако целый ряд неотложных вопросов этому воспрепятствовал.

Впоследствии это предложение в различных вариантах повторялось и развивалось в ряде публикаций (например, [Ч43, Ч44] и др.).

Так в статье [Ч43] говорилось:

«Специалистами НИПИ Океанмаш предложена новая технология крупноблочной разборки завалов в «Укрытии», обеспечивающая высокую производительность и радиационную безопасность. Суть ее заключается в следующем:

- расчищаемый участок завала (или весь завал) омоноличивают, пропитывая его самотвердеющим составом на определенную глубину или полностью;
- разрезают омоноличенный участок завала на транспортабельные блоки с помощью абразивно-канатных пил, колонковых сверл большого диаметра или другим методом;
- транспортируют отпиленные блоки на сортировочную площадку и дальше на место переработки в стационарных условиях или на место хранения».

Метод омоноличивания скоплений ТСМ и высокорadioактивных отходов для их консервации, с последующей фрагментацией и извлечением выглядел перспективным.

Первые практические шаги на пути испытания в помещениях «Укрытия» радиационно-стойкого соединения для долговременной консервации ТСМ были сделаны в 2000г.

Работы по его созданию организовало Евразийское Физическое Общество.

Полученный материал покрытия – «ЭКОР» обладал целым рядом важных свойств [Ч45 - Ч47]:

- высокой радиационной стойкостью (при наборе интегральной дозы в  $10^9$  рад не было отмечено изменения его свойств [Ч45]),
- созданием хорошей защиты от проникновения радионуклидов в окружающую среду,
- долговечностью и устойчивостью к климатическому старению негорючестью,
- низкой теплопроводностью,
- водонепроницаемостью и гидрофобностью,
- экологической чистотой, легкостью утилизации и др.

Привлекательным является и способ приготовления ЭКОР, когда на последней стадии для начала его полимеризации необходимо просто смешать два компонента. Это позволяет получать окончательный продукт вблизи от места применения.

В конце 1999 года была утверждена программа работ по опытному демонстрационному применению ЭКОР в условиях объекта «Укрытие». В рамках этой программы был создан и испытан технологический комплекс синтеза материала с производительностью до 3 литров в минуту. Для выполнения непосредственного нанесения ЭКОР на скопления ТСМ был модернизирован дистанционно управляемый самоходный агрегат (см. выше). На его шасси установили шланг для заливки ЭКОР, телекамеру, источники света (рис 80).





Рис. 80. Модернизированный дистанционно управляемый самоходный агрегат для заливки ЭКОР в лаборатории.

Для проведения испытаний ЭКОР в условиях объекта было выбрано скопление застывшей лавы на первом этаже бассейна-барботера в пом. 012/7, так называемая «куча» (рис. 81).

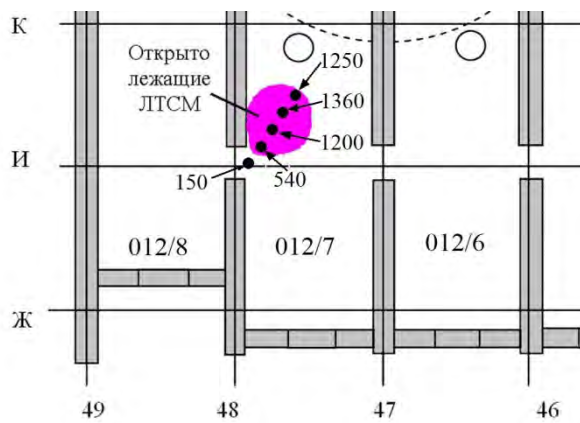


Рис. 81. Скопление ЛТСМ на первом этаже бассейна-барботера («куча») до нанесения покрытия. Справа на схеме расположение скопления в пом.012/7 и величины МЭД (Р/час) на ее поверхности, измеренные в 1989г.

25 марта 2000г. ЭКОР был приготовлен внутри объекта «Укрытие» неподалеку от пом. 012/7 и нанесен на прочную ткань. Затем тканью с ЭКОР было накрыто скопление ТСМ в ББ-1 (рис. 82). Через двое суток был проведен контроль состояния ЭКОР на скоплении ТСМ. Материал полностью затвердел и приобрел свойственную ему эластичную фактуру [Ч46].



Рис. 82. «Куча» ЛТСМ на первом этаже бассейна-барботера, пом. 012/7, покрытая ЭКОР.

В итоге можно отметить, что метод частичного омоноличивания может оказаться перспективным для извлечения скоплений хрупких ТАМ, находящихся в ряде помещений объекта.

#### 1.16. ДЕМОНСТРАЦИОННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ИЗВЛЕЧЕНИЮ ТСМ.

В начале 2000-х годов НАЭК «Энергоатом»<sup>33</sup> приняла ряд программных решений, связанных с проблемой извлечения ТСМ (см. [Ч48]). В том числе и решение П9.

В этом решении предлагалось провести демонстрационный эксперимент по извлечению ТСМ в реальных условиях объекта «Укрытие». Предложение было связано с отсутствием опыта проведения работ в подобных экстремальных условиях и необходимостью получить некоторые данные о пригодности применяемых технологий.

Кроме того результаты эксперимента позволили бы уменьшить неопределенность при оценках дозовых и финансовых затрат, планируемых для полной разборки «Укрытия».

Суть предложения, которое было разработано по инициативе Группы управления проектом SIP в 2001г. ([49]), состояла в следующем.

Демонстрацию предлагалось провести на первом этаже бассейна-барботера в центральной секции пом. 012/7, где располагается скопление - «куча» ЛТСМ (рис. 81, 82).

Специальный дистанционно управляемый самоходный агрегат должен был разрушать (фрагментировать) ЛТСМ и извлекать их в горизонтальном направлении (рис. 83).

Доступ к помещениям ББ планировалось организовать с юга, со стороны деаэрационной этажерки. При этом ряд соседних помещения «Укрытия» могло использоваться для организации транспортировки, кондиционирования ЛТСМ и РАО и временного их хранения (промежуточная зона). А также для размещения зон управления, ремонта, дезактивации, профилактики и т. п.

<sup>33</sup> Государственное предприятие Национальная атомная энергогенерирующая компания «Энергоатом» создано в октябре 1996 года. Компания является оператором четырех действующих атомных электростанций Украины,



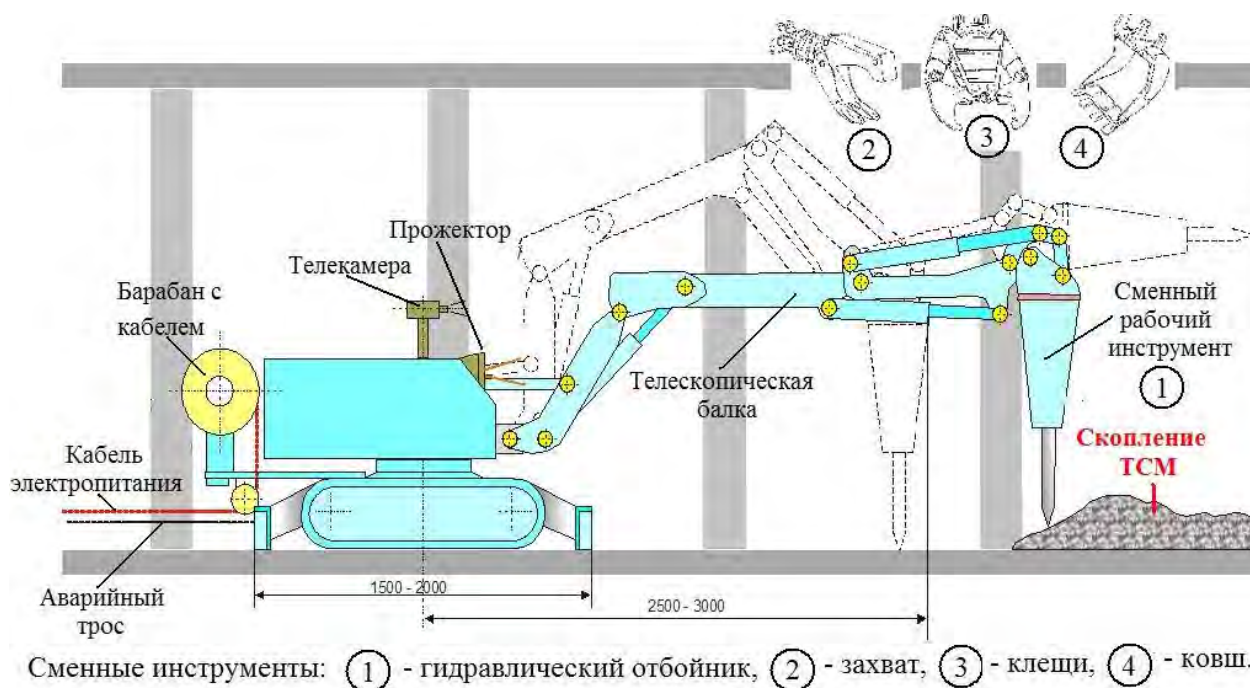


Рис. 83. Схема размещения дистанционно управляемого самоходного агрегата для фрагментации и извлечения ЛТСМ в пом. 012/7[49].

По замыслу авторов такой демонстрационный эксперимент должен был доказать техническую возможность извлечения ТСМ в условиях объекта «Укрытие» с помощью дистанционно управляемого оборудования и существующих промышленно отработанных технологий. Стоимость эксперимента оценивалась ~ 10 млн. евро, а коллективная доза, которую могли получить исполнители – менее 450 мЗв.

Работы планировалось начать в сентябре 2002 г. и завершить через ~ 16 месяцев.

2 октября 2001г. состоялось заседание Международной Консультативной Группы экспертов (при Европейском Банке Реконструкции и Развития), на котором обсуждался вопрос о необходимости и возможности проведения предложенного ГУП демонстрационного эксперимента.

Был представлен и отзыв «Курчатовского института» на это предложение.

Приведем его с небольшими сокращениями.

1. Идея очистки от ТСМ первого этажа бассейна-барботера активно обсуждалась с 1993г., когда разрабатывались предложения по стабилизации объекта «Укрытие». Предлагалось очистить первый этаж бассейна-барботера от ТСМ с помощью дистанционно-управляемых механизмов, герметизировать его и использовать для организованного сбора загрязненной воды, попадающей в реакторное отделение.

После того, как возведение НБК стало реальностью, проект потерял свою актуальность.

2. Остается собственно демонстрация технологий извлечения ТСМ.

Сформулируем требования к планируемому эксперименту.

Прежде всего, он должен быть представительным. Т.е. свойства извлекаемого скопления ТСМ и место его расположения должны быть характерными для большинства ТСМ в «Укрытии». Это позволит впоследствии распространить на них разработанные технологии и полученный опыт работы. Такое требование не выполняется. Предлагаемая простая технология разборки может быть еще использована лишь для скопления на 2-ом этаже бассейна-барботера. Для основной массы ТСМ (пом. 305/2, шахта реактора, ЦЗ и т.д.) там, где находятся совершенно другие по механическим, физико-химическим свойствам и доступности скопления ТСМ, демонстрация разборки в ББ-1 дает очень мало.



К тому же уже имеется опыт простого механического перемещения или удаление ТСМ на площадке (1986г.) после аварии, с помощью дистанционно-управляемых механизмов (бульдозеров и погрузчиков) или опыт разборки завалов в машинном зале (1988г.).

3. Начинать большие и дорогостоящие работы по выполнению демонстрационного извлечения ТСМ в то время, когда после долгих задержек, наконец, началась подготовка к проведению стабилизации строительных конструкций (первостепенной для безопасности «Укрытия» задаче) представлялось неразумным распылением сил и средств.

После продолжительной дискуссии Международная Консультативная Группа не согласовала выполнение демонстрационного эксперимента в представленном виде.

Было решено:

***«Отложить процесс формального принятия решения П9 на более поздний срок с целью более точного определения требований и дальнейшего развития технологии...» (Указания МКГ по П9, IAG-0J/06 от 05.11.2001).***

***При этом следует учитывать, что многие необходимые данные для разработки стратегии извлечения ТСМ могут быть получены в ходе реализации раннего демонтажа нестабильных конструкций объекта «Укрытие».***

#### ***1.17. ИЗВЛЕЧЕНИЕ ТСМ И РАО ПОСЛЕ ВВОДА В ЭКСПЛУАТАЦИЮ НБК***<sup>34</sup>

Хотя в начале работы над НБК стратегия извлечения ТСМ и РАО представлялась еще в очень общих чертах, проектировщики стремились уже тогда предусмотреть все возможности для выполнения этих работ и обеспечения их максимальной безопасности.

Это нашло свое отражение в резервировании под «Аркой» возможно большего свободного пространства для размещения будущих технологий (например, горячих камер), в стремлении предусмотреть наиболее эффективные системы кранов и транспортных средств, в создании и оснащении в технологическом здании соответствующих участков (дезактивации, обслуживания и ремонта сменных инструментов, санпропускников и т. п. ).

Все перечисленное (и многое другое) должно было использоваться для обеспечения работ на этапе извлечения ТСМ и РАО.

И тут встает один из важных, стратегических вопросов – как быстро следовало приступить к работам по полной разборке «Укрытия», надо ли торопиться с этим? Ведь расчетный срок функционирования НБК  $\geq 100$  лет. А оцениваемое сейчас (весьма приблизительно) время извлечения ТСМ и РАО из объекта  $\leq 50$  лет<sup>35</sup>.

Таким образом, эти работы могли бы начаться в районе 2040 - 2050гг. Через двадцать - тридцать лет.

По существующему (и достаточно распространенному) мнению их и не следует форсировать. Поскольку быстро развивающиеся и возникающие вновь технологии позволят через два – три десятилетия предложить другие, более производительные и (или) более безопасные пути разборки «Укрытия». Не надо торопиться и с созданием детальной концепции извлечения и захоронения ТСМ и РАО.

---

<sup>34</sup> Напомним, что окончательный выбор конструкции защитного сооружения был сделан не сразу.

Сначала рассматривались 12 вариантов, потом их осталось три. Проект «Рама» предполагал, что строительство НБК будет осуществляться на месте и перекроет часть объекта. Сооружение «Арка» собирается по сегментам на безопасном удалении от «Укрытия», а потом надвигается на него. Проект «Консоль», предложен украинскими специалистами. НБК после сборки в удаленном месте также должен был надвигаться на «Укрытие». В результате для разработки концептуального проекта был выбран вариант «Арка» [В7].

<sup>35</sup> При односменной работе и пятидневной рабочей неделе

Однако, против такого подхода есть серьезные возражения.

**Одно из них** связано с тем, что (как мы видим из материала предыдущего раздела) за прошедшие тридцать лет никаких прорывных предложений в этой области сделано не было. Появление новых технологий и усовершенствование имеющихся следует скорее ожидать в процессе развертывания масштабных работ в НБК.

Поэтому представляется разумным после демонтажа нестабильных конструкций сразу приступить к испытаниям в натурных условиях наиболее приемлемых из существующих методов и средств разборки радиоактивных завалов. Одновременно, решить вопросы временного хранения или захоронения ТСМ и РАО.

И после этого приступить к массовому извлечению радиоактивных материалов.

**Второе возражение** связано с долговременной динамикой поведения ТСМ, которая может при затягивании на десятилетия времени ожидания разборки дополнительно (и существенно) эту разборку затруднить (см., например, [B7], [B8], [Ч50] и др.).

Действительно, после создания НБК при постепенном уменьшении влажности внутри объекта «Укрытие», радиоактивная пыль, удерживаемая силами адгезии на стенах, потолках, полах помещений, значительно увеличит свою подвижность. При возмущениях она будет подниматься в воздух в виде аэрозолей.

Произойдет и пересыхание многих из скоплений воды. Донные отложения могут дать свой вклад в образование радиоактивных аэрозолей.

Источником пыли станут и разрушающиеся ЛТСМ. При этом существуют пессимистические прогнозы нарастания скорости такого разрушения.

Есть и другие процессы, которые приведут к возрастанию концентрации радиоактивных аэрозолей в воздухе «Укрытия». Речь идет о деградации (под действием излучения) пылеподавляющих покрытий (пленок), многие десятки тонн которых были нанесены на поверхности внутренних помещений «Укрытия» во время проведения в них работ и адсорбировали заметную часть активности. Особенно большие объемы пылеподавляющих покрытий наносились в (1986 – 1990) гг. [B7, B8]

С годами влияние всех этих источников радиоактивных аэрозолей может стать одной из главных трудностей при проведении работ по извлечению ТСМ и РАО из объекта «Укрытия».

**Третье возражение.** Продолжительное время (на десятки лет) задержка работ по извлечению ТСМ и РАО приведет к большим финансовым потерям. Расходы на регламентную, **обычную** эксплуатацию НБК, при бесперебойном обеспечении работы его многочисленных систем и оборудования по оценкам может составлять несколько миллионов долларов в год<sup>36</sup>.

Наконец, следует учитывать и то, что огромный объем работ, выполненный работниками ЧАЭС, проектных и научных организаций в период предварительных исследований,

---

<sup>36</sup> Оценки эти заметно разнятся.

Министр экологии и природных ресурсов Остап Семерак в 2016г. сообщил, что эксплуатация НБК будет стоить Украине чуть ли не **сотни миллионов гривен в год**.

По запросу УНИАН Чернобыльская АЭС предоставила следующие данные годовых затрат на эксплуатацию НБК (в ценах 2017г.).

Затраты на электроэнергию – 15,5 млн грн.

Затраты на тепловую электроэнергию - 31,08 млн грн

Затраты на внешнюю инфраструктуру - 135,4 тыс. грн.

Годовые затраты на содержание 120 рабочих мест персонала конфаймента - 15,6 млн грн.

Предварительная общая сумма эксплуатационных затрат составляет более **62 млн. гривен в год**.

мероприятий по стабилизации «Укрытия», наконец, при создании НБК позволил отобрать и сплотить уникальный коллектив специалистов, потенциал которого может (и должен!) быть использован именно в ближайшие десятилетия.

На основании сказанного выше, после того, как Правительственная комиссия Украины утвердила «Стратегию преобразования объекта «Укрытие» и «Стратегию стабилизации состояния объекта «Укрытие».

**Межотраслевой научно-технический центр «Укрытие», Чернобыль,  
НИИ строительных конструкций (НИИСК), Киев,  
Институт “Энергопроект” (КИЭП), Киев,**

приступили к разработке «Концептуального проекта извлечения топливосодержащих материалов (ТСМ) и обращения с радиоактивными отходами (РАО) объекта «Укрытие». Проект получил название **«СТАРТ» [Ч51].**

Более детальная разработка идей этого Проекта была сделана в целом ряде последующих работ (см., например, [Ч52 - Ч54] и др.).

Мы рассмотрим некоторые их разделы, непосредственно касающиеся извлечения ТСМ, долгоживущих и сопутствующих РАО.

В Проекте, в качестве основного направления извлечения материалов, предложен вертикальный путь, захватывающий сначала шахту реактора и центральный зал. При этом фронт разборки постепенно расширяется и опускается «сверху - вниз», вплоть до нижних отметок «Укрытия».

Не исключается и то, что в ряде случаев будет применено горизонтальное извлечение.

Все операции с радиоактивными материалами осуществляются с помощью дистанционно управляемых агрегатов (ДУА), при постоянном видеонаблюдении и радиационном контроле. Особо отмечается, что при планировании работы используется предварительное моделирование и компьютерная графика.

Предполагается, что определяющую роль должен сыграть опыт, накопленный в ходе демонтажа нестабильных конструкций. В том числе связанный с разрезанием и перемещением крупногабаритных и тяжеловесных конструкций, разборкой завалов с помощью системы основных кранов (СОК) НБК и мобильной инструментальной платформой (МИП) и т. п. Учитывается то, что извлечение ТСМ и РАО будет происходить продолжительное время. В течение этого времени могут существенно измениться радиационные характеристики помещений НБК (например, произойти их загрязнение радиоактивной пылью) и будет необходимо принимать дополнительные меры по защите персонала.

В «Укрытии» сосредоточены сотни видов различных материалов. Здесь и строительные конструкции блока, частично разрушенные взрывами и пожаром. И собственно материалы реактора, в том числе, отработавшее ядерное топливо, подвергшееся воздействию высоких температур. Сброшенные на верхние отметки, в развал реактора, тысячи тонн песка, борной кислоты, свинца и пылеподавляющих составов.

При строительстве «Укрытия» большие массы (тоже тысячи тонн) бетона залили ряд помещений, в том числе и сильно загрязненные радиоактивностью..

Безопасное извлечение и кондиционирование множества различных типов материалов требует применения и множества различных технологий. Разработчики Проекта для организации и унификации работ разбили (пока достаточно условно) весь объект на 7 зон, для которых могли бы быть применимы близкие технологии (см., например, [В9]).

К этим зонам относятся (см. рис. 84, 85):

**1** - верхние отметки объекта «Укрытие» (центральный зал, бассейны выдержки (другие помещения выше отметки +24.000); количество ТСМ на этих отметках оценивается , как  $\geq 35$ т по урану;



- 2 - промежуточные отметки объекта «Укрытие» (подапаратное помещение, другие помещения на отметках от +9.000 до +24.000); количество ТСМ в зоне 2 оценивается, как  $(90 \pm 35)$  т по урану,
- 3 - нижние отметки объекта «Укрытие» (парораспределительный коридор, два этажа бассейна-барботера, другие помещения ниже отметки +9.000); количество ТСМ в зоне 3 оценивается, как  $(22 \pm 8)$  т по урану;
- 4 - локальная зона объекта «Укрытие»<sup>37</sup>;
- 5 - пространство за пионерными стенами; в этой зоне замурованы около 1700 контейнеров, (объемом 1 м<sup>3</sup>) с ВАО;
- 6 - завалы под каскадной стеной; по оценкам количество ТСМ в завале составляет от 0,7 до 1,2 т по урану;
- 7 - часть машинного зала, относящаяся к объекту «Укрытие».

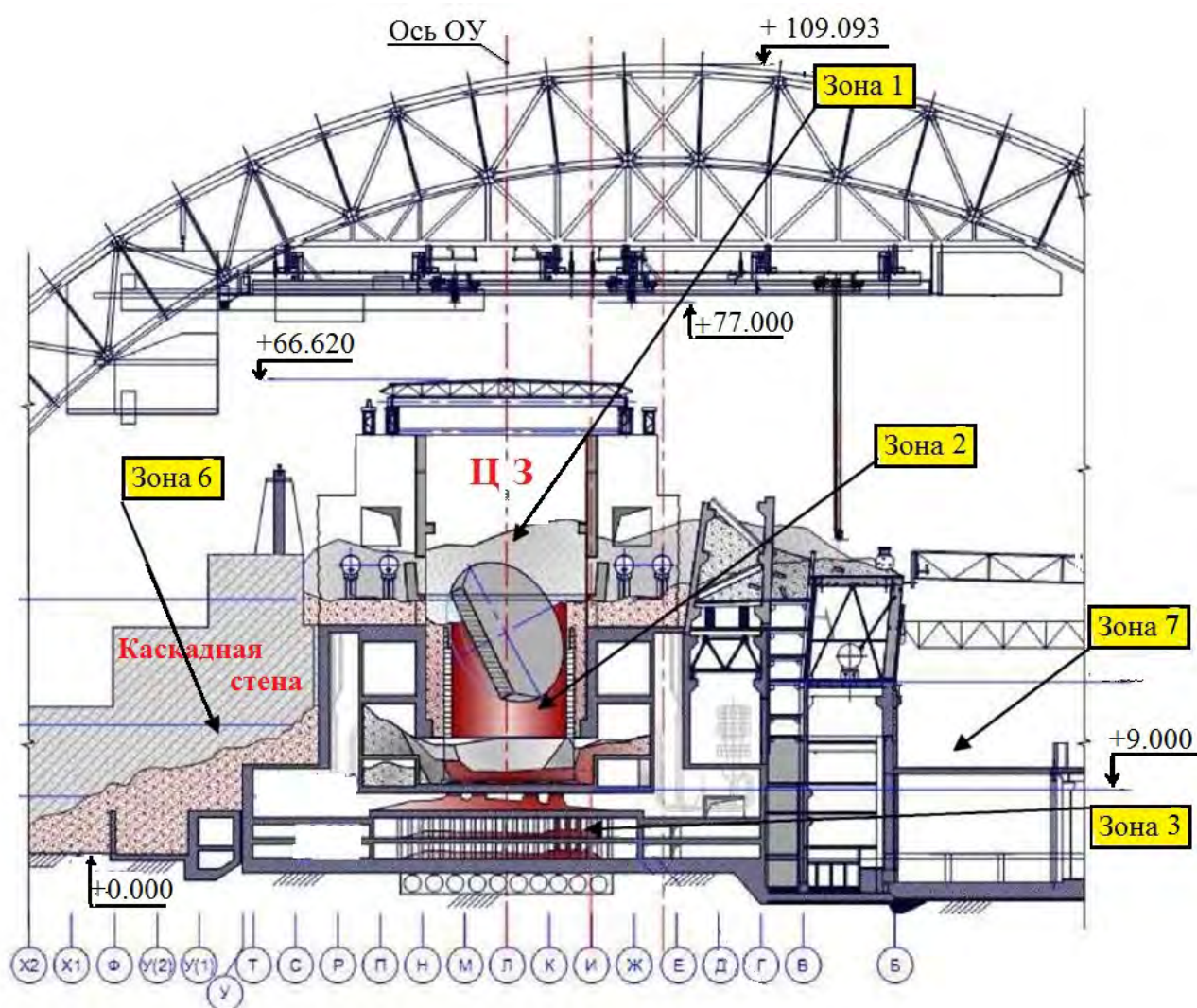
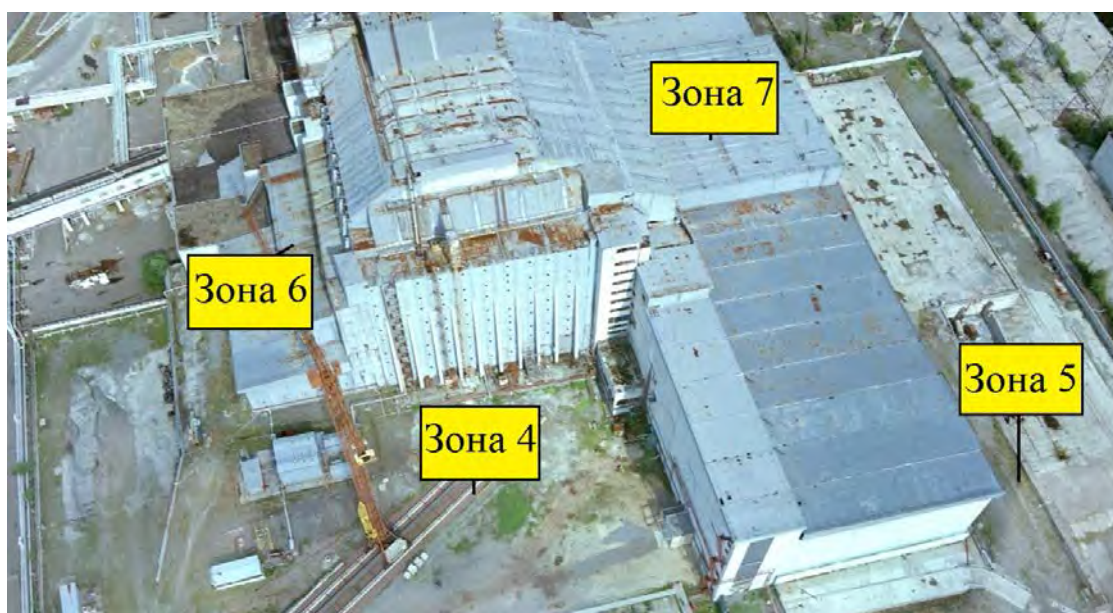


Рис. 84. Технологические зоны (1 – 3, 6 и 7) извлечения ТСМ и РАО([B9])..

<sup>37</sup> Извлечение ТСМ и РАО из зон 4 - 6 затрудняется тем, что они находятся вне зоны действия кранов НБК.



*Рис. 85. Технологические зоны (4 – 7) извлечения ТСМ и РАО.*

Абсолютное большинство ТСМ сосредоточено в трех первых зонах и именно их извлечение видится главной и наиболее трудной задачей всей работы. Определяющую роль здесь должно сыграть оборудование НБК и, прежде всего, система основных кранов и мобильная инструментальная платформа. Кроме того будут использованы и другие типы оборудования созданные специально для работ с ТСМ. Извлечение ТСМ и РАО из остальных зон (4 – 6) может производиться позже. Что касается освобождения МЗ, то здесь извлечение может проводиться независимо от работ в НБК.

#### *1.18. РАЗРАБАТЫВАЕМЫЕ СХЕМЫ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ТСМ И РАО. ВКРХНИЕ ОТМЕТКИ.*

***Для иллюстрации объема и сложности предстоящих работ мы воспользуемся схемой извлечения ТСМ и РАО с верхних отметок реакторного отделения, предложенной в статье [Ч54].***

На рис. 86 представлено фото разрушений образовавшихся в результате аварии в помещениях, которые раньше располагались на этих отметках (схема помещений приведена справа). Уже говорилось о том, что во время работ по ликвидации последствий аварии в мае-июне 1986г. на ЦЗ с вертолетов было сброшено около 16 тысяч тонн материалов. Вместе с обломками строительных конструкций, фрагментами графитовой кладки и попавшем на верхние отметки при строительстве «Укрытия» бетоном они образовали своеобразные «холмы» (см. рис. 87). Высота отдельных «холмов» в середине ЦЗ примерно 7 - 8м, к югу они подходят к потолочным перекрытиям помещения барабан - сепараторов. Западная и восточная части ЦЗ засыпаны меньше. Холмы отчасти покрывают массивные металлоконструкции, упавшие в ЦЗ. Среди последних - схема «Е» - верхняя плита биологической защиты (массой примерно 2700 т). Она вместе с трубами пароводяных коммуникаций, остатками технологических каналов, обломками железобетонных конструкций, застрявшими между верхними трактами наращивания, стоит на ребре под углом 15° от вертикали (см. рис. 19, 86, 87 и др.). В реакторном пространстве видно, что со схемы «Е» свисает ~ 40 каналов. Мост разгрузочно-загрузочной машины (РЗМ) массой 450т обрушился и прислонился к западной стене ЦЗ, его торец лежит на срезе стены южного барабана-сепаратора, нижняя часть контейнера РЗМ, пробив потолок операторской РЗМ, застряла в нем. Находится в ЦЗ и мостовой кран ЦЗ (121 т), и упавшие балки покрытия и др. Обращенные к ЦЗ стены помещений барабанов-сепараторов разрушены ударной волной во время взрыва. (рис. 86 - 88).



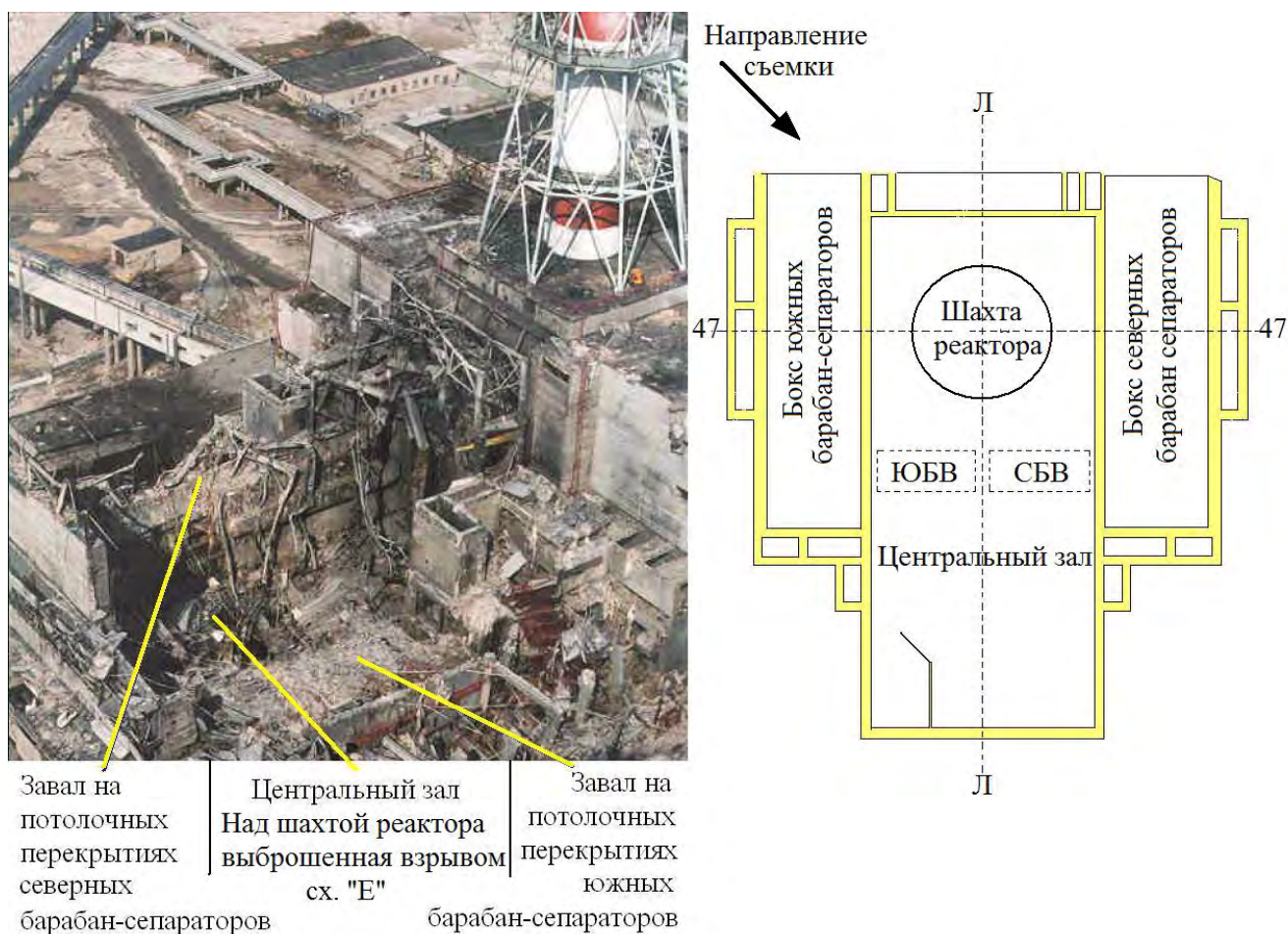


Рис.86. Разрушенные помещения на верхних отметках реакторного отделения 4-го блока (справа – расположение помещений до аварии).

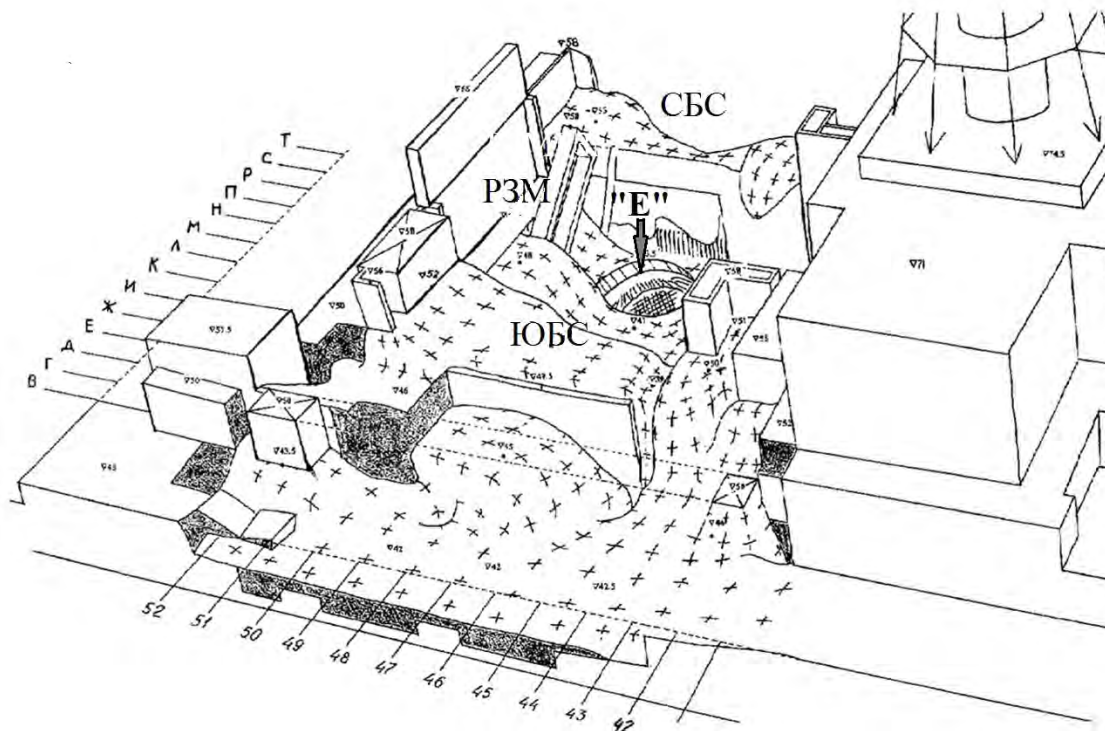


Рис. 87. Материалы, сброшенные в развал реактора и на верхние отметки блока, вместе с обломками разрушенных конструкций образовали многометровые «холмы»..



В образовавшейся насыпи и завалах зафиксированы провалы, в том числе в северный бассейн выдержки (пом. 505/4), в шахту ремонта РЗМ (пом.219/2), в люк шахты транспортного коридора (пом. 061/2) и др.

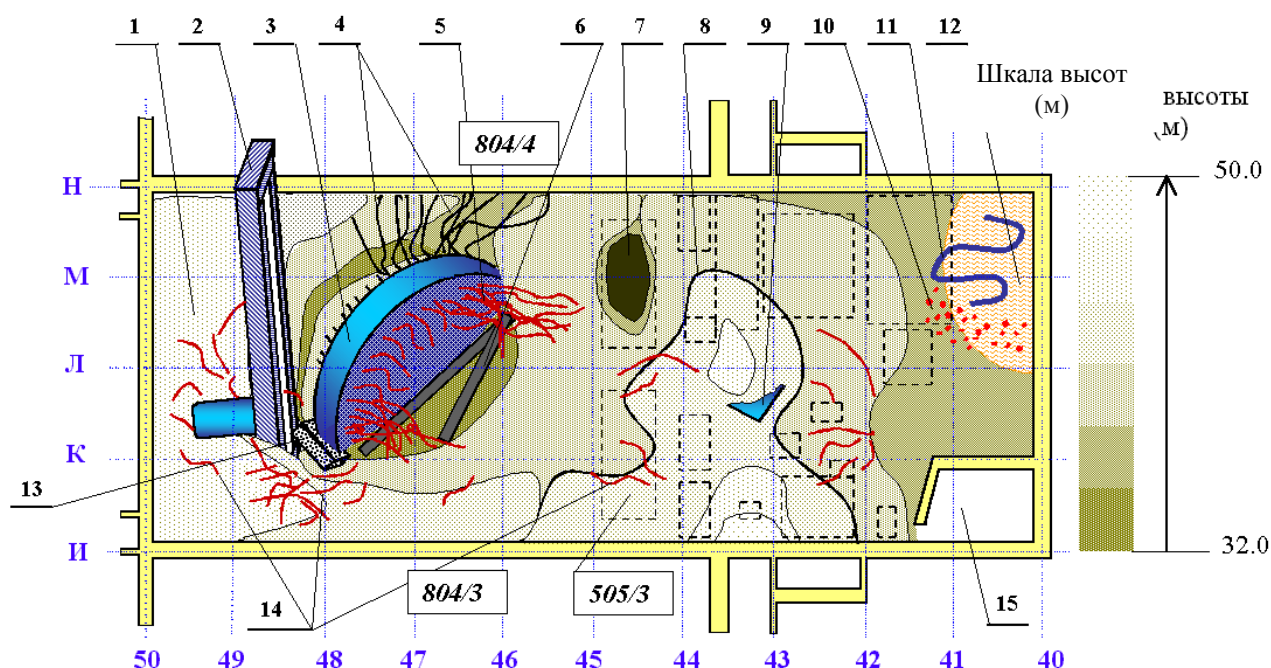


Рис. 88. Реконструкция послеаварийного состояния ЦЗ [Ч22].

1 - «Терраса»; 2 - мост РЗМ; 3 - схема «Е»; 4 - трубы ПВК; 5 - спутанные трубы («волосы Елены»); 6 - упавшие балки перекрытия; 7 - провал в помещение 504/4(СБВ); 8 - основная насыпь (вершина насыпи находится между осями 42 - 43); 9 - стальной лист; 10 - фрагменты активной зоны (сброшенные с крыши); 11 - фрагмент облицовки теплозащиты; 12 - зона предполагаемого расположения кассет со свежим топливом; 13 - железобетонная плита под сх. «Е»; 14 - ТВС и их фрагменты; 15 - пультовая.

Примечания: высота завалов указана без учета выступающих частей разрушенных конструкций; стены, ограничивающие ЦЗ, показаны условно (без разрушений).

Ядерное топливо представлено в ЦЗ тремя модификациями:

- **фрагментами активной зоны** (основная часть с отработавшим ядерным топливом и небольшое количество со свежим);
- **топливной пылью** (диспергированным топливом);
- **лавообразными ТСМ**.

В 2001г. при подготовке «Анализа безопасности...» [Ч22] группой экспертов были проанализированы все основные работы, в которых содержалась информация о количестве ТСМ на верхних отметках объекта «Укрытие». Оценки дали значение  $\geq 30$ т для совокупности фрагментов АЗ и лавы и  $\sim 5$ т топливной пыли на поверхности развала. Точность оценок невелика, но дает представление об огромной активности, сосредоточенной в этих помещениях.

В результате в ряде мест на верхних отметках (например, у верхних ходовых мостиках узла развешивания свежего топлива, в районе южного<sup>38</sup> и северного бассейнов выдержки, вокруг схемы «Е» и др.) радиационные поля достигают сотен и тысяч Р/ч.

<sup>38</sup> Например, на дне ЮБВ, в котором до аварии находилось 129 ТВС с отработавшим топливом, МЭД достигает 2000 Р/ч (2000 год).

Ранее уже говорилось о том, что поверхностные загрязнения конструкций внутри «Укрытия» могут достигать сотен тысяч  $\beta$  - частиц/(см<sup>2</sup> × мин) и тысяч  $\alpha$  - частиц/(см<sup>2</sup> × мин). Эти значения на много порядков превышают допустимые (см., например, рис. 72).

Работы по извлечению ТСМ и РАО с верхних отметок начнутся после проведения мероприятий по демонтажу.

К этому времени будут разобраны и удалены:

- легкая кровля ЦЗ зала,
- трубный настил ЦЗ, находящийся под легкой кровлей,
- южные панели покрытия,
- южные щиты-ключки,
- северные щиты-ключки,
- ферма, установленная при стабилизации (см. рис.70).

В конце работ выполняется демонтаж основных балок.

Северная балка Б -1 затем южная балка Б-1 (демонтаж которой выполняют маневренными кранами, которые сначала поднимают ее с положения восток-запад, а затем разворачивают в положение север-юг.) И наконец, южная балка Б-1 устанавливается в окончательное положение север-юг.

Демонтаж балки «Мамонт» требует ее предварительного разделения на две части из-за слишком большой массы этой конструкции (127т). А это, в свою очередь предполагает строительство временной дополнительной колонны, которая удерживала бы эти части, вплоть до их демонтажа.

После этого можно приступить к извлечению ТСМ и сопутствующих РАО находящихся на верхних отметках «Укрытие»..

В работе [Ч54] рекомендуется общая последовательность выполнения этих работ. Они разбиты на несколько этапов.

На **первом этапе** предполагается разрезать на фрагменты и извлечь крупные металлоконструкции (РЗМ, балки перекрытия и др).

На **втором этапе** - удалить завалы из перекрытий помещений барабан-сепараторов.

На **третьем этапе** необходимо демонтировать перекрытия помещений южных и северных барабан-сепараторов.

Если в барабан-сепараторах и под ними будут обнаружены скопления ТСМ (а вероятность этого весьма высока), то на **четвертом этапе** будут удалены сами барабан-сепараторы.

На **пятом этапе** будут удаляться фрагменты активной зоны и свежее топливо с мостиков узла развешивания свежего топлива.

На **шестом этапе** выполняется демонтаж узла развешивания свежего топлива и подготовка площадки для работы дистанционно управляемых агрегатов (ДКА).

На **седьмом этапе** выполняются работы по очистке ЦЗ с помощью ДКА, начиная от восточной стены в сторону и далее в сторону схемы «Е». Выполняется удаление интенсивных источников излучения (открыто лежащих фрагментов твэлов, ТВС, графитовых блоков) нагрузки от работающего ДКА, и закрывать их по мере разбора завалов.

На **восьмом этапе** выполняются работы по стабилизации схемы «Е» для удаления находящихся на ней фрагментов технологических каналов. В работе [Ч54] обсуждается использование специальной металлической конструкции, которую следует смонтировать над

шахтой реактора с помощью СОК. Схема «Е» будет крепиться в этой конструкции с помощью домкратов и захватов.

На *девятом этапе* выполняется удаление фрагментов технологических каналов с ТВС, находящихся на схеме «Е» с помощью мобильной инструментальной платформы (МИП), и ДКА. Это позволит демонтировать ее металлоконструкции и извлечь серпентинитовую засыпку схемы.

На *десятом этапе* выполняется удаление пеналов с отработавшими ТВС из южного БВ<sup>39</sup> и, извлечение ТСМ со дна южного и северного БВ<sup>40</sup>.

На *одиннадцатом этапе* осуществляется уточнение радиационной обстановки в ЦЗ, поиск и удаление оставшихся скоплений ТСМ.

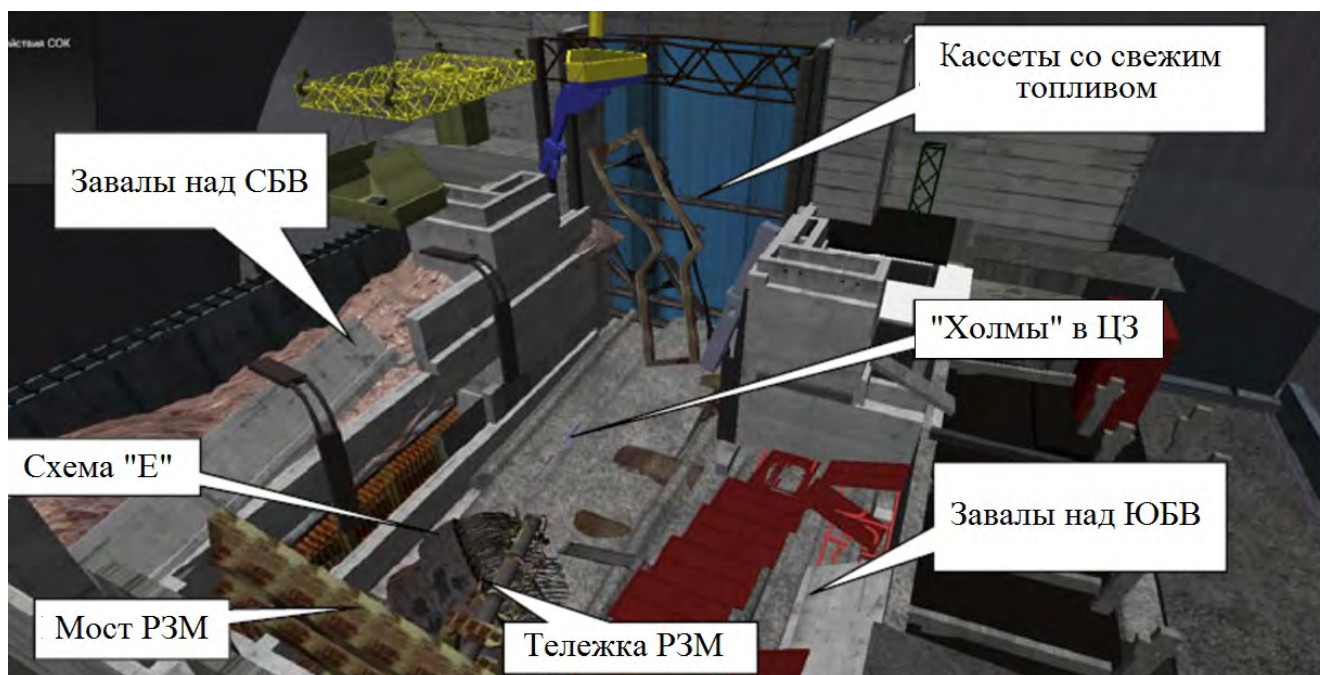


Рис. 89. Модель участка проведения работ в ЦЗ [Ч54].

Основные операции при извлечении ТСМ с верхних отметок, требующие перемещения значительных грузов и перенос их на значительные расстояния, должны выполняться с помощью СОК. Однако, механизмы СОК (при многих несомненных достоинствах) имеют небольшую скорость движения мостов и небольшую скорость подъема и опускания крюка при выполнении технологических операций. Поэтому для ускорения работ по извлечению ТСМ этот недостаток должен быть компенсирован использованием специально созданных дистанционно управляемых агрегатов. Эти ДУА позволят разбирать материалы завалов и засыпки, фрагменты конструкций, осуществлять предварительную сортировку РАО и и другие работы сразу на нескольких площадках. Предстоит и сконструировать специальные защитные контейнеры, в которых будет производиться перемещение радиоактивных материалов из зоны выполнения работ в ЦЗ к месту их переработки.

<sup>39</sup> Уже говорилось, что при обследовании южного БВ с помощью оптического перископа через пробуренные из нижних помещений наклонные скважины было обнаружено, что пеналы с отработавшими ТВС висят в штатном положении. Какое количество из них имеет повреждения и, возможно упало на дно БВ – не установлено.

<sup>40</sup> Существующие данные обследований ЦЗ говорят о том, что на дне северного БВ находится скопление ТСМ, попавшее туда через провал (рис. 88).



Предложены три основных способа извлечения ТСМ и сопутствующих РАО с верхних отметок ЦЗ: с двумя кранами СОК НБК, с одним краном СОК НБК, с одним краном СОК НБК и ДКА.

Авторы работы [Ч54] отмечают, что для извлечения ТСМ будет необходимо увеличить объем существующих систем НБК (систем вентиляции, контроля, спецканализации и др.), и построить новые помещения для оперативного персонала и оборудования,

### 1.19. РАЗРАБАТЫВАЕМЫЕ СХЕМЫ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ТСМ И РАО. СРЕДНИЕ И НИЖНИЕ ОТМЕТКИ.

Работы в 2-ой и 3-ий зонах (см. рис. 90) также связаны с преодолением значительных и специфических трудностей (см. [Ч53 – Ч55]).

**Мы перечислим только некоторые из них.**

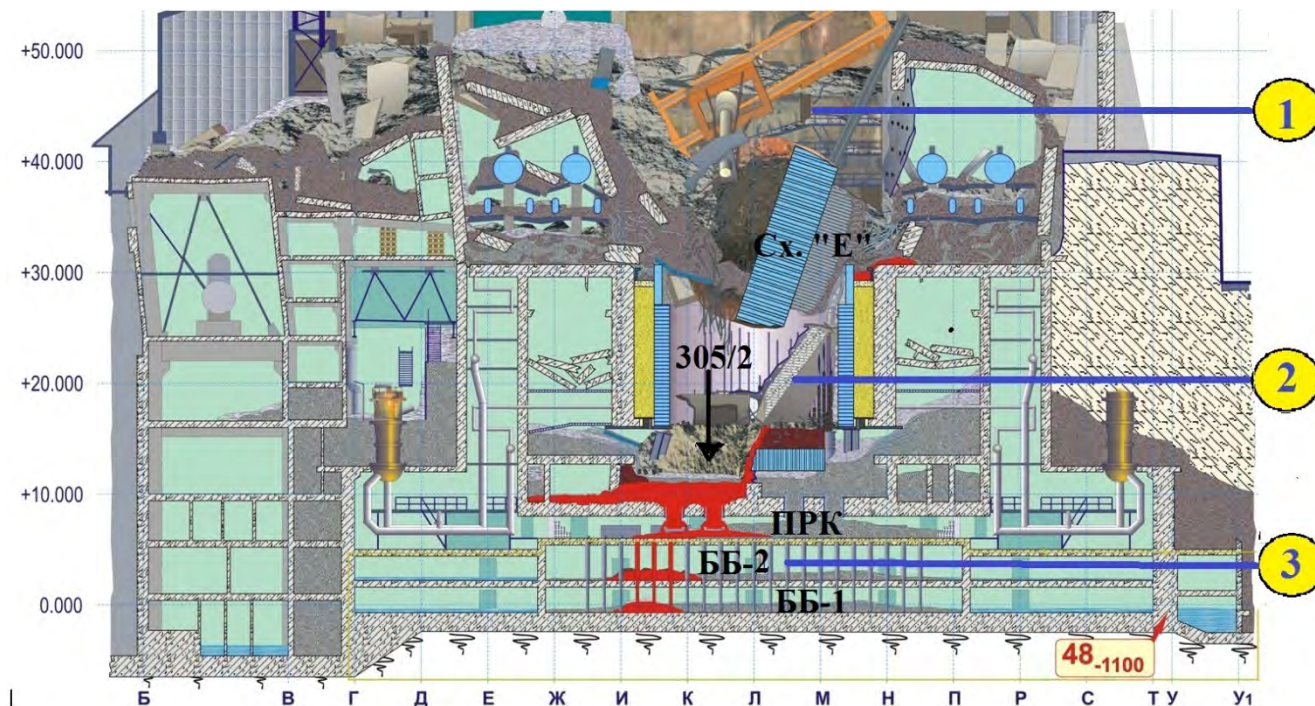


Рис. 90. Фрагмент разреза объекта «Укрытие» по оси 46<sub>+2500</sub>. Цифрами указаны расположения зон извлечения топлива. Красным цветом обозначены потоки лавы.

К зоне 2 относятся промежуточные отметки объекта «Укрытие» (подапаратное помещение 305/2, другие помещения на отметках от +9.000 до +24.000); количество ТСМ в зоне 2 оценивается как ~ 90 т по урану.

К зоне 3 - нижние отметки объекта «Укрытие» (парораспределительный коридор, два этажа бассейна-барботера, другие помещения ниже отметки +9.000); количество ТСМ в зоне 3 оценивается как ~ 22 т;

Топливо в этих зонах в основном представлено ЛТСМ – лавой. Как уже говорилось, центром ее образования стала юго-восточная часть подапаратного помещения (305/2) на отметке +9.000. Далее лава растекалась по полу помещения, достигала паросбросных клапанов, переливалась внутрь и попадала через систему труб в нижние помещения, созданные для локализации пара при проектной аварии – ПРК, ББ-1 и ББ-2 (рис. 90)..

При своем образовании и движении ЛТСМ взаимодействовали с бетоном перекрытий - частично прожигали их. В дальнейшем, при строительстве «Укрытия» большие объемы бетона (так называемого «свежего») также попали на нижние отметки объекта и залили часть помещений, в ряде случаев поверх застывшей лавы. Особенно много его в подапаратном помещении и ПРК (рис. 91).

Кроме этого в ряде комнат и коридоров на полу находятся скопления застывшего металла, расплав которого двигался вместе с потоками ЛТСМ не смешиваясь с ними (см. рис. 92).





Рис. 91. Бетон, заливший нижние помещения.



Рис. 92. Застывший металл на полу ПРК.



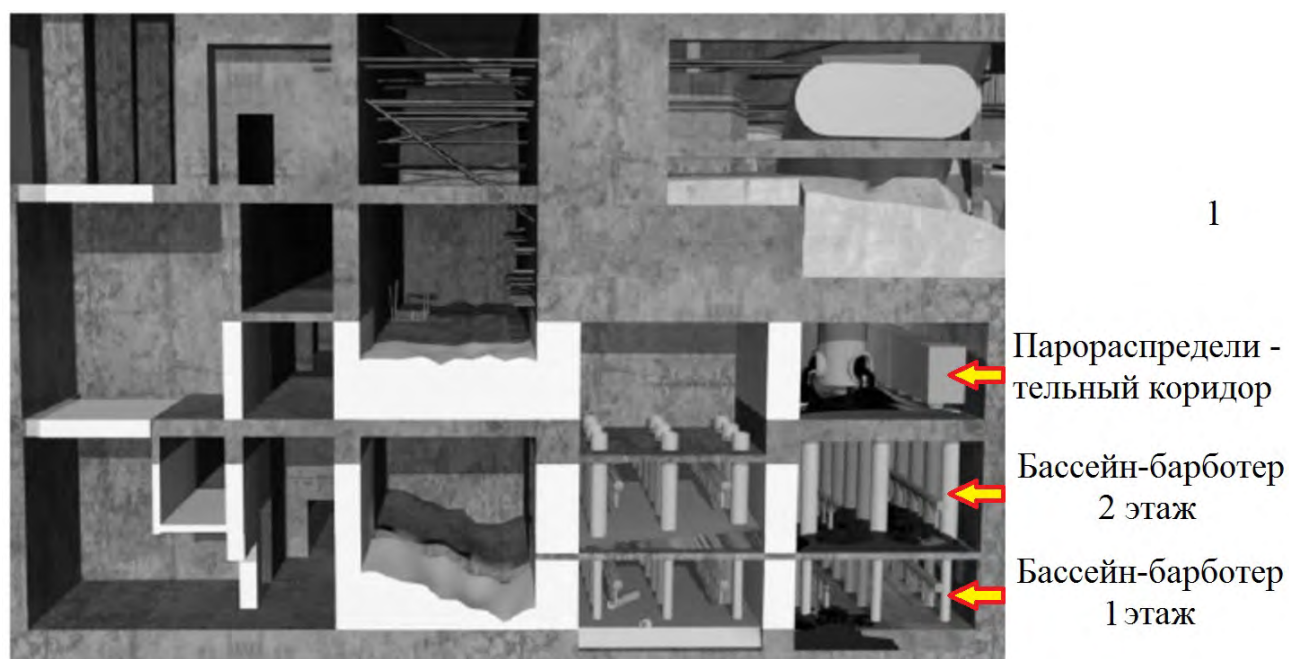
В результате для очистки нижних зон от топлива необходимо будет удалять многие сотни тонн загрязненных материалов. Кроме того, извлечение ТСМ потребует демонтажа ряда перекрытий и усиления других (чтобы обеспечить безопасность такого демонтажа).

Полноценное использование СОК в таких условиях представляется сложной задачей и из-за необходимости доставки оборудования в нужное место, и из-за низкой скорости перемещения извлеченных материалов.

**Скорее всего, работа в ряде помещений 2 и 3 зон потребует организации горизонтального доступа.**

Такая возможность рассматривается в работе [Ч55].

На рис. 93, взятом из этой работы, смоделирован разрез «Укрытия», на котором показан возможный путь для горизонтального доступа к скоплениям ТСМ и РАО на нижних отметках. Как видно из рисунка, реализация такого пути потребует разрушения части стен и перекрытий, а также ликвидации металлических конструкций и значительных наплывов бетона.



*Рис. 93. Возможный путь для организации горизонтального доступа к скоплениям ТСМ и РАО на нижних отметках. Белым цветом на сечении отмечены конструкции и наплывы бетона, которые препятствуют осуществлению этого пути.*

На следующем рисунке (94) показана возможная схема организации работ по извлечению ТСМ и РАО. Предлагается строительство внешней закрытой эстакады на отметке 12,500 (помещение 401/2), которая оснащена кран-балкой грузоподъемностью до 20,0 т

Доступ в помещения объекта на отметках 0,000, 3,000, 6,000 и 9,000 обеспечивается грузовым лифтом. На выходе эстакады для перемещения контейнеров с ТСМ и РАО на полу предусмотрен роликовый конвейер (рольганг).

### **1.19. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.**

Следует сказать, что опубликованные в последние годы, уже после возведения НБК, работы, в которых рассматривается стратегия действий при извлечении ТСМ и РАО из «Укрытия», (например, [Ч52 – Ч55]), **являются первыми шагами на многолетнем и трудном пути снятия этого объекта с эксплуатации. Они еще только намечают возможную последовательность действий и указывают на необходимость разработки методов и средств для успешного выполнения этой задачи.**

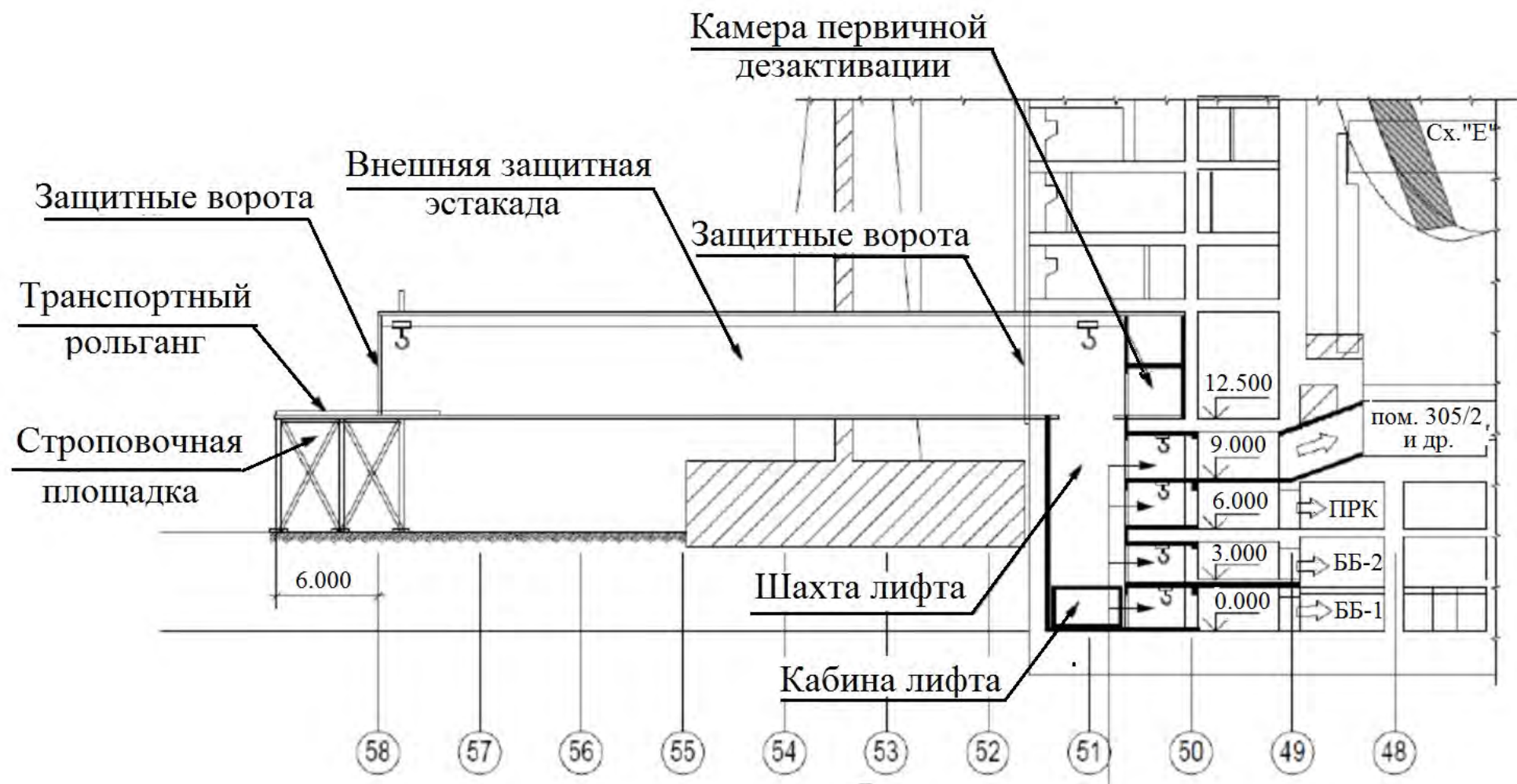


Рис. 94. Возможная схема организации работ по извлечению ТСМ и РАО при реализации горизонтального доступа

## ..ЧАСТЬ 2. ФУКУСИМА.

### 2.1. НЕКОТОРЫЕ ДАННЫЕ О БЛОКАХ, РЕАКТОРАХ И ТОПЛИВЕ АЭС ФУКУСИМА ДАЙ-ИЧИ (см. [B12 - B15], [Ф56]),

В дальнейшем мы будем постоянно обращаться к характеристикам блоков и состоянию реакторов и топлива F-1. Поэтому напомним наиболее важные из них (см. таблицы 1, 2 и далее),

Таблица 1. Некоторые характеристики блоков АЭС Фукусима Дай-ичи.

|                                    |                                 |        |         |         |         |         |
|------------------------------------|---------------------------------|--------|---------|---------|---------|---------|
|                                    | Блок 1                          | Блок 2 | Блок 3  | Блок 4  | Блок 5  | Блок 6  |
| Выходная мощность, МВт             | 460                             | 784    | 784     | 784     | 784     | 1100    |
| Начало строительства,<br>год/месяц | 1967/9                          | 1969/5 | 1970/10 | 1972/9  | 1971/12 | 1973/5  |
| Ввод в эксплуатацию, год/месяц     | 1971/3                          | 1974/7 | 1976/3  | 1978/10 | 1078/4  | 1979/10 |
| Загрузка топлива, т U              | 69                              | 94     | 94*     | 94      | 94      | 132     |
| Модель реактора                    | BWR3                            | BWR4   |         |         | BWR5    |         |
| Модель защитной оболочки           | Mark-1 (рис. 11 <sup>41</sup> ) |        |         |         |         | Mark-2  |

\* См. таблицу 2.

В день землетрясения энергоблок 1 АЭС Фукусима Дай-ичи работал на постоянной номинальной электрической мощности, а энергоблоки 2 и 3 на номинальной тепловой мощности. Энергоблок 4 был остановлен для планового технического осмотра. Проводились ремонтные работы и все топливные сборки были перемещены в бассейн выдержки отработавшего топлива. Энергоблоки 5 и 6 также были остановлены для планового технического осмотра, все топливные сборки находились в активной зоне реакторов (см. таблицу 2)

Таблица 2. Состояние реакторов АЭС Фукусима Дай-ичи перед аварией.

| Энергоблоки                                          | Состояние до начала землетрясения                          |
|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Реактор 1                                            | Эксплуатация (400 топливных сборок).                       |
| Бассейн отработавшего топлива                        | 392 топливные сборки (в т.ч. 100 свежих)                   |
| Реактор 2                                            | Эксплуатация (548 топливных сборок).                       |
| Бассейн отработавшего топлива                        | 615 топливных сборок (в т.ч. 28 свежих)                    |
| Реактор 3                                            | Эксплуатация (548 сборок, в т.ч. 32 сборки из МОХ-топлива) |
| Бассейн отработавшего топлива                        | 566 топливных сборок (в т.ч. 52 свежих)                    |
| Реактор 4                                            | Плановый технический осмотр (топливные сборки извлечены)   |
| Бассейн отработавшего топлива                        | 1535 топливных сборок (в т.ч. 204 свежих)                  |
| Реактор 5                                            | Плановый технический осмотр                                |
| Бассейн отработавшего топлива                        | 994 топливных сборок (в т.ч. 48 свежих)                    |
| Реактор 6                                            | Плановый технический осмотр                                |
| Бассейн отработавшего топлива                        | 940 топливных сборок (в т.ч. 64 свежих)                    |
| Общее хранилище отработавшего топлива                | 6375 топливных сборок                                      |
| В контейнерах сухого хранилища отработавшего топлива | 408 топливных сборок                                       |

Ниже представлены фото станции (рис. 95), схема расположения основных зданий АЭС (рис. 96), схемы компоновки оболочек реакторов, входящих в состав F-1 (рис. 97) и схема блока с оболочкой Марк 1 (рис.98).

<sup>41</sup> Достаточно распространенная модель. В США в это время работали 23 блока с таким типом защитной оболочки.



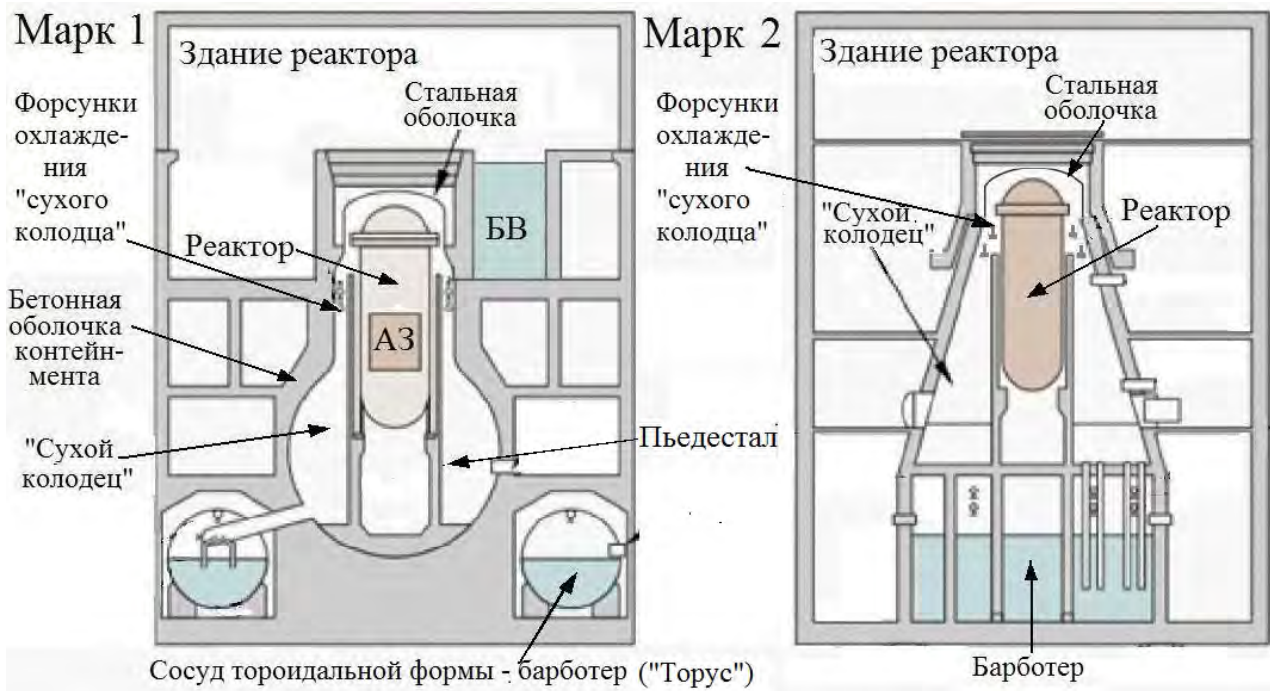


*Рис. 95. АЭС Фукусима I до аварии.*

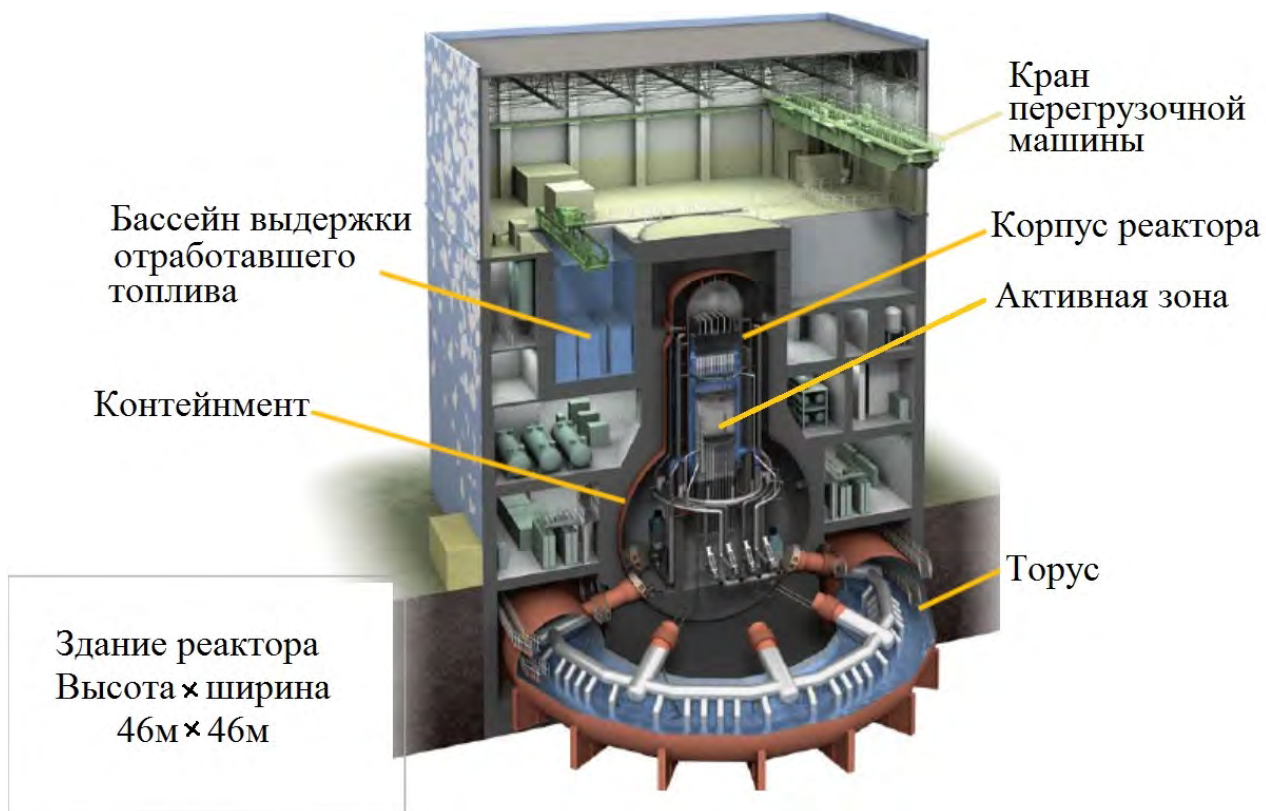




Рис. 96. Схема расположения основных зданий АЭС Фукусима Дай-ичи. Каждый из блоков кроме здания реактора и МЗ включает в себя – здание обслуживания (Service building), здание контроля (Control building) и еще ряд вспомогательных построек. БЩУ расположен на 2-ом этаже здания обслуживания.



**A**



**B**

Рис. 97. **A** - принципиальные схемы компоновки защитных оболочек Марк 1 (блоки 1 – 5) и Марк 2 (блок – 6). **B** – макет здания реактора с оболочкой Марк 1.



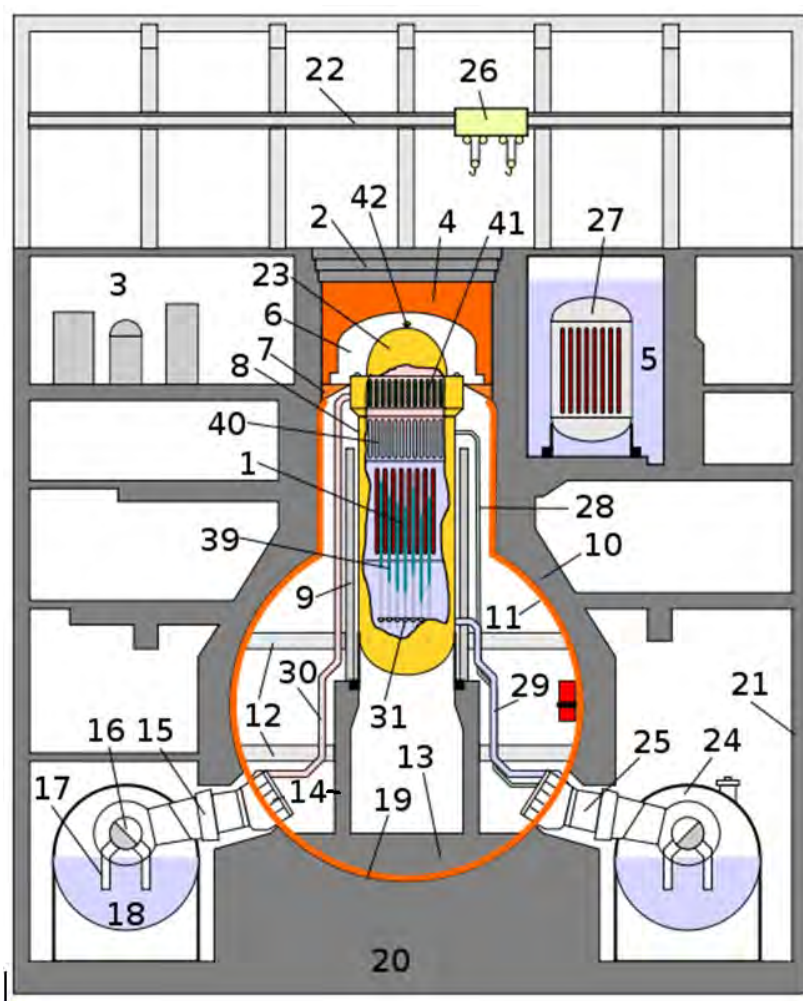


Рис.98. Схема блока с защитной оболочкой Марк 1 (блоки 1 – 5 АЭС Фукусима).

|    |                                              |    |                                                       |
|----|----------------------------------------------|----|-------------------------------------------------------|
| 1  | Активная зона (АЗ)                           | 22 | Рельсы перегрузочной машины                           |
| 2  | Бетонная заглушка                            | 23 | Люк для перегрузки топлива                            |
| 3  | Бокс вспомогательного оборудования           | 24 | Камера снижения давления - бассейн-барботёр («торус») |
| 4  | Головка шахты реактора                       | 25 | Сбросной патрубков                                    |
| 5  | Бассейн выдержки отработавшего топлива (БВ)  | 26 | Кран перегрузочной машины                             |
| 6  | Перегрузочное гнездо                         | 27 | Отработавшее топливо                                  |
| 7  | Бурт шахты реактора                          | 28 | Подача охлаждающей воды                               |
| 8  | Корпус реактора                              | 29 | Подача питательной воды                               |
| 9  | Биологическая защита                         | 30 | Пар на турбину                                        |
| 10 | Бетонная гермооболочка контеймента           | 31 | Приводы стержней СУЗ                                  |
| 13 | Бетонный монолит (основание, дно пьедестала) | 39 | Регулирующие стержни СУЗ                              |
| 14 | Пьедестал                                    | 40 | Сепаратор пара                                        |
| 15 | Сильфонный компенсатор                       | 41 | Пароосушитель                                         |
| 16 | Вентиляционный коллектор                     | 42 | Клапан сброса давления в реакторе                     |
| 17 | Опускная труба                               |    |                                                       |
| 18 | Вода в «торусе»                              |    |                                                       |
| 19 | Закладной участок облицовки                  |    |                                                       |
| 20 | Фундамент                                    |    |                                                       |
| 21 | Здание реактора                              |    |                                                       |

В модели Марк 1 первичный внутренний защитный корпус (контейнмент<sup>42</sup>) включает в себя свободно стоящий огромный пузыреобразный сосуд (или dry-well) – «сухой колодец», со стальной оболочкой в 30 мм, усиленной армированным бетоном.

Внутри контейнмента располагается металлический корпус реакторной установки высокого давления (Reactor Pressure Vessel - RPV).

Приводы системы управления и защиты расположены ниже активной зоны, а выше активной зоны находится система сепарации пара. Направленную принудительную циркуляцию воды через активную зону реактора BWR обеспечивают встроенные в объём корпуса струйные насосы, в которые под напором подаётся вода от внешних циркуляционных насосов.

Пароводяная смесь из активной зоны поступает в систему турбосепараторов, а далее – в блок жалюзийных сепараторов, где происходит разделение на воду и пар. Вода возвращается в водяной объём реактора, а пар направляется в турбину.

В своей нижней части контейнмент соединен с конструкцией тороидальной формы, «торусом», (wet-well – «мокрый колодец»), которая служит бассейном - барботером для снижения избыточного давления в контейнменте и фильтрации радиоактивных выбросов.

Соединение выполнено посредством воздухоотводящих каналов и клапанов.

Во время нормальной работы dry-well и wet-well свободное от воды пространство заполнено азотом. В торусе вода имеет температуру окружающей среды. В активной зоне реактора (1) находятся тепловыделяющие сборки, регулирующие стержни системы управления и защиты и необходимые датчики.

Как и в большинстве кипящих реакторов, регулирующие стержни располагаются снизу. Такое размещение позволяет повысить их эффективность - максимум потока тепловых нейтронов смещён в реакторах этого типа в нижнюю часть АЗ.

Для обслуживания СУЗ в контейнменте предусмотрены технологические проходки (тоннели). В нем же расположены приводы стержней СУЗ.

Пароводяную смесь получают в активной зоне. Давление в корпусе реактора составляет около 7 МПа. При этом давлении вода закипает в объёме АЗ при  $t \approx 280^\circ\text{C}$ .

На территории Ф1 имеется несколько хранилищ отработавшего топлива. Приреакторный бассейн выдержки отработавшего ядерного топлива расположен вне контейнмента внутри защитного бетонного здания реактора на верхнем этаже реакторного блока.

Общий бассейн находится вблизи 4-го блока на расстоянии ~ 50м в западном направлении (см. рис. 99). Его бассейн содержит около 60% отработавшего топлива со всех блоков. В 1995г. было введено в эксплуатацию сухое контейнерное хранилище, рассчитанное на 40 лет.

---

<sup>42</sup> Контейнмент - один из основных барьеров, защищающих окружающую среду от активности, накопленной в топливе ядерного реактора (другие барьеры – топливная матрица, оболочка твэла, корпус реактора).



Рис. 99. . Общий бассейн отработавшего топлива находится вблизи 4-го блока.

На дне каждого из БВ стоят корзины-кассеты с ячейками, в которые помещают сборки, извлеченные из активной зоны (рис. 100). Топливная сборка состоит из 60 топливных стержней общей массой около 170кг и длиной ~ 4,4м. Слой воды над сборками в бассейнах составляет 7 – 8м. Вода в них постоянно охлаждается.

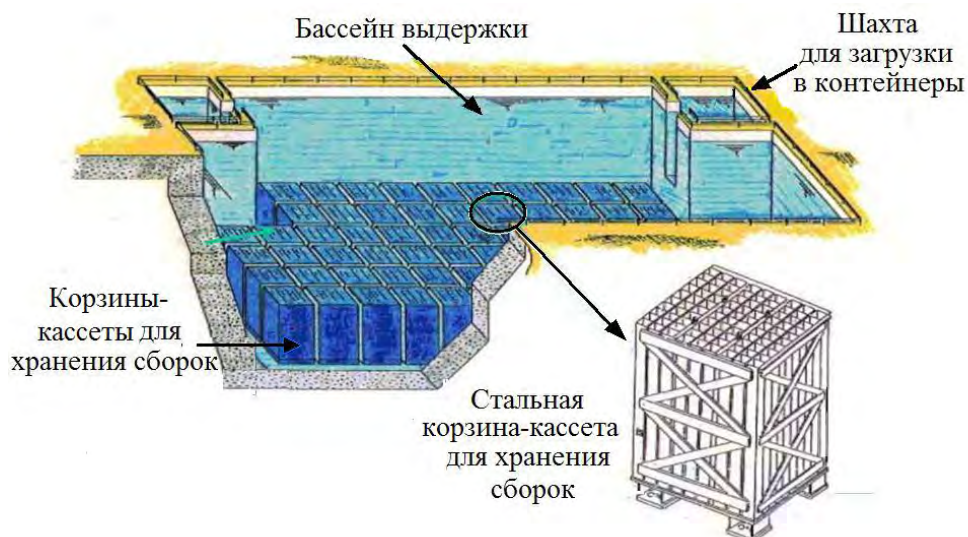


Рис. 100. Размещение топливных сборок в БВ.

Основная информация о количестве и составе радиоактивных продуктов, находившихся в реакторах и бассейнах выдержки Ф1 к моменту аварии, приведена в таблицах 2 и 3 (см. [Ф56 – Ф59]).



Таблица 3. Количество и состав радиоактивности, накопленной во всех реакторах и бассейнах выдержки F-1 к моменту аварии.

| Продукты деления                            |                       | Актиноиды         |                       |
|---------------------------------------------|-----------------------|-------------------|-----------------------|
| Радионуклид                                 | Активность, Бк        | Радионуклид       | Активность, Бк        |
| $^{85}\text{Kr}$                            | $2,58 \times 10^{17}$ | $^{238}\text{Pu}$ | $7.92 \times 10^{16}$ |
| $^{89}\text{Sr}$                            | $9,80 \times 10^{18}$ | $^{239}\text{Pu}$ | $8.37 \times 10^{15}$ |
| $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$            | $2,10 \times 10^{18}$ | $^{240}\text{Pu}$ | $1.46 \times 10^{16}$ |
| $^{90}\text{Y}$                             | $2,15 \times 10^{18}$ | $^{241}\text{Pu}$ | $3.43 \times 10^{18}$ |
| $^{95}\text{Zr}$                            | $1,91 \times 10^{19}$ | $^{241}\text{Am}$ | $8.68 \times 10^{15}$ |
| $^{95}\text{Nb}$                            | $1,96 \times 10^{19}$ | $^{242}\text{Cm}$ | $8.95 \times 10^{17}$ |
| $^{106}\text{Ru} + ^{106}\text{Rh}$         | $9,60 \times 10^{18}$ |                   |                       |
| $^{125}\text{Sb}$                           | $1,83 \times 10^{17}$ |                   |                       |
| $^{132}\text{Te}$                           | $1,67 \times 10^{19}$ |                   |                       |
| $^{131}\text{I}$                            | $1,19 \times 10^{19}$ |                   |                       |
| $^{133}\text{Xe}$                           | $2,38 \times 10^{19}$ |                   |                       |
| $^{134}\text{Cs}$                           | $3,80 \times 10^{18}$ |                   |                       |
| $^{137}\text{Cs} + ^{137\text{m}}\text{Ba}$ | $2,99 \times 10^{18}$ |                   |                       |
| $^{144}\text{Ce} + ^{144}\text{Pr}$         | $1,72 \times 10^{19}$ |                   |                       |
| $^{147}\text{Pm}$                           | $3,51 \times 10^{18}$ |                   |                       |
| $^{154}\text{Eu}$                           | $1,42 \times 10^{17}$ |                   |                       |

Таблица 4. Активность ( $^{137}\text{Cs} + ^{137\text{m}}\text{Ba}$ ), накопленная в реакторах и бассейнах выдержки F-1

| Источник            | Количество топлива, т(U) | Среднее выгорание, МВт×сутки/кг (U) | Активность $^{137}\text{Cs}$ , Бк |
|---------------------|--------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| АЗ 1 реактора       | 68                       | 30                                  | $2.40 \times 10^{17}$             |
| АЗ 2 реактора       | 98                       | 30                                  | $3.49 \times 10^{17}$             |
| АЗ 3 реактора       | 98                       | 30                                  | $3.49 \times 10^{17}$             |
| Общее количество    |                          |                                     | $9.38 \times 10^{17}$             |
| БВ 1                | 68                       | 40                                  | $2.21 \times 10^{17}$             |
| БВ 2                | 68                       | 40                                  | $4.49 \times 10^{17}$             |
| БВ 3                | 68                       | 40                                  | $4.49 \times 10^{17}$             |
| БВ 4                | 94                       | 40                                  | $1.11 \times 10^{18}$             |
| Общее количество    |                          |                                     | $2.2 \times 10^{18}$              |
| Всего на 4-х блоках |                          |                                     | $3.1 \times 10^{18}$              |

В дальнейшем мы часто будем использовать такой термин, как «**кориум**». Он образуется в активной зоне благодаря сложным физико-химическим процессам, сопровождающим рост температуры при аварии с потерей охлаждения. Кориум представляет собой расплавленную и нагретую ( $> 2000^{\circ}\text{C}$ ) смесь содержимого активной зоны. Эта смесь включает в себя ядерное топливо (в случае F-1 это  $\text{UO}_2$  или  $\text{MOX}^{43}$ ), продукты деления, конструкционные материалы реактора и продукты их взаимодействия между собой, с водой и воздухом. Материал твэлов и их оболочек составляет обычно до 90% массы кориума.

При проплавления корпуса реактора и попадания кориума в контейнмент, в расплав могут войти конструкционные материалы последнего, например, материалы, находящиеся в составе его бетонной гермооболочки.

Следуя названиям, принятым в Чернобыле, мы будем говорить об этом расплаве, как о **TSM (топливосодержащем материале)**. В ряде японских работ для TSM используется термин – «топливные отходы» или «топливный мусор» (燃料ゴミ).

<sup>43</sup> Для реактора 3-го блока (см. таблицу 2).

## *2.2. РАДИАЦИОННАЯ ОБСТАНОВКА ПОСЛЕ АВАРИИ. НАЧАЛО ОЧИСТКИ ТЕРРИТОРИИ.*

Трудности проведения работ на площадке F-1, а тем более в помещениях разрушенных блоков определяются, прежде всего, радиационной обстановкой. Мы кратко охарактеризуем ее, чтобы дать представление о порядке величин МЭД для ликвидаторов

Активная стадия аварии, сопровождающаяся взрывами и пожарами на блоках, продолжалась с 11 марта (с 15:37)<sup>44</sup> вплоть до середины марта. Хронология событий подробно описана в десятках работ, к которым мы отсылаем читателей (см., например, [1]).

В результате к 15 марта здания первых четырех реакторов сильнее всего пострадали, превратились в развалины (Введение. рис. 11), а территория F-1 в огромную свалку радиоактивного строительного мусора и разрушенных конструкций (рис. 101, 102).



*Рис. 101. Территория F-1 после аварии.*

---

<sup>44</sup> 11 марта 2011г. в 15:37 по местному времени на территорию F-1 пришла наиболее разрушительная волна цунами.

Аварийные дизель-генераторы были затоплены и отключились. Насосы, подающие морскую воду для охлаждения реактора и силовых механизмов, также оказались под водой. Распределительные щиты системы аварийного энергоснабжения были выведены из строя - произошли многочисленные короткие замыкания. В результате была полностью потеряна мощность переменного тока при эксплуатации. Позднее (16:36) произошел отказ всех функций охлаждения реактора 1-го блока.



Рис.102. Мощности дозы на территории F-1 и около блоков 22.03.11. Значения МЭД приведены в мР/час (1мЗ/час соответствует 100мР/час).

Значительно большие мощности дозы наблюдались в помещениях блоков, куда по необходимости должны были входить работники станции. Уже через 1.5 часа в Центр экстренного реагирования или Оперативный штаб (Emergency Response Center), который располагался на территории F-1 в здании, защищенном от землетрясений, одно за другим стали приходить сообщения о росте МЭД в производственных помещениях.

Например, в 22 часа один из сотрудников, работавших на первом блоке, собирался войти в здание реактора, задержался и обнаружил, что в течение всего 10 сек. показания его дозиметра выросли на 0.8 мЗв. (это могло произойти если мощность дозы в этом месте достигает  $\sim 300$  мЗв/час !)<sup>45</sup>. Скоро обнаружился целый ряд помещений, в которых МЭД в сотни и тысячи раз превышали допустимое для АЭС значение. Поэтому с первого дня после аварии встал вопрос о необходимости максимальным образом заменить на опасных работах на площадке, а тем более в разрушенных блоках, людей роботами. Ниже мы подробно остановимся на этом вопросе.

Что касается территории станции, то здесь сразу же начали проводить мероприятия по очистке дорог для обеспечения проезда машин. После этого приступили к разбору завалов. Для этого применяли переделанную и оснащенную телеуправлением строительную технику - экскаваторы, бульдозеры, грузовые машины, которые расчищали проходы между блоками от радиоактивных обломков.

Дистанционная техника, расположенная на площадке в максимальной близости от аварийных блоков, применялась для охлаждения топлива в бассейнах выдержки. Здесь работали телеуправляемые бетононасосы фирмы Putzmeister<sup>46</sup>. Они подавали воду сверху через разрушенные кровли и вели наблюдение за ситуацией с помощью телекамер, установленных на  $\sim 70$ -ти метровой стреле (см. рис. 103).

<sup>45</sup> В это время для сотрудников АЭС в Японии была установлена предельно допустимая доза облучения в 100 мЗв. После ее получения работающий должен был быть выведен из радиационно-опасных условий. Чуть позже на время аварии была принята допустимая доза – 250 мЗв.

Напомним, что разовая доза в 1 зиверт = 1000 мЗв достаточна, чтобы вызвать лучевую болезнь; при дозе в 53 в течение месяца погибает половина облученных, при 103 в смерть наступает в течение недели.

<sup>46</sup> Дополнительно защищенные свинцом.



Рис. 103. Телеуправляемый Putzmeister с 62-метровой стрелой, работающий вблизи 4-го блока (начало апреля 2011 г.) Задача бетононасоса - разведка и подача воды в БВ.



На площадке F-1 с 2011 на разборке радиоактивного мусора применялась и стандартная для атомной отрасли радиационно-стойкая дистанционная техника: тяжелые (больше тонны) роботы BROKK<sup>47</sup> (рис. 104) и манипуляторы на подвижных тележках Walischmiller. . К сожалению, парк машин, находящихся на станции все же оказался недостаточным и многие работы, проводящиеся в опасных радиационных условиях, выполнялись людьми.



Рис. 104. Робот шведской компании Brokk AB.

<sup>47</sup> Роботы Brokk (Шведская компания Brokk AB) используются для для извлечения, погрузки, разгрузки и сортировки радиоактивных материалов, демонтажа и реконструкции объектов химической и ядерной промышленности, разбора железобетонных и металлических конструкций ядерных реакторов и хранилищ ОЯТ и РАО,

### 2.3. ОБЩИЕ ПЛАНЫ ПО ВЫВОДУ Ф1 ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ.

9 ноября 2011 года министр экономики, торговли и промышленности Японии Юкио Эдано и министр окружающей среды Госи Хосоно подписали первый вариант плана работ, названного **«Средне- и долгосрочная дорожная карта вывода из эксплуатации энергоблоков 1–4 АЭС Фукусима Дай-ичи»**.

Проект плана подготовили три организации – ТЕРСО (оператор аварийной АЭС), Агентство по природным ресурсам и энергетике (ANRE) и Агентство ядерной и промышленной безопасности (NISA). Окончательный вариант был утвержден на организованной правительством и ТЕРСО конференции по средне- и долгосрочным контрмерам на F-1[Ф60]. В основу плана положены следующие принципиальные положения:

- **при осуществлении всех работ приоритет должен отдаваться безопасности местных жителей и персонала;**
- **при реализации проекта необходимо поддерживать связь с населением, чтобы завоевать их понимание;**
- **должна проводиться постоянная корректировка «дорожной карты» по мере анализа ситуации и получения новых результатов НИОКР.**

Уверенность в реальности выполнения этого плана опиралась на то, что в течение нескольких следующих недель должна была подтвердиться так называемая «холодная остановка» (cold shutdown status) первого, второго и третьего реакторов F-1.

Термин «холодная остановка» для обычно работающего реактора означает прекращение ядерной реакции, охлаждение активной зоны и поддержание реактора при нормальной температуре (ниже 100<sup>0</sup>С) и нормальном давлении в течение длительного периода (чаще всего с целью проведения периодического осмотра).

Формально понятие «холодной остановки» не может распространяться на случай с Фукусима-1, из-за того, что ядерное топливо в реакторах было разрушено (частично расплавлено), а его геометрия сильно изменилась. Но регулирующие организации Японии и ТЭПКО сошлись на том, что в данном случае «холодная остановка» будет подразумевать два главных условия -. температура в защитной оболочке реактора ниже 100<sup>0</sup>С и осуществляется контроль за выбросом активности из блока.

Ход событий подтвердил ожидания. К 16 декабря специалистам компании-оператора ТЕРСО удалось наладить систему охлаждения внутренних частей реакторов и снизить температуру в них до необходимого уровня - ниже 100<sup>0</sup>С.<sup>48</sup> Уровень радиации у границ территории станции стал ниже 1 мЗв в год, что является нормой для обычного человека.

Как констатировал в своем выступлении премьер-министр Японии Есихико Нода (Yoshihiko Noda) были выполнены все условия холодной остановки реакторов Фукусимы-1. Даже если случится нечто непредсказуемое, специалисты смогут удержать радиационный фон по периметру станции на стабильно низком уровне.

Принятие дорожной карты ознаменовало переход от действий по стабилизации состояния реакторов после аварии к долгосрочному этапу ликвидации ее последствий и выводу F-1 из эксплуатации.

Согласно первоначальному плану, после достижения холодного останова работы по ЛПА должны были пройти три фазы.

**Фаза 1** (в течение ~ 2 лет): создание необходимых условий для начала извлечения топлива из хранилищ ОЯТ.

**Фаза 2** (в течение ~10 лет): удаление отработавшего топлива и отходов со всех блоков и создание условий для удаления различных топливосодержащих материалов – ТСМ («топливного мусора», по терминологии ТЕРСО).

---

<sup>48</sup> Температура на трех поврежденных реакторах в ноябре - декабре 2011г. колебалась от 38.1<sup>0</sup>С до 67.8<sup>0</sup>С.

**Фаза 3** (в течение 30-40 лет): завершение удаления всех ТСМ (в том числе фрагментов топливных сборок, застывшей «топливной лавы», активной пыли и загрязненной воды), полный вывод из эксплуатации (см. рис. 105).



Рис. 105. Фазы вывода F-1 из эксплуатации, согласно «дорожной карте».

После принятия первой «дорожной карты» достаточно быстро выяснилось, что многие из намеченных сроков слишком оптимистичны. В последующие годы продолжали публиковаться дополненные и откорректированные варианты этого документа (см., например, [Ф61, Ф62]).

Начиная с августа 2013г. ТЕРСО разрабатывало стратегию и тактику вывода F-1 из эксплуатации совместно со вновь созданной организацией Международным исследовательским институтом по выводу из эксплуатации ядерных объектов - **IRID** (*International Research Institute for Nuclear Decommissioning*)<sup>49</sup>.

В задачи, поставленные перед этим институтом, входило проведение исследований по выводу из эксплуатации атомных станций, помощь в реализации проектов и новых технологий, анализ международной практики и установление сотрудничества в этой области.

Новая структура должна была участвовать в создании роботов с дистанционным управлением, способных работать в условиях повышенной радиации.

Особое внимание предполагалось уделять вопросам, связанным с извлечением разрушенного ядерного топлива и ТСМ. Планировалось развертывание экспериментальной базы института вблизи площадки F-1.

При создании IRID предполагалось, что в штат сотрудников войдут около 500 экспертов из 17 организаций, включая государственные научно-исследовательские институты, эксплуатирующие организации и фирмы, связанные с производством оборудования для АЭС<sup>50</sup>.

«Работы IRID над проблемами F-1 могут стать основой для научных открытий и технологических разработок» - заявил один из инициаторов создания института президент Японского атомного промышленного форума (JAIF) Такуя Хаттори.

Как уже отмечалось, IRID стал участником разработок новых вариантов «Дорожной карты», начиная с 2015г. Очередной, переработанный, ее вариант был выпущен в сентябре 2017г. В нем достаточно подробно рассматривались основные направления деятельности, среди которых:

- **обращение с загрязненной водой;**
- **извлечение ядерного топлива из бассейнов выдержки реакторов;**

<sup>49</sup> Организация объединила 18 компаний, которые ведут работу по выводу из эксплуатации F-1. Среди них такие известные, как Токийская Электроэнергетическая компания, Incorporated (TEPCO), Японская Атомная Энергетическая Компания, Toshiba, Hitachi-GE Nuclear Energy, Ltd., Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. и другие.

<sup>50</sup> По данным на 01.10.17 число сотрудников составляло уже около 950 человек.



- **извлечение отработавшего, поврежденного топлива и ТСМ из реакторов;**
  - **обращение с отходами, находящимися на площадке**
- и другие меры, в том числе, такое важное направление, как **снижение рисков для работающего персонала.**

Следует отметить, что корректировки сроков и методов выполнения «Дорожной карты». в 2015 и 2017 гг. не изменили ее основной стратегической линии (см. рис. 105 и 106) .

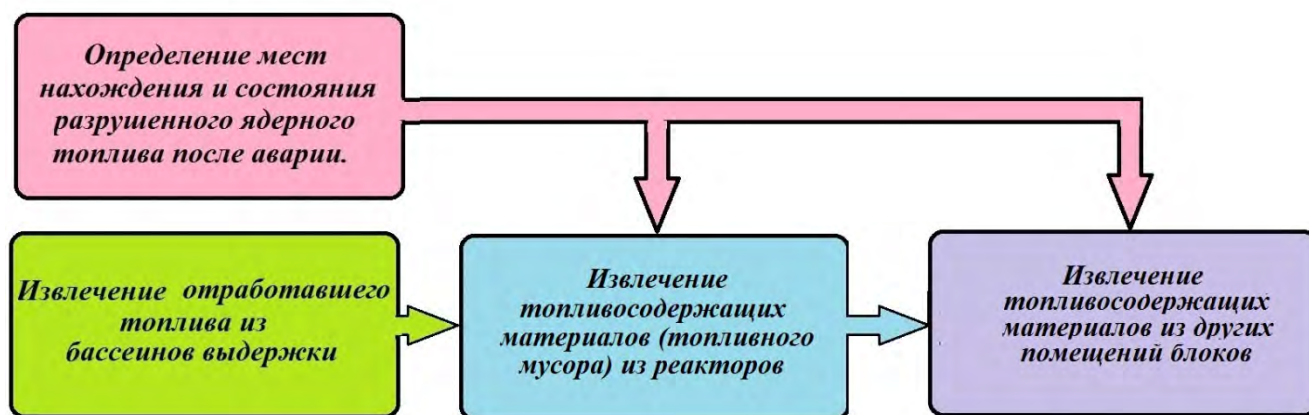


Рис. 106. Основная стратегическая линия в отношении извлечения из аварийных блоков топлива при выводе F-1 из эксплуатации.

#### 2.4. ИЗВЛЕЧЕНИЕ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА ИЗ БАССЕЙНОВ ВЫДЕРЖКИ.

Начало работ по извлечению отработавшего топлива из бассейнов выдержки достаточно подробно изложено во многих работах, в том числе и в [Ф56].

Здесь мы кратко перечислим результаты, достигнутые к концу 2018г.

**В первую очередь к операции по извлечению приступили на 4-ом блоке<sup>51</sup>.**

Для выполнения этой операции над зданием была возведена дополнительная конструкция - «изолирующий (или защитный) кожух» (рис. 107), которая охраняла внешнюю среду от возможных выбросов радиоактивности и препятствовала попаданию в БВ атмосферных осадков.

Кроме того кожух служил для дополнительного укрепления опорных конструкций.

<sup>51</sup> Напомним, что все топливо реактора 4-го блока до аварии находилось в БВ.



*Рис. 107. Строительство  
"Изолирующего кожуха"  
над 4-ым блоком F-1*

Процесс извлечения и транспортировки топлива из 4-го блока в пристанционное хранилище начался 18 ноября 2013 г. Всего были перемещены 1331 сборки.

***Об окончании работ ТЕРСО сообщила 22 декабря 2014 г.***

«Если сравнить весь процесс демонтажа с расстоянием в 100 миль, то выемка топлива из 4-го энергоблока заняла всего лишь одну милю» - сказал директор F-1 Акира Оно<sup>52</sup>..

«Но все равно, я очень впечатлен проделанной работой и считаю удаление топлива из 4-го блока ключевым событием»

Следующим БВ, из которого планировалось извлечение отработавшего топлива, был бассейн **3-го блока**. До аварии в нем находилось 566 топливных сборок—514 отработавших и 52 свежих. Здесь специалистам пришлось столкнуться с существенно более трудными задачами, поскольку здание было разрушено взрывом, а бассейн завален конструкциями и их обломками.

Вывоз из него крупногабаритного мусора. был завершен в 2015 году.

В следующем году проводилась подготовка и очистка помещений, в которых предполагалось вести работы по извлечению топлива.

В 2017 году смонтировано дистанционно-управляемое оборудование для вывоза РАО.

К осени 2018г. был собран «изолирующий кожух» (рис. 108) под защитой которого должно было извлекаться топливо и установлена перегрузочная машина

<sup>52</sup> Директором F-1 во время аварии был Масао Ёсида. Шесть месяцев, не покидая станции, Ёсида руководил работами по ликвидации ее последствий. По общему мнению специалистов, его действия позволили уменьшить масштабы катастрофы и предотвратить худший из сценариев развития ситуации В декабре 2011 года Масао Ёсида покинул пост Директора F-1 из-за тяжелой болезни, а в 2013г. он скончался.





Рис. 108. «Изолирующий кожух» смонтирован над 3-им блоком (справа виден 4-ый блок).

Предполагаемая схема работы приведена на рис. 109, а схема транспортного контейнера на рис. 110 (подробный план изложен в [Ф63]).

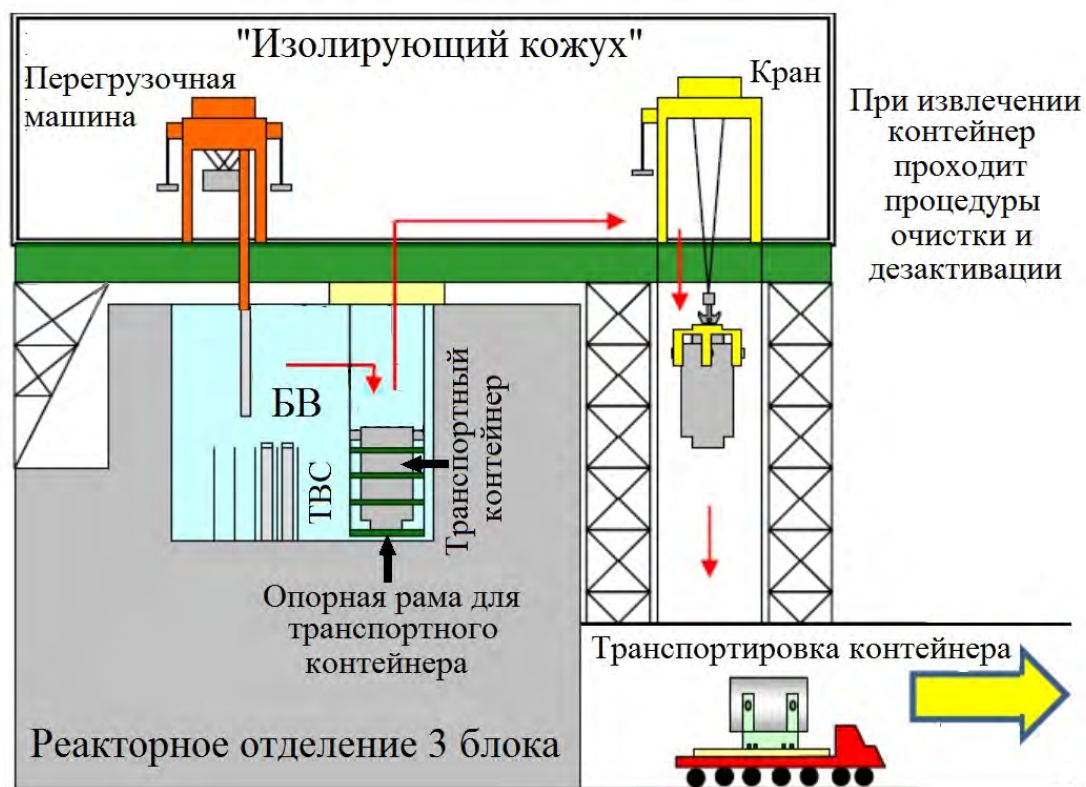


Рис.109. Предполагаемая схема извлечения отработавшего топлива из БВ 3-го блока.



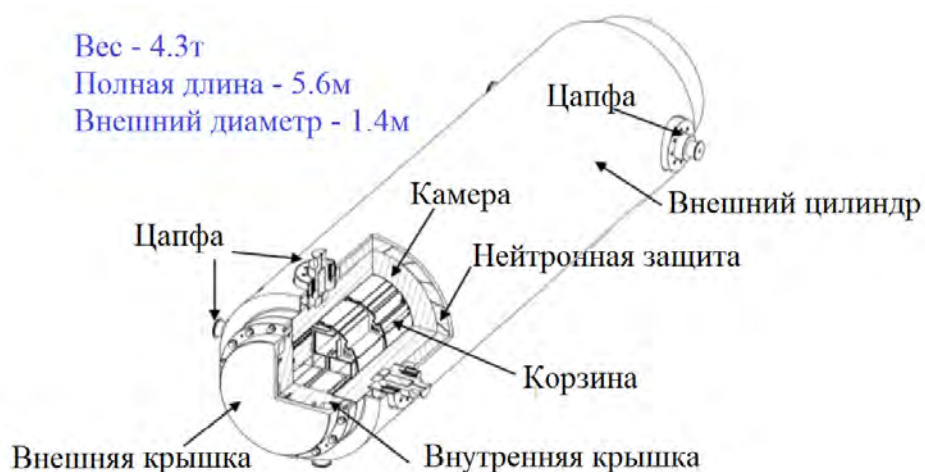


Рис. 110. Схема транспортного контейнера.

Что касается **1-го и 2-го блоков**, то в соответствии с дорожной картой, на них только разворачиваются подготовительные работы, а собственно извлечение, согласно последней дорожной карте, одобренной правительством Японии, предполагается начать в 2023г.

Очевидно, что опыт, полученный в этих работах, окажется необходимым в дальнейшей деятельности по обращению с разрушенным топливом и ТСМ.

## 2.5. МЕСТОНАХОЖДЕНИЕ И СОСТОЯНИЕ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА ПОСЛЕ АВАРИИ (РАСЧЕТНЫЕ ОЦЕНКИ) [Ф56].

Первое представление о том, где в блоках после аварии находится ядерное топливо, было получено аналитическим путем.

Сразу после сообщения об аварии на АЭС «Фукусима-1» 11 марта 2011г. научные коллективы во всем мире стали проводить расчеты и пытаться прогнозировать различные сценарии ее протекания и возможные последствия для населения и территорий.

Так, уже к утру 12 марта 2011 г. в Техническом кризисном центре ИБРАЭ РАН, на основе доступной в то время информации об аварии, были получены первые результаты о возможной последовательности ключевых событий в аварийном реакторе [Ф56].

Расчеты показали, что при прекращении охлаждения протекание аварии достаточно скоротечно. Уже примерно через 2 часа с момента полной потери электроснабжения уровень воды в реакторе 1-го блока достигнет топлива. При этом начнут разрушаться оболочки твэлов, а через 13 – 15 часов (до ~ 6 часов утра 12 марта) кориум, поступающий на дно корпуса реактора, приведет к началу его расплавления.

Более полная картина, полученная на основании всех имеющихся к этому моменту данных, была опубликована ТЕРСО в мае 2011г. Для восстановления поведения ядерного топлива в первых трех реакторах F-1 при аварии использовался код Modular Accident Analysis Program – (МААР)<sup>53</sup>. Впоследствии, в ноябре 2011г. расчеты были уточнены, а в августе 2014г. еще раз откорректированы.

Для реактора 1-го блока анализ произошедшего, выполненный ТЕРСО, показывал следующее (см. [Ф64 – Ф66]).

- 11 марта 2011г. в **15.36 – 15.37** по токийскому времени основная волна цунами приблизилась на расстояние 1,5 км к площадке F-1.
- После прихода цунами и отключения охлаждения реактора уровень воды в АЗ стал снижаться.

<sup>53</sup> Код МААР позволяет провести анализ динамики поведения и оценить конечное состояние ядерного топлива при аварии на реакторе BWR.

- Через ~ три часа после аварийного останова (землетрясения) этот уровень достиг верха топливных сборок (ТАФ). Дальнейшее его понижение привело к резкому возрастанию температуры топлива. Появились признаки разрушения твэлов.
- Еще через ~ 4 часа 30мин после аварийного останова уровень воды в реакторе достиг низа топливных сборок (ВАН). Потеря охлаждения привела к началу образования кориума.
- Еще через ~ 20 минут уже вся центральная часть активной зоны была повреждена.
- **05:50** (12 марта). На блоке удалось возобновить подачу несолёной воды в реактор, но уровень ее стабилизировался на 4м ниже ВАН. Поэтому вода не предотвратила процессов разрушения АЗ.
- **06:00** (12 марта). Неповреждённых твэлов в зоне не осталось. В нижней ее части скапливался кориум, который проплавил корпус реактора.
- **06:50** (12 марта). Практически все топливо стекло вниз на бетонное основание контейнмента (рис.111).

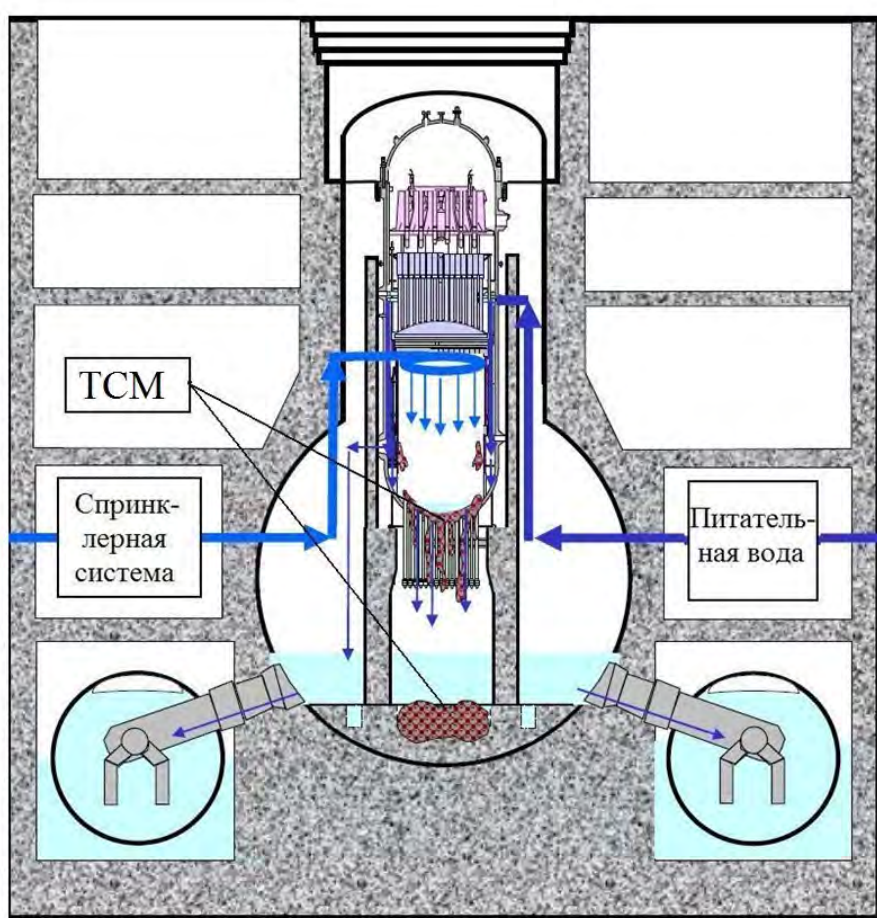


Рис. 111. Расположение расплава топливосодержащих материалов в реакторе 1-го блока F-1, (согласно расчетам ТЕРСО).

Итак, основным выводом проведенных расчетов и оценок стал следующий

**В ходе аварии топливо в реакторе 1-го блока в составе расплава – кориума переместилось на днище корпуса реактора. А далее, с большой вероятностью, часть его, проплавила корпус и попала вниз в контейнмент.**

По некоторым оценкам ТСМ разрушили (прожгли) бетонное основание контейнмента на глубину около 70 см.

Что касается ситуации, сложившейся после аварии в корпусах реакторов на 2-ом и 3-ем блоке, то следовало надеяться, что она будет менее опасной, чем для 1-го блока (рис. 112, 113).

Это связано, прежде всего, с тем, что в последнем случае топливо начало нагреваться и плавиться практически сразу после прихода цунами, а для двух других блоков аварийным системам охлаждения удалось отодвинуть этот момент на десятки часов. За это время значительно упало его остаточное тепловыделение.

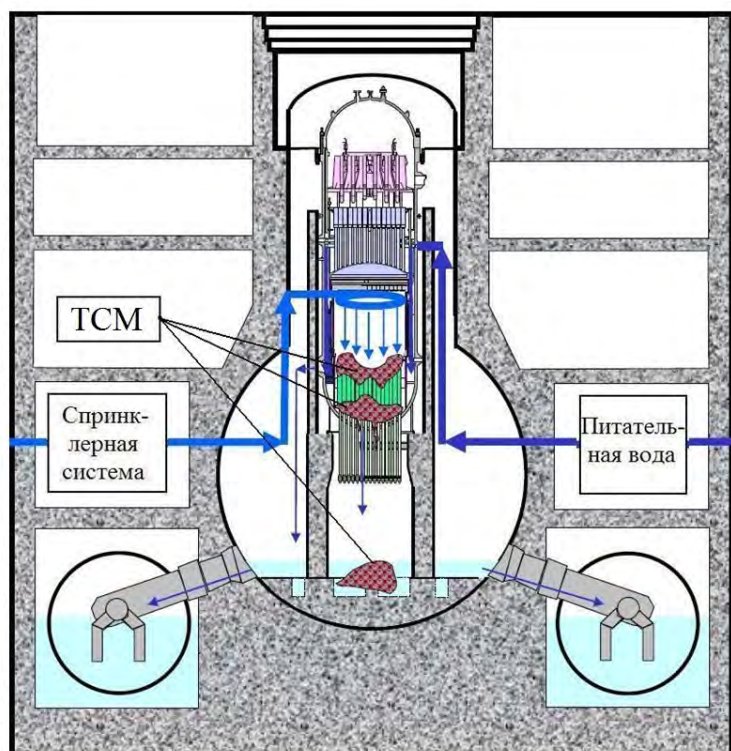


Рис. 112. Расположение топливосодержащих материалов в реакторе 2-го блока F-1 (согласно расчетам TEPCO).

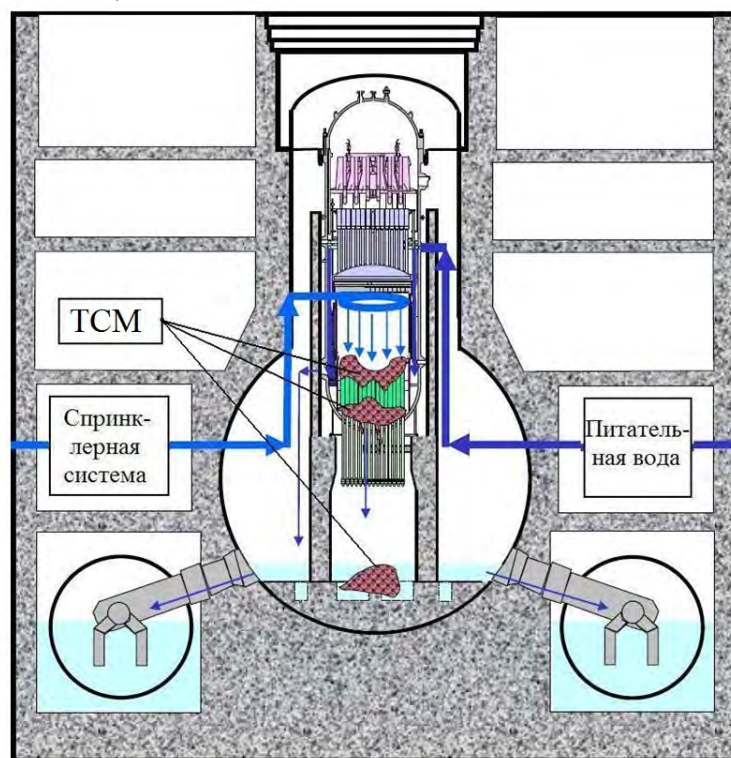


Рис. 113. Расположение топливосодержащих материалов в реакторе 3-го блока F-1 (согласно расчетам TEPCO).



В октябре 2012 года. Агентство по ядерной энергии (NEA)<sup>54</sup> приступило к осуществлению проекта «Benchmark Study of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant» - *«Сравнительное исследование аварии на атомной электростанции Фукусимы Daiichi» (BSAF).*

Проект объединяет экспертов различных институтов из восьми стран (в том числе ИБРАЭ – Росатом), использующих для проведения расчетов различные коды (подробнее см. [56]).

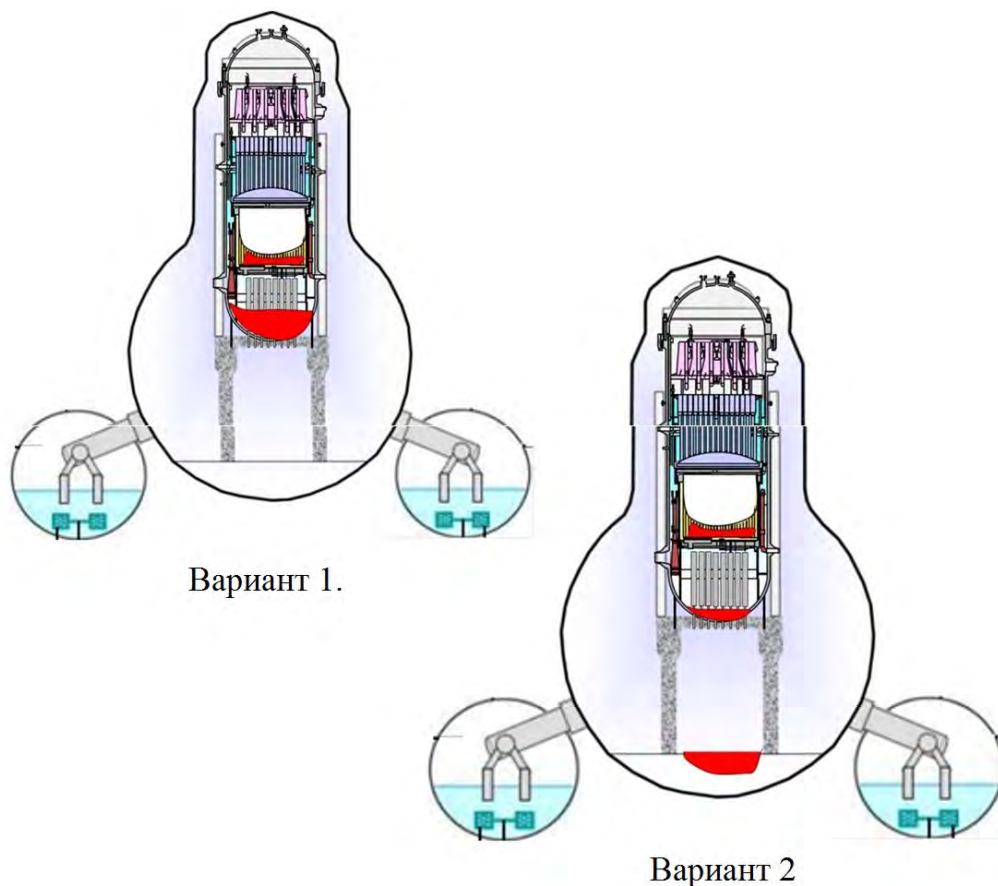
*Задача экспертов - углубление понимания явлений произошедших во время аварии на F-1 на основе единой базы исходных данных, а также совершенствование методов и кодов для моделирования тяжелых аварий.*

*Первый этап BSAF посвящен моделированию физических и химических явлений которые происходили на протяжении первых шести дней аварии (11 -16 марта) на блоках 1 - 3.*

В ходе работы каждой из экспертных групп были сделаны оценки времени наступления основных стадий аварийных процессов. Таких, как начало обезвоживание АЗ, начало генерации водорода, начало разрушения топлива и т. п.

Полученные результаты - время достижения уровня ТАФ, начало плавления АЗ находятся в согласии с расчетами ТЕРСО. В основных чертах совпадает и картина послеаварийного состояния ядерного топлива, для реактора 1-го блока. В том числе и существование значительной области в бетонном основании контейнмента, которое прожег кориум.

Если в отношении энергоблока 1 расчеты всех групп, участвовавших в проекте BSAF, указывают на разрушение корпуса реактора и выход расплава, то для энергоблоков 2 и 3 результаты разделились.



*Рис.114. Два варианта состояния топлива в 3-ем блоке после аварии, полученные при проведении расчетов (в зависимости от гипотез о поступлении питающей воды).*

<sup>54</sup> Специализированное агентство Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) со штаб-квартирой в Париже, Франция.

Это связано с использованием разных предположений о количестве воды, поступавшей в корпус реактора. К сожалению, полностью достоверные данные об эффективности залива отсутствовали, и каждый участник использовал собственные оценки для интенсивности подпитки реактора водой.

Часть экспертных групп пришла к выводу, что расплав остался в корпусе реакторов (см. рис. 114 вариант 1). Другая часть – что произошло разрушение корпуса, а расплав вышел в контейнмент (см. рис. 114 вариант 2).

Расчеты ИБРАЭ для 2-го блока показали, что выход расплава в контейнмент произошел в том случае, если, несмотря на подачу охлаждающей воды, лишь незначительная её часть поступала внутрь корпуса.

Это могло быть связано с использованием низконапорных насосов, потерей давления в длинной разветвлённой системе трубопроводов, относительно высоким давлением в реакторе (~0,9 МПа). Поэтому на 2-ом блоке также нельзя исключать частичного проплавления расплавом бетонного основания контейнмента

В рамках проекта BSAF проводились и оценки возможного состава образовавшегося кориума.

Этот состав важен для проведения будущих работ по его извлечению, в том числе для предупреждения возникновения критичности.

Работы по проекту продолжаются.

Если в расчетных работах оценки положения и состояния ТСМ были (на качественном уровне) получены уже в первые недели после аварии, то их экспериментальная проверка оказалась связанной с преодолением огромных трудностей и задерживается на годы.

Соответственно сдвигаются и сроки начала извлечения ТСМ из блоков.

В следующих разделах рассматриваются методы и средства, которые использовались для поиска топлива в реакторах.

## *2.6. ПЕРВЫЕ ПОПЫТКИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РОБОТОВ ВНУТРИ АВАРИЙНЫХ БЛОКОВ.*

Крайне сложная ситуация с использования дистанционной техники сложилась на аварийных блоках. Необходимость проведения в них тепловой и радиационной разведки, определения состояния строительных конструкций, мест скоплений воды и, **особенно, состояния ядерного топлива** натолкнулась на практически полное отсутствие необходимого оборудования.

Как с горечью писала газета Kyodo News: **«Прославленная индустрия робототехники Японии была не готова ответить на вызовы Фукусимы».**

В основе этого лежал человеческий фактор – глубокая уверенность японских специалистов в том, что на их атомных объектах большая авария невозможна (рис. 115).

И это, несмотря на то, что еще 30 сентября 1999 г. атомная отрасль Японии получила достаточно жестокое предупреждение.

В этот день на радиохимическом заводе японской компании JCO, которая занималась изготовлением топлива для АЭС, произошёл инцидент с возникновением самоподдерживающейся цепной ядерной реакции [Ф67].



*Рис. 115. Делегация Японии в Чернобыле. В заключительном слове, глава делегации отметил, что подобная авария на японских АЭС невозможна. Станции абсолютно надежны. Персонал имеет все необходимые инструкции и никогда не отступает от них.*

В результате этого инцидента сотрудник, получивший дозу 17 Зв, через короткое время погиб от лучевой болезни. Его коллега, получивший дозу в пределах от 6 до 10 Зв, скончался спустя 4 месяца. Всего же облучению подверглись около 700 человек, работники завода, пожарные, спасатели, а также местные жители.

Цепная реакция продолжалась с перерывами в течение примерно 20 час. При ликвидации последствий этого инцидента обнаружилось, что необходимых робототехнических механизмов, позволяющих предотвратить работу людей в радиационно-опасных условиях, в стране нет.

По горячим следам была принята государственная программа по созданию таких механизмов и к 2001г. сконструированы несколько их типов [Ф68]. Производителями роботов стали такие известные корпорации как «Hitachi», «Mitsubishi Heavy Industries» и «Toshiba».

Однако, в дальнейшем вместо проведения их испытаний и совершенствованию конструкции деятельность в этом направлении была прекращена.

В декабре 2002 года рабочая группа, в состав которой входили представители ТЕРСО, КЕРСО<sup>55</sup> и ряда правительственных организаций, постановила, что занятий для роботов на японских реакторах не найдётся.

***Еще раз утверждалось, что конструкция японских станций и квалификация их персонала практически исключает возможность серьезных ядерных и радиационных аварий.***

В результате, роботов для проведения разведки в разрушенных блоках у Японии не было и пришлось воспользоваться иностранной помощью (см., например, [Ф69]). Меньше, чем через неделю после аварии на F-1, американская компания iRobot выслала в Японию два аппарата PackBot 510 (рис.116) и два Warrior 710.

<sup>55</sup> Kansai Electric Power Co





Рис. 116. Робот 510 PackBot компании iRobot. Слева – робот в 1-ом блоке F-1.

Робот Packbot весит ~ 30 кг и создан специально для работы в опасных для человека условиях<sup>56</sup>.

Warrior существенно более тяжелый и громоздкий – весит 159 килограмм<sup>57</sup>.

После прохождения курса обучения и предварительных тренировок на 5-ом блоке<sup>58</sup>, сотрудники ТЕРСО 17 и 18 апреля с помощью двух роботов PackBot провели разведку на 1-ом и 3-ем аварийных блоках. Они осуществили видео съемку и выполнили измерения температуры, влажности, концентрации кислорода в воздухе и мощности дозы в ряде помещений машзалов и на первых этажах реакторных зданий<sup>59</sup>.

Максимальный измеренный уровень МЭД составил 49 мЗв/ч в I блоке и 57 мЗв/ч на III блоке. Позднее роботы вошли и в здание 2-го блока, но тут высокая влажность (более 90 %) воспрепятствовала обследованию (объективы камеры запотевали).

Благодаря аппаратам PackBot, специалисты ТЕРСО начали создавать схему маршрутов, на которой были отмечены возможные пути для передвижения в блоках разведывательных групп, во время которого они подвергались бы минимальному облучению.

В ходе работы обнаружились и существенные недостатки американской техники.

Сотрудники станции отмечали медленность движения и трудности передвижения роботов по многочисленным лестницам внутри зданий<sup>60</sup>, необходимость операторам работать вблизи блоков в сложных радиационных условиях и т. п.

## 2.7. 2011Г. РОБОТЫ QUINCE.

Претензии к работе к PackBot стали причиной того, что ТЕРСО после изучения имеющихся в стране возможностей обратилась с просьбой о помощи в Центр робототехники при

<sup>56</sup> В основном Он использовался военными в Афганистане и Ираке для тактической разведки. Робот питается от двух аккумуляторов, обеспечивающих ~ 4 часа работы. Управление им может осуществляться либо по оптоволоконному кабелю длиной около 300 м, либо по радио на расстояние до 600м в пределах прямой видимости. Стоимость обычной модели 510 PackBot составляла ~ \$120 тысяч.

<sup>57</sup> Из-за своих габаритов и веса он оказался полезен при очистке от радиоактивных загрязнений больших помещений. Рабочие установили на робот пылесос, при помощи которого собирали радиоактивную пыль, песок и мелкие обломки.

<sup>58</sup> При этом операторы роботов научились дистанционно открывать двойные двери между МЗ и зданием реактора.

<sup>59</sup> Так же, как и в Чернобыле, роботы могли работать парой. Один проводил измерения, другой использовался для наблюдения и контроля.

<sup>60</sup> Например, они так и не смогли подняться на верхние этажи зданий из-за крутого наклона лестниц..

Технологическом институте Чиба (Chiba Institute Of Technology) и Университет Тохоку (Tohoku University)<sup>61</sup>.

Создаваемый здесь аппарат носил название Quince, в переводе – Айва (рис. 117).

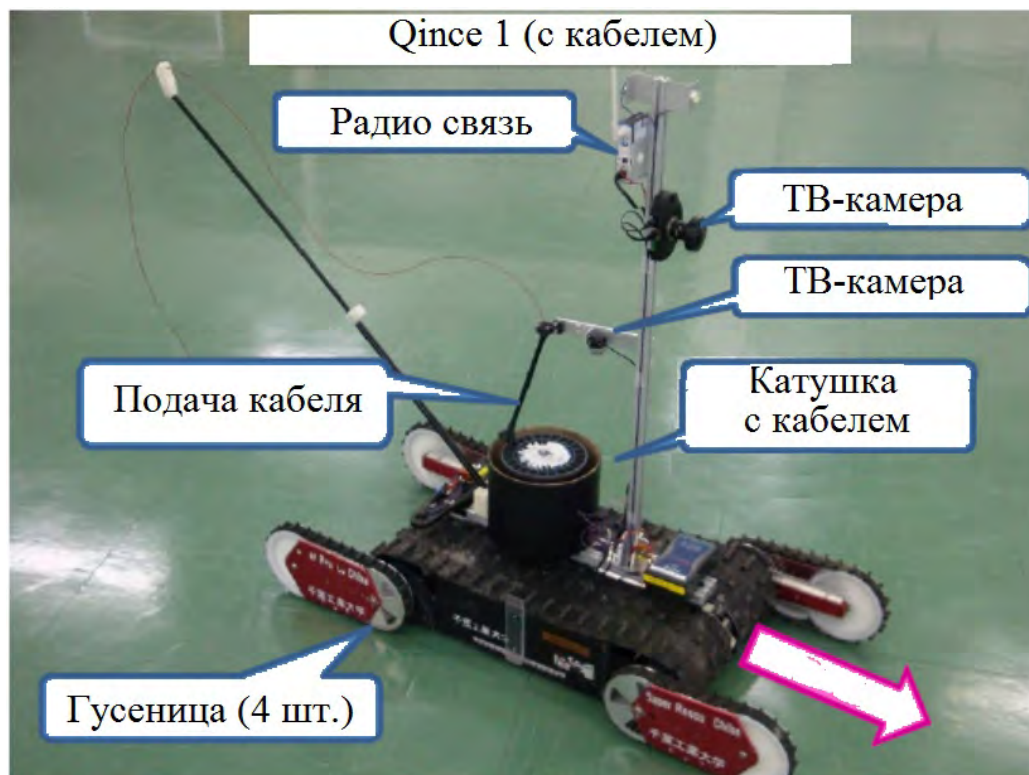


Рис. 117. Робот Quince 1.

Его проектирование началось еще в 1995 году после газовой атаки в Токийском метро. Предполагалось, что Quince может быть использован в случае ядерного, биологического или химического террористического акта, а также при ликвидации последствий стихийных бедствий.

Привлекательность робота состояла, прежде всего, в том, что он имел относительно небольшие размеры (длина - 66 см, ширина - 48 см), мог перемещаться в условиях завалов и с приемлемой скоростью преодолевал лестницы..

Прежде чем начать работу на F-1, в конструкцию робота необходимо было внести несколько существенных изменений и дополнений, а затем пройти ряд испытаний. В том числе проверку систем управления и возможности работы в условиях высоких полей радиации. После того, как все это было выполнено, операторы прошли еще курс обучения на 5-ом блоке.

До октября 2011 г. было проведено шесть сеансов работы Quince 1 внутри блоков станции. Первый раз робот вошел в реакторное отделение 2-го блока 24 июня 2011 г.

Цель работы - установка датчика уровня воды, накапливающейся в цокольном этаже при попытках охладить аварийный реактор. Важно было не допустить попадание этой высокоактивной воды в морской залив.

<sup>61</sup> Представитель компании ТЕРСО признал: «Возможности американских роботов ограничены. В здания придется войти людям».

Использовался один аппарат, управление роботом осуществлялась по кабелю.

**Первый сеанс** окончился неудачей – из-за неточных исходных данных о ширине лестниц. Размеры робота не позволили ему развернуться и попасть в нужное место. После нескольких попыток операторы отказались от установки датчика.

Общее время сеанса составило 95 мин, полное расстояние, пройденное Quince 1 во 2-ом блоке, приближалось к 200м, максимальное значение мощности дозы на этом пути достигала 65 мЗв/ч.

**Второй сеанс** был проведен 8 июля 2011 г. в здании реактора 2-го блока. Цель работы - измерение уровней МЭД на 1 - 3 этажах и взятие проб воздуха в помещениях (рис.118).

Преодолев целый ряд трудностей (проскальзывание на лестничных ступенях, перегрев двигателя и т. п.) робот, в целом, выполнил задание.

Общее время сеанса составило 193 мин, полное расстояние, пройденное Quince 1 во 2-ом блоке, 230м, максимальное значение мощности дозы на этом пути достигала 50 мЗв/ч, на втором этаже..

**Третий сеанс** был проведен 26 июля 2011 г. в здании реактора 3-го блока. Цель работы - осмотр трубопровода основной системы распыления и измерение уровней МЭД в ряде помещений.

В результате этого сеанса робот принёс хорошее известие - блок труб выглядит неповреждённым (рис. 119). В результате сотрудникам станции удалось, закачав воду в этот блок через крышу здания и впервые опустить температуру внутри реактора ниже 100<sup>0</sup>С.

Работа была выполнена, но в дальнейшем аппарат столкнулся с рядом препятствий (в частности груды обломков), преодоление которых потребовало значительных усилий. Общее время сеанса составило 105 мин, полное расстояние, пройденное Quince 1 в 3-ем блоке - 130м, максимальное значение мощности дозы на этом пути достигала 54 мЗв/ч.

**Четвертый и пятый сеансы** – проводились 22 и 24 сентября 2011 г.

Цель сеансов – осмотр первого этажа реакторных отделений блоков 2 и 3. Выполнялось это в рамках подготовки исследования корпуса реактора с использованием эндоскопа. Это было выполнено без серьезных проблем. Время пребывания в каждом из блоков составило около 80 и 90 мин. соответственно, а пройденные дистанции - 100м и 160м.

**Шестой сеанс**, проведенный 20 октября 2011 г. в здании 2-го блока, **оказался последним.**

Робот должен был исследовать разрушения на третьем этаже и осмотреть БВ на пятом.

Возвращаясь он, по видимому, зацепился своим тонким кабелем за трубопровод на 3 этаже и застрял. После неудачных попыток освободить механизм связь с роботом была потеряна.

**Таким образом, аппарат, разработка которого оценивалась в 6 миллионов долларов, провел всего 6 (точнее 5) достаточно коротких сеансов внутри аварийных блоков F-1..**

В ряде публикаций высказывалось мнение, что не только кабель послужил причиной нарушений в работе. Отмечалось, что и раньше, при попадании в поля радиации электроника системы управления начинала работать со сбоями, а это становилось причиной «неуклюжих» движений робота и повреждений соединительного кабеля [Ф70].



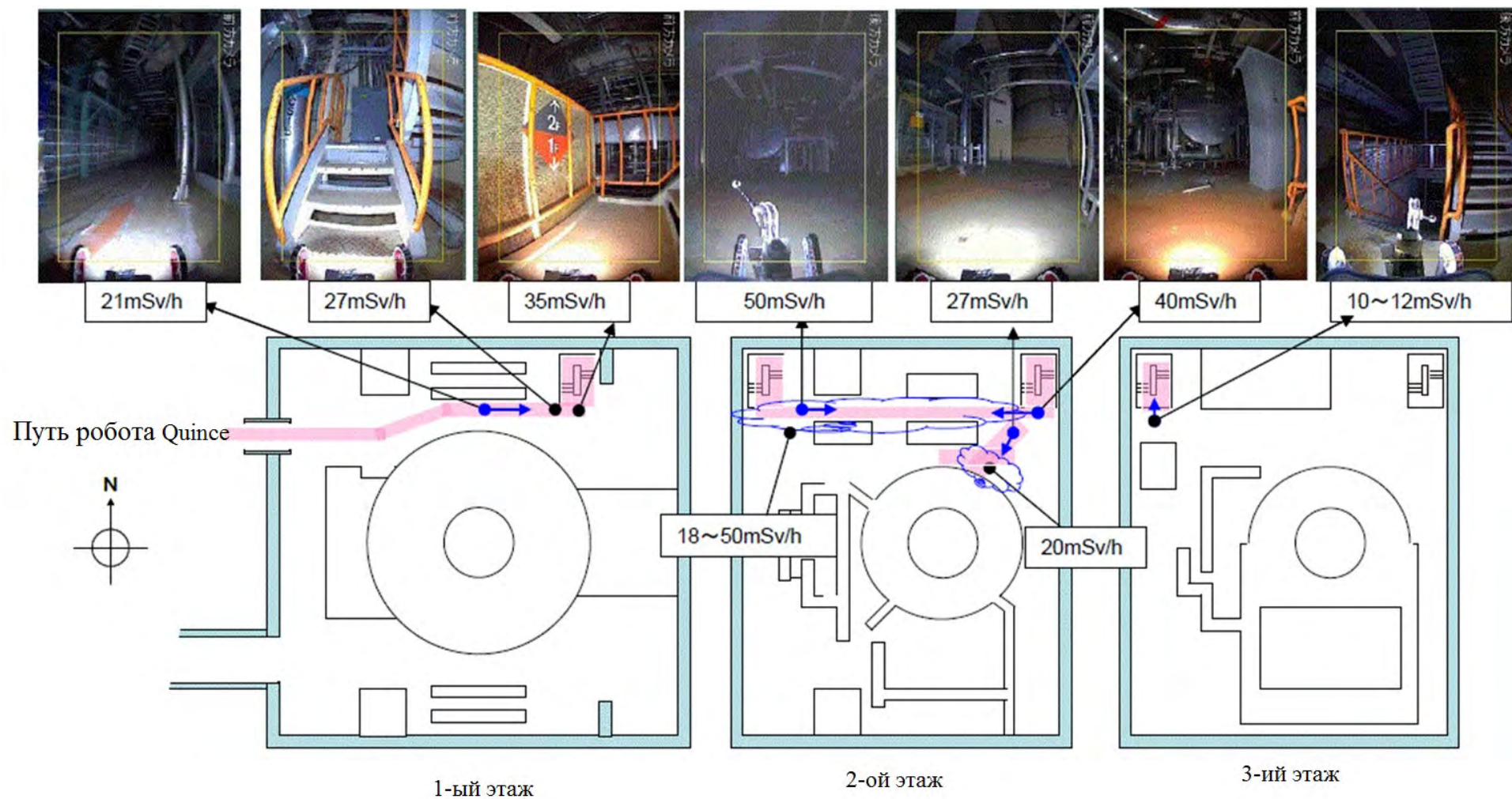


Рис. 118. Путь робота Quince 1 по реакторному отделению 2-го блока F-1. (8 июля 2011г., TEPCO)..



Рис. 119. Фото, сделанные Quince 1 во время 3-го сеанса. Слева – снимок трубопровода системы охлаждения. Справа – куча обломков, блокирующая лестницу на 3-ий этаж.

После потери **Quince 1** конструкторы из Chiba Institute спешно приступила к созданию его модификаций - **Quince 2** и **Quince 3** [Ф71]. Достаточно дорогих аппаратов (\$15 и \$20 миллионов соответственно), максимально приспособленных для работы в помещениях блоков F-1<sup>62</sup>.

С помощью **Quince 2** в июне 2012г. удалось установить место «гибели» **Quince 1** (рис. 120). Хронология использования роботов для исследований внутри аварийных блоков F-1 говорит о том, что и в 2012г. здесь подавляющую роль играли **Quince 2**, **PackBot** и **Quince 3**. К сожалению, проникнуть с их помощью в помещения блоков, в которых, согласно результатам расчетов, находились TCM, не представлялось возможным.

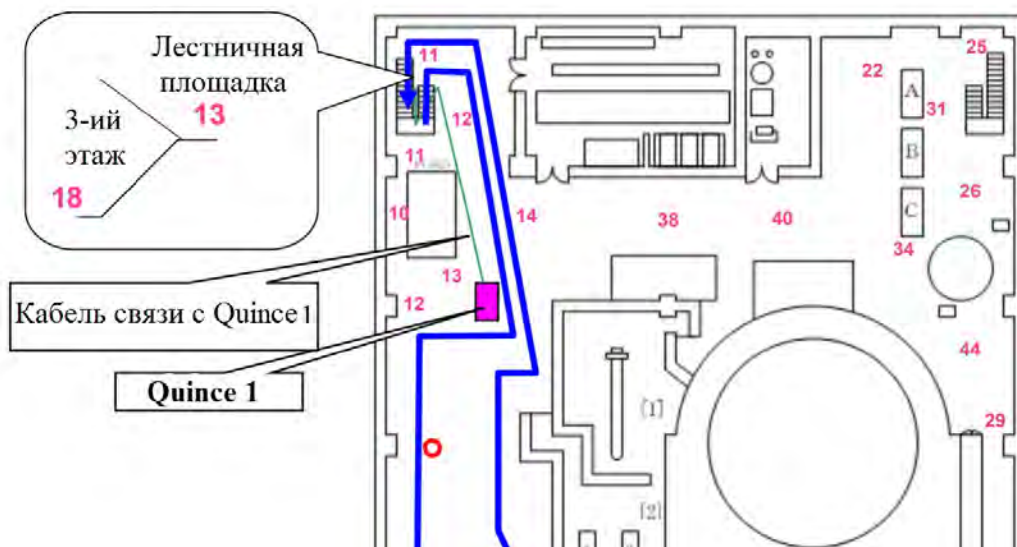


Рис. 120. Местоположение робота **Quince 1** на 3 этаже 2-го блока. Красными цифрами отмечены измеренные **Quince 2** величины МЭД (мЗв/час).

<sup>62</sup> Впервые **Quince 2** приступил к работе на 2-ом блоке в феврале 2012 года, а **Quince 3** на 1-ом блоке, в июле.

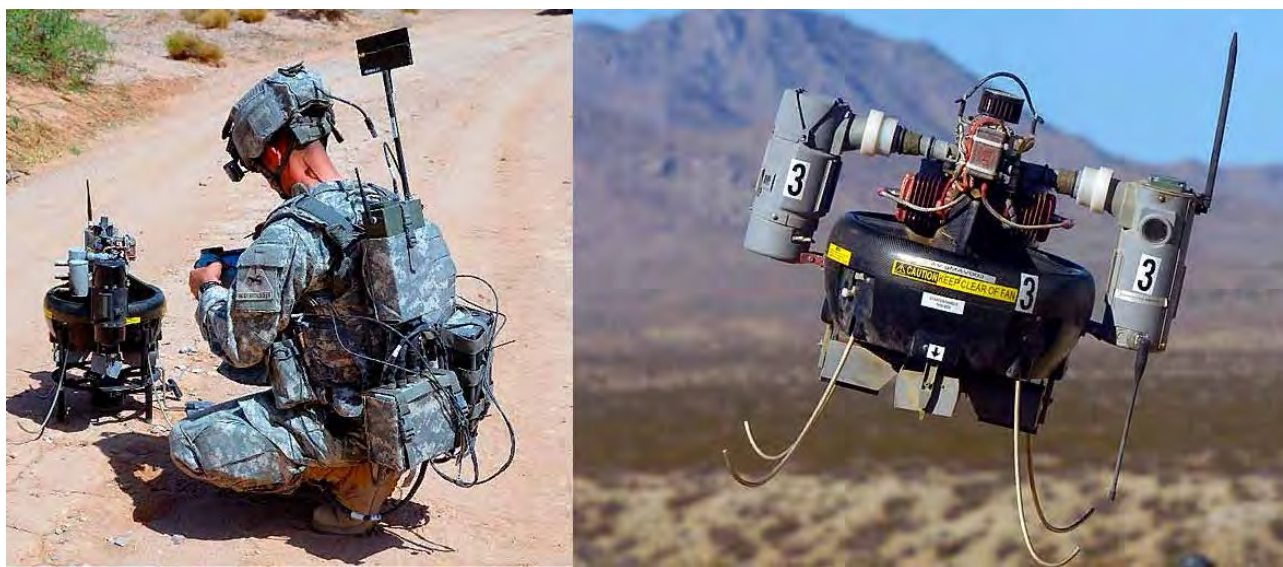


## *2.8. 2011г. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА РАЗРУШЕННЫМИ БЛОКАМИ.*

**Кроме разведки, ведущейся с земли, сотрудники ТЕРСО привлекли к внешнему наблюдению за аварийными блоками беспилотные летательные аппараты - БЛА.** Разрушенные кровли и стены зданий позволяли осмотреть ряд внутренних помещений.

Первая серия снимков АЭС «Фукусима-1» была сделана 20 и 24 марта 2011 года (через 9 и 13 дней после аварии соответственно) с помощью сверхлегкого дистанционно управляемого БЛА компании Air Photo Service.

**В дальнейшем использовались** американские военные беспилотники T-Hawk<sup>63</sup> (рис. 121). В Японию было поставлено четыре таких аппарата. Все четыре БЛА были оснащены аппаратурой для съемок и измерения уровня радиации.



***Рис.121. Американский БЛА T-Hawk фирмы Honeywell.***

**T-Hawk начали постоянные полеты над F-1 в апреле 2011г.**<sup>64</sup>

С их помощью был проведен тщательный осмотр реакторных зданий 1, 3 и 4 блоков. Были сделаны фотографии и видео внешнего вида зданий, их площадок и ряда внутренних помещений. Так на снимках 4-го блока, сделанных с высоким разрешением, можно увидеть часть охлаждающего контура реактора и фрагмент БВ (см., например, рис 122).

24 июня один из аппаратов, пролетая над зданием второго блока, потерял управление и упал на крышу. Инцидент назвали «вынужденной посадкой». ТЕРСО сообщила, что дыма или огня при падении замечено не было.

Снять БЛА и выяснить причину падения (возможно потеря управления в сильном поле радиации) не удалось.

На этом использование T- Hawk прервалось на несколько месяцев.

---

<sup>63</sup> Американские военные использовали эти беспилотники в Афганистане и Ираке.

БПЛА относится к классу микро летательных аппаратов. Он может зависать и двигаться в замкнутых помещениях, управляется по радиоканалу. Масса T-Hawk - 8,4 кг, продолжительность полета ~ 40 мин [Ф72].

<sup>64</sup> 14 и 15 апреля они провели первую съемку аварийных блоков с воздуха, позднее стали регистрировать и величину МЭД.



В дальнейшем беспилотные аппараты широко применялись при съемках общих видов станции, внешних изменениях, происходивших на блоках и отдельных участках территории F-1. Какой либо существенной информации о состоянии разрушенного топлива они дать не смогли.



Рис. 122. Разрушенный 4-ый блок (один из снимков, сделанных с помощью T- Hawk).

#### 2.9. 2012г. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВИДЕОЭНДОСКОПА [Ф73].

В течение 10 месяцев ТЕРСО, основываясь на расчетных оценках, могла лишь предполагать, что происходит внутри аварийных реакторов.

В самом начале 2012г. (19-го января) была сделана попытка получить необходимые данные при помощи оптоволоконной камеры – промышленного видеэндоскопа<sup>65</sup>. Эндоскоп диаметром 8,5 миллиметра ввели внутрь реактора через разлом в здании **второго блока**. Последний был выбран, потому, что уровни радиации внутри него оказались более низкими, чем в других блоках.

Первая попытка осмотра заняла чуть более часа. На полученных фотографиях видно часть ржавых стенок и труб внутри контейнмента. Изображения очень низкого качества – скорее всего из-за водяных паров. К тому же длина эндоскопа оказалась не достаточной, ТЕРСО пришлось дожидаться изготовления специализированного прибора с 20-метровым шлангом. С его помощью за два дня - 26 и 27 марта 2012г была, наконец, получена более существенная информация (см. рис 123 - 125).

В исследованиях участвовали 10 групп по 4 сотрудника каждая. Они вошли на первый этаж реактора с северо-западной стороны и смогли пробурить отверстие в контейнменте<sup>66</sup>, чтобы вставить эндоскоп. На конце прибора сначала был закреплен температурный датчик и видеокамера, способная поворачиваться на 360 градусов

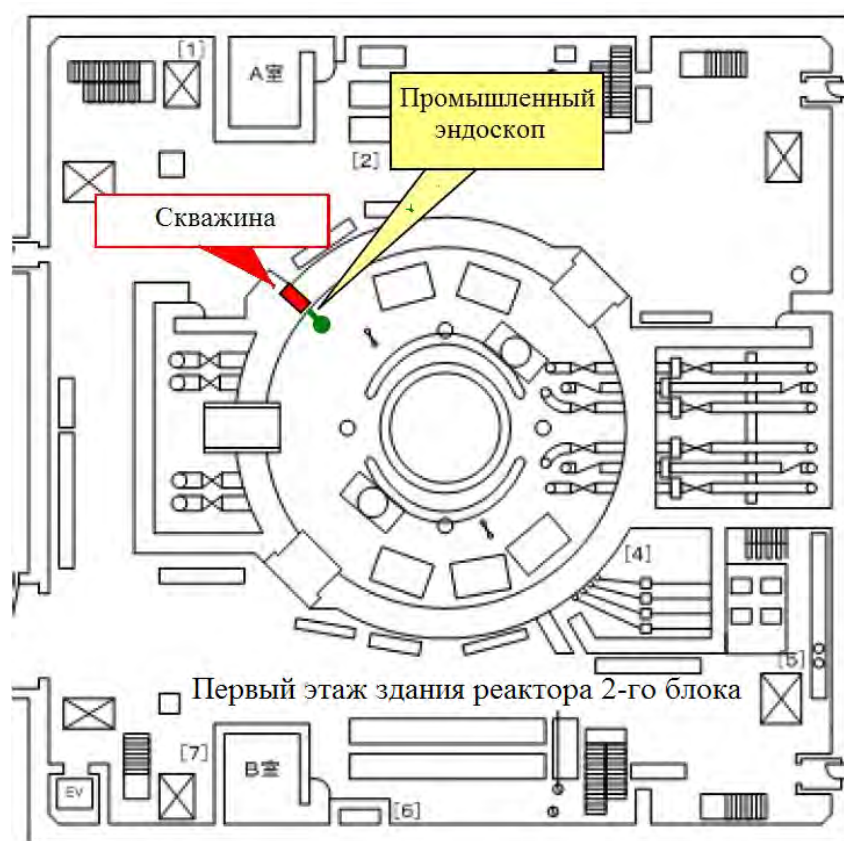


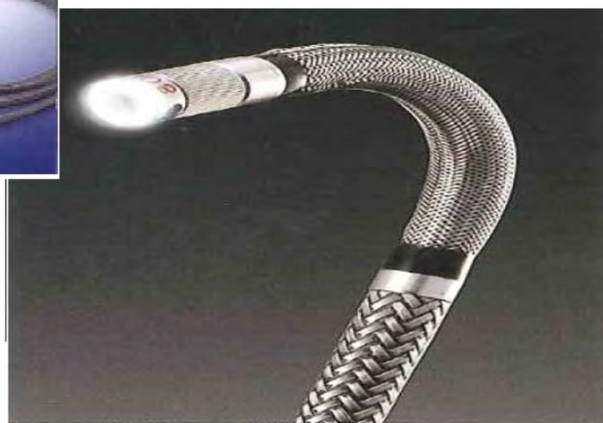
Рис. 123. Место расположения ввода эндоскопа во 2-ом блоке (на первом этаже здания реактора). Оно находилось на высоте ~7м от дна контейнмента.

<sup>65</sup> Видеозендоскоп – это устройство, которое используют для осмотра и визуального контроля труднодоступных мест и полостей. Он представляет из себя длинную гибкую трубку с объективом, осветителем и необходимыми датчиками на одном конце и пультом управления и экраном на другом.

<sup>66</sup> Предварительная репетиция бурения проводилась на 5-ом блоке.

Следует отметить, что как при этом проникновении в контейнмент, так и в дальнейшем, принимались все меры для исключения выхода из него радиоактивных газов и аэрозолей.





*Рис.124. Промышленный эндоскоп, выдерживающий большие радиационные поля, использовался для наблюдения внутри контейнмента 2-го блока.*



*Рис. 125. На 2-ом блоке. Подготовка эндоскопа к работе.*

27 марта удалось ввести внутрь контейнмента и дозиметр.

Видеозапись, полученная с помощью эндоскопа, показала, что уровень воды в этом месте существенно ниже ожидаемого — всего около 60 см ото дна. Сама вода чистая, но содержит темно-желтый осадок, скорее всего, фрагменты ржавчины, краски и пыли. Температура воды колеблется в пределах  $(48 \div 50) ^\circ\text{C}$ .

Величины мощностей дозы, измеренные в контейнменте, приведены на рис. 126.



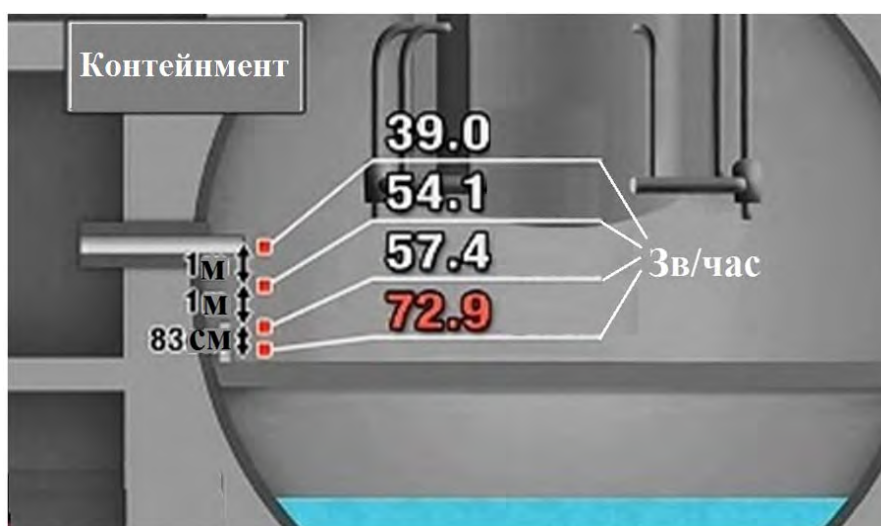


Рис. 126. Величины мощности дозы (Зв/час) в контейнменте 2-го блока.

Большие значения МЭД правели к тому, что время работы эндоскопа оказалось сильно ограниченным<sup>67</sup>.

На основании полученных данных в ТЕРСО пришли к выводу, что *хотя прямых признаков кориума, который мог бы проплавить корпус реактора и попасть на дно контейнмента, обнаружено не было, очень большие значения доз в контейнменте свидетельствуют в пользу этой гипотезы.*

Низкий уровень воды может означать разгерметизацию контейнмента, что важно для ряда предлагаемых методов извлечения топлива (см. далее).

Исследования, в которых использовались эндоскопы, дозиметры, термометры, вводимые через скважины в защитном кожухе в контейнмент, выполнялись позднее и на других блоках (см. ниже). Все они, правда, косвенным образом, подтверждали выводы расчетов.

*На разгерметизацию корпусов аварийных реакторов указывала и загрязненная радиоактивностью вода, вытекающая из их зданий.*

## 2.10. 2015г. БЛОК 1. ПОПЫТКИ ИСПОЛЬЗОВАТЬ РОБОТОВ «ЗМЕЯ».

*Должно было пройти 4 года, прежде чем весной 2015г. на F-1 попытались использовать робота для получения непосредственной информации о кориуме, который проник на дно контейнмента 1-го блока [Ф74, Ф75].*

Аппарат этот разрабатывался в Международном научно-исследовательском институте ядерных объектов (IRID) совместно с Hitachi и его дочерней компанией Hitachi—GE Nuclear Energy. Он предназначался для проникновения внутрь реактора с целью проведения визуальной, тепловой и дозиметрической разведки в больших радиационных полях<sup>68</sup>.

Робот мог трансформироваться, поскольку состоял из трех частей: основного корпуса и двух боковых блоков, передвигающихся на гусеницах. Размеры аппарата – длина около 60см, а эффективный диаметр - 9.5 см позволяли ему проходить через трубы. За внешний вид и способность изменять свою форму робот получил название - «Змея» (рис. 127).

<sup>67</sup> Специалисты ТЕРСО оценивали это время как 10 – 15 часов.

<sup>68</sup> Робот оснащен термометром, видеокамерой, дозиметром и лазерным сканером для измерения расстояния.



Рис. 127. Робот «Змея» в развернутом виде.

Управление «Змеей» осуществлялось дистанционным образом по кабелю длиной в 40м. Через туннель (трубу) X-100В робот должен был проникнуть в конфайнмент. Затем предполагалось, что используя кабель, его можно будет опустить на решетку постамент (рис. 128), находящуюся выше уровня воды. На ней аппарат трансформировался - принял бы форму буквы «П» (с телекамерой в середине и гусеницами по бокам), начал двигаться и изучать обстановку (рис. 128 - 130). Для F-1 было изготовлено два одинаковых робота.

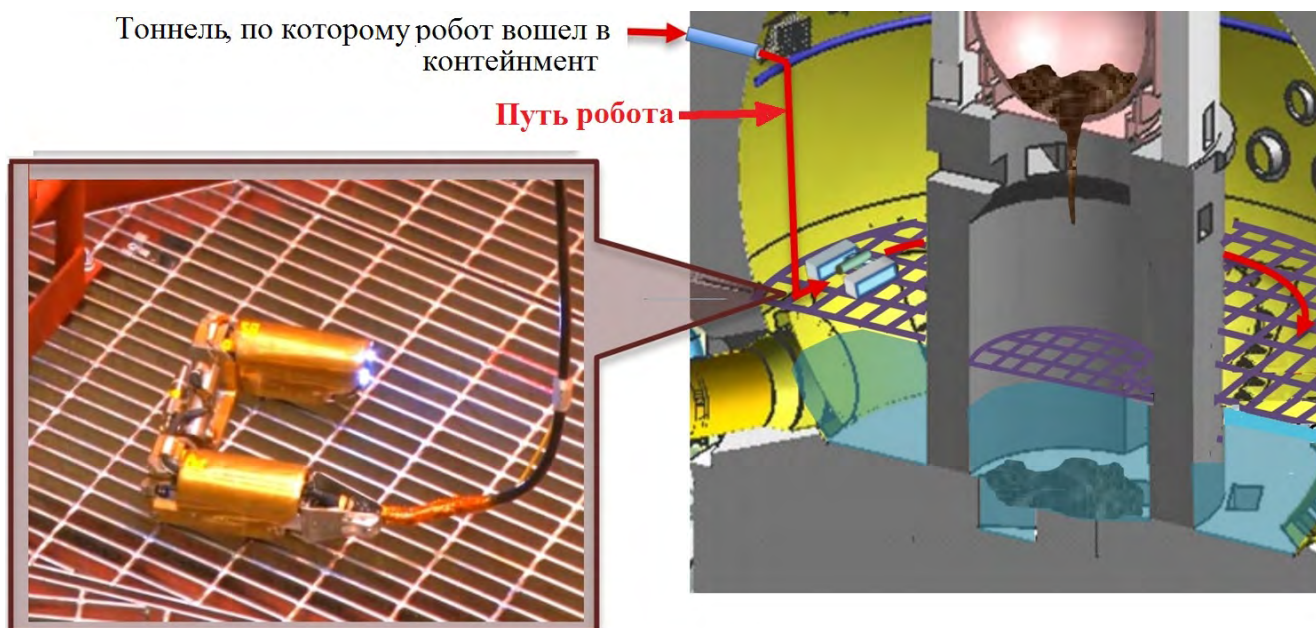


Рис. 128. Планируемый путь робота «Змея» внутри конфайнмента..



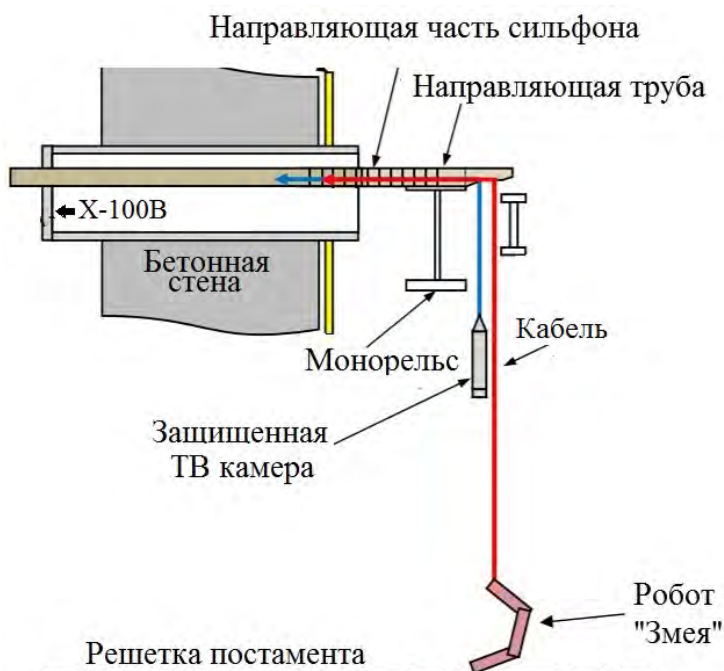


Рис.129. Схема входа робота «Змея» в контеймент через тоннель X-100В и опускания его на решетку постаumenta.

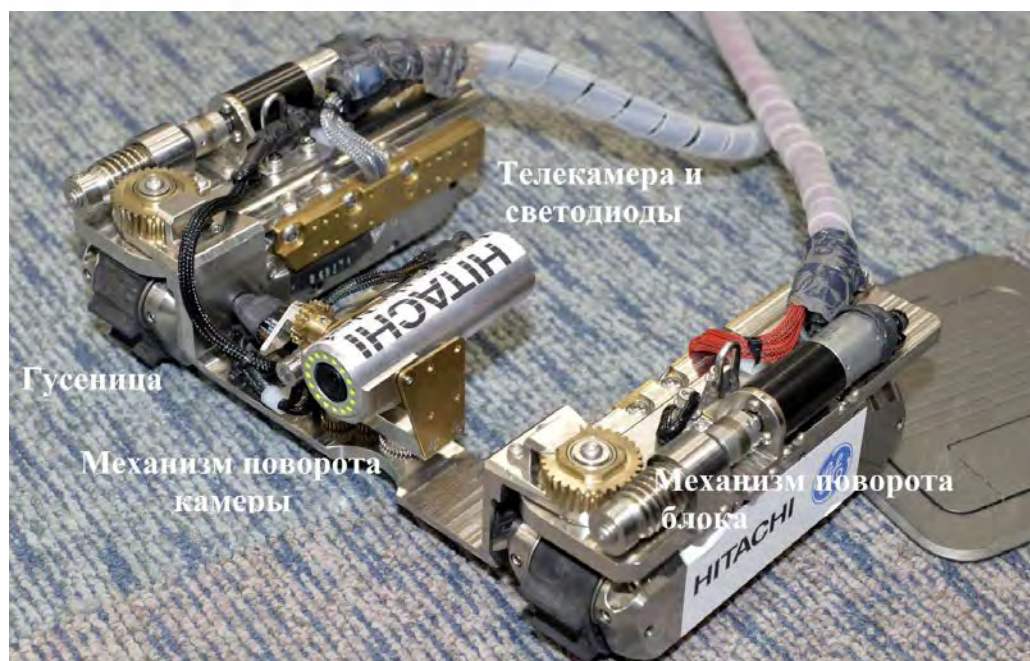


Рис. 130. Робот «Змея» (со снятой крышкой). Аппарат трансформировался и принял форму буквы «П» (демонстрационный режим).

Кроме получения видеоинформации, данных о температуре и величине МЭД «Змее» было необходимо определить, в каком месте можно проникнуть на дно конфейнмента. Предполагалось использовать эти данные, чтобы с помощью специального зонда или робота-амфибии обнаружить там кориум под слоем воды.

10 апреля 2015г. первый робот был опущен через тоннель на решетку. Здесь он принял «П»-образную форму и начал проводить разведку. Через 5 часов, после выполнения примерно 80% запланированной работы, аппарат столкнулся с завалом и был вынужден двинуться в обход него. Спустя еще короткое время робот перестал отвечать на посылаемые команды, В ТЕРСО предполагают, что он застрял в решетке и уже не может выбраться самостоятельно (рис. 131).



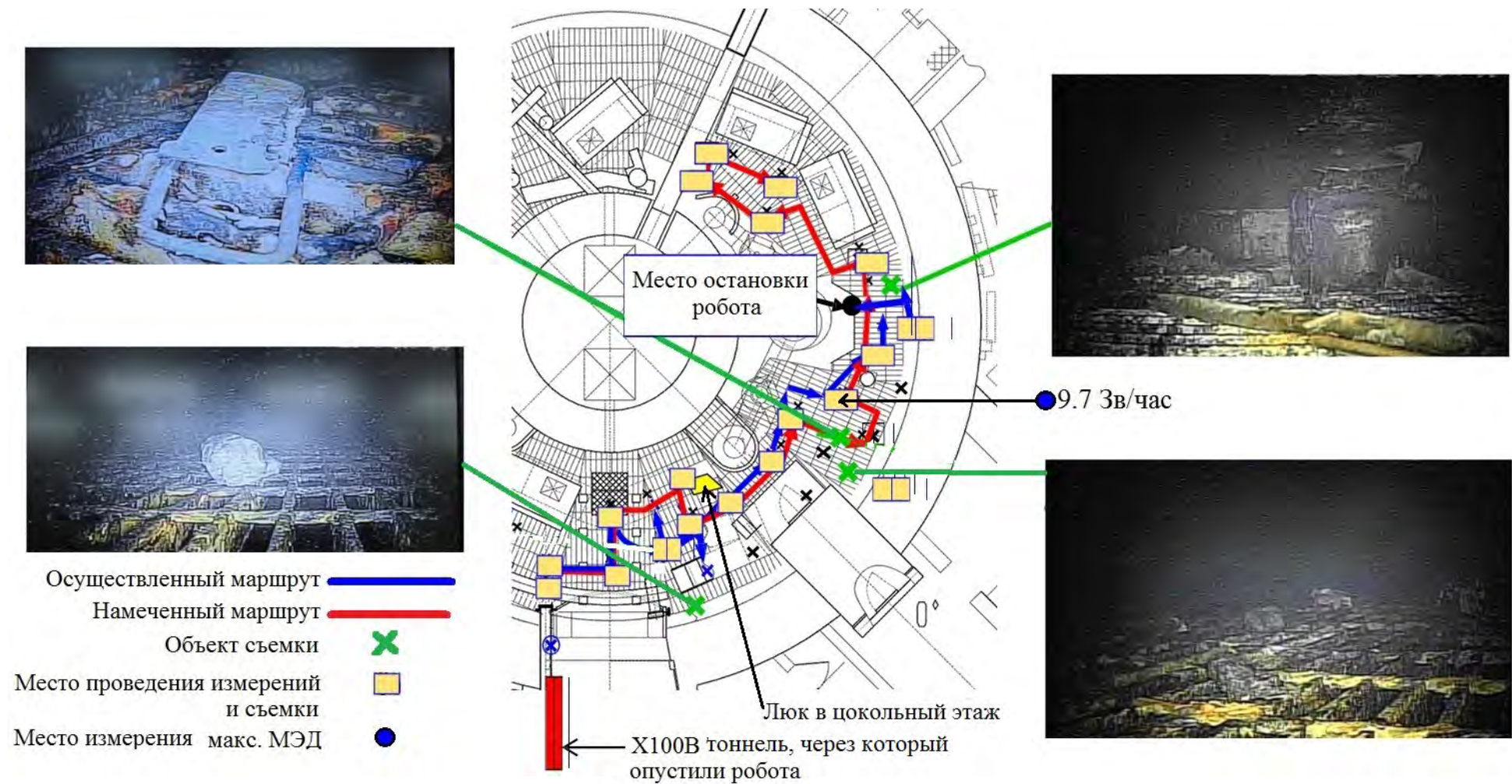


Рис. 131. Намеченный (и частично осуществленный) маршрут движения робота «Змея» по решетке постаментов в контейнменте 1-го блока 10 апреля 2015г. Из 18 намеченных мест проведения измерений и видеосъемки робот использовал 14.

Позднее представитель ТЕРСО сообщил, что компания не собирается вытаскивать застрявшего робота. Операторы перерезали ведущий к нему кабель и извлекли этот кабель из тоннеля.

Благодаря полученным в этом сеансе данным удалось установить, что температура между защитной оболочкой и корпусом реактора  $\sim 20^{\circ}\text{C}$ , а мощность дозы достигает 9,7 Зв/ч.

На переданных роботом кадрах видны стены и пол помещения (рис. 37), пар от воды, поступающей для охлаждения реактора.

Еще одним значимым результатом стало обнаружение люка, с помощью которого в дальнейшем можно будет проникнуть в подземный (цокольный) этаж и обследовать его на предмет обнаружения там кориума (рис. 131). По утверждению ТЕРСО, робот определил, что «нет никаких препятствий возле входа, который ведет на дно контейнента».

**Второй робот** через несколько дней провёл обследование второй части первого этажа решетки постаменты, двигаясь по маршруту по часовой стрелке. На его пути температура составляла 18 -  $20^{\circ}\text{C}$ , а значения МЭД от 4.7 до 8.3 Зв/час.

Его также было решено не извлекать. Объяснения такого решения в литературе разнятся. Так разработчиками утверждается, что аппарат мог застрять в проходе и преградит путь будущим запускам. В других работах говорится о трудности его дезактивации. Наконец, в ряде обзоров утверждается, что высокая доза облучения вывела робот из строя.

#### *2.11. 2012 – 2017гг. БЛОК 2. РОБОТ «СКОРПИОН».*

После неожиданно скромных результатов, полученных при использовании роботов «Змея», надежды специалистов ТЕРСО обнаружить и начать исследовать попавший на дно контейнента кориум сосредоточились на работе, названном «Скорпион» [Ф76].



**Рис. 132.** Сотрудник ТЕРСО наблюдает за испытанием «Скорпиона». 30 июня 2015 г.



Разработчики «Скорпиона» - корпорация Toshiba и IRID, заявили, что «... цель его создания состоит в том, чтобы сделать еще один шаг к началу удаления застывшего расплава топлива»

Робот получил свое имя, поскольку, выйдя в свободное помещение (после движения по узким проходам) он может поднимать заднюю секцию. Там расположена ТВ камера и светодиодный фонарь. Ещё одна камера и фонарь находятся в носовой секции устройства (рис. 132).

Вес «Скорпиона», который перемещается с помощью гусениц, составляет 5 килограммов. Длина, в развёрнутом состоянии, 54см.

Он оборудован термометром и дозиметром.

Действиями робота по кабелю управляют два оператора. Один из них отвечает за движение аппарата, управляя им с помощью джойстика, второй контролирует получаемую в процессе работы информацию (рис. 133).



***Рис. 133. Операторы робота «Скорпион» проходят обучение.***

«Скорпион» разрабатывался для работы в условиях повышенной радиации. Специалисты ожидали, что он сможет выполнять поисковую операцию до того, как полученная доза достигнет 1000 Зв.

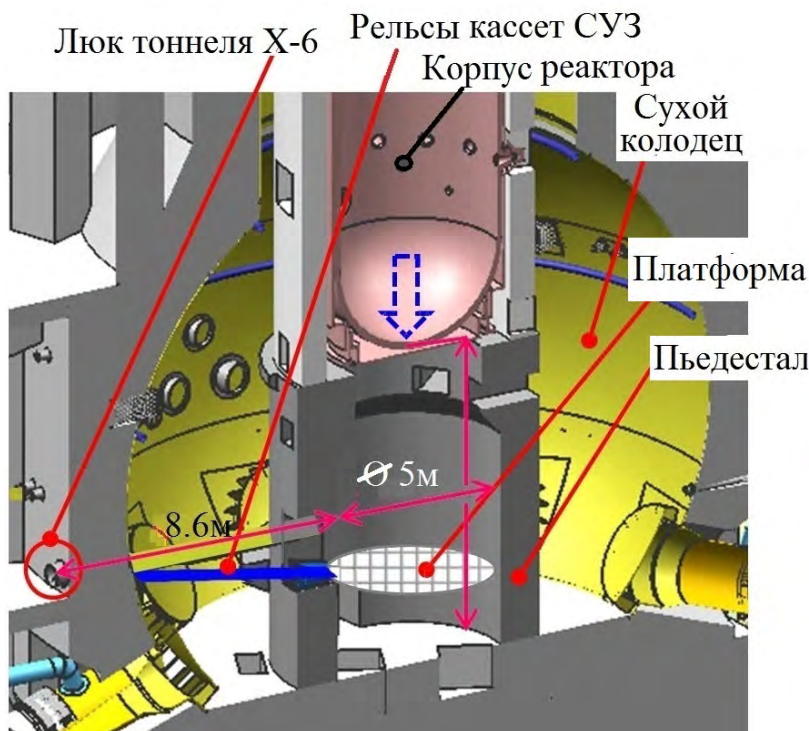
Предусматривалось также, что на F-1, операторы будут надежно защищены от радиации ***Робот удачно прошел испытания. Предполагалось, что в июле (потом срок перенесли на август) он сможет начать работу на втором блоке АЭС. Весной и летом 2015г. в десятках публикаций описывались будущие подвиги «Скорпиона».***

В контеймент он мог попасть через люк, ведущий в тоннель Х-6<sup>69</sup>. А затем, используя рельсы для транспортировки кассет СУЗ, спуститься на платформу, где провести измерения МЭД и фотографирование (рис. 134). Выбранный путь мог бы значительно облегчить передвижение робота внутри контеймента.

---

<sup>69</sup> От него внутри контеймента проложены к рабочей площадке направляющие рельсы для кассет СУЗ шириной 60см и длиной 7.2м.





Вход в тоннель X-6. Снимок сделан на 5-ом блоке F-1

Рис. 134. Схема проникновения «Скорпиона» в контейнмент 2-го блока.

Как показало обследование, предварительно проведенное более простым роботом, МЭД вблизи люка превышает 13В/час (рис. 135). Это полностью исключало пребывание там людей.

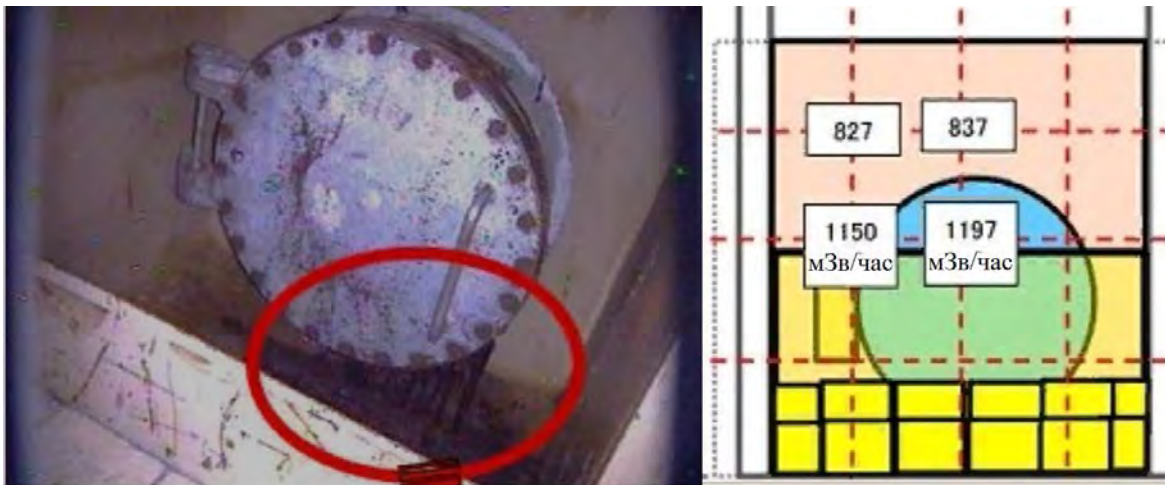


Рис. 135. Слева – фото люка в тоннель X-6. Справа – предварительно измеренные величины МЭД у закрытого люка.

Наступил август, но никакой информации о работе «Скорпиона» в реакторе 2-го блока не появилось. Еще через месяц в ТЕРСО сообщили, что при осуществлении планов возникли технические трудности<sup>70</sup>. После этого в течение продолжительного времени шли подготовительные работы.

<sup>70</sup> Предварительное обследование показало, что уложенные перед тоннелем X-6 защитные блоки мешают роботу войти внутрь. В октябре ТЕРСО убрала эти блоки вместе с пластинами из листовой стали с помощью

В ходе этих работ было принято решение не открывать люк тоннеля для входа робота, а пробурить в нем отверстие. Для установки станка и проведения бурения необходимо было хотя бы кратковременное присутствие людей. Это, в свою очередь, привело к необходимости провести перед люком целый комплекс дезактивационных работ.

В результате дата предполагаемого осмотра сдвинулась на конец января 2017 [Ф78].

В ходе работ (выполненных, в основном, с помощью дистанционно-управляемых механизмов) пол залили слоем цемента и закрыли стальными листами. Наконец, в толстой стальной крышке люка сделали отверстие диаметром 11,5 см.

26 и 30 января 2017г. для **проведения предварительной разведки** в это отверстие ввели робот-зонд, телескопическую трубу с телекамерой на конце.

Эти осмотры дали интересные результаты (см., например, [Ф79]).

Так 30 января удалось получить изображение части платформы, которая находится непосредственно под реактором. Съемка показала, что металл опорной решетки оплавлен и деформировался, а его поверхность покрывают черно-коричневые наслоения (рис. 136). Эксперты предположили, что это может быть слой **застывшего кориума (ТСМ)**<sup>71</sup>, часть которого через прожег в нижней части корпуса реактора, вытекла наружу и пройдя через решетку попала на основание пьедестала. В одном месте опорной решетки образовался целый провал - отверстие площадью приблизительно  $(1 \times 1) \text{ м}^2$  (рис. 137)<sup>72</sup>.

**Если предположения экспертов были справедливы, то это означало, что с помощью зонда впервые были обнаружены следы кориума**



Рис. 136. Изображение, полученное внутри контейнмента 2-го блока роботом – зондом (после обработки). См. [Ф80].

К сожалению, зонд не был оснащен дозиметром. Мощность дозы пришлось устанавливать по косвенным данным – уровню радиационных помех на переданных видеокамерой изображениях.

Специалисты ТЕРСО назвали цифры для трех районов.

1. Около мостков с рельсами: около 30 Зв / час.

---

манипулятора на гусеничном ходу. Но тут обозначилась следующие проблемы - прежде всего, высокий уровень радиации и трудности с открытием крышки тоннеля (см., например,[Ф77]).

<sup>71</sup> «Топливного мусора», по терминологии ТЕРСО.

<sup>72</sup> Отверстие находится около привода регулирующих стержней СУЗ, недалеко от середины цоколя.



2. Вне пьедестала: около **530 Зв / час (!)**. Это огромное значение (полученное, как уже говорилось, из оценки частоты помех на экране видеокамеры), примерно на порядок большее, чем МЭД у поверхности черновобильских лав, вызвало оживленное обсуждение и недоверие у специалистов (см. ниже).
3. Внутри пьедестала: около 20 Зв / час.



Рис. 137. Провал от упавшей части опорной решетке обнаруженный 30.01.17.

Следующая операция по расчистке рельса и подготовке движения «Скорпиона» была проведена 9 февраля. В ходе её выполнения предполагалось смыть с рельса слой из оплавившихся остатков краски, кабелей и т. п., Высота слоя составляла ~ 2 см и покрывал он участок рельса длиной ~ 5м. Работа выполнялась водометом, установленным на специальном роботе. Когда робот очистил около 2м пути (при этом аппарат двигался все медленнее), высокая радиация практически вывела из строя его видеокамеру. Пришлось вручную, за фал, вытянуть робота из реактора. Остальную часть наслоения смыть не удалось. Оценка помех на изображении, полученном в ходе операции по очистке рельса, позволила восстановить максимальное значение МЭД на его поверхности. Цифра, озвученная ТЕРСО, опять оказалась необыкновенно большой - **650 Зв/час (!)**.

16 февраля в тоннель Х-6, наконец, вошел «Скорпион».

За многие месяцы подготовки к проникновению в контейнмент 2-го блока он подвергся ряду переделок и выглядел так, как показано на рис. 138..

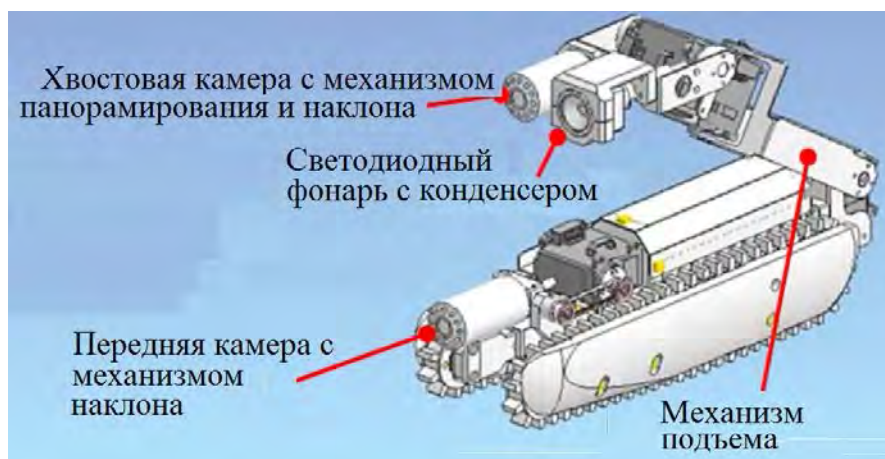


Рис.138. Модернизированный «Скорпион» (2017г.).



Робот прошел небольшое расстояние и остановился - не смог преодолеть оставшееся наслоение на рельсе. В результате видимая им область внутри контейнмента оказалась крайне ограниченной.

При попытке вернуть «Скорпион» назад оказалось, что у аппарата не работает левая гусеница.. Добраться до площадки под реактором и обследовать наслоения и обломки, возможно содержащие ядерное топливо «Скорпиону» так и не удалось. Задание он не выполнил.

Специалисты, управлявшие роботом, сначала пытались достать его, однако в итоге отказались от этого и решили оставить аппарат внутри реактора, перерезав идущий к нему кабель,

Согласно оценкам, к этому моменту затраты на реализацию проекта «Скорпион» уже превысили 10 миллионов долларов.

Следует добавить, что правильность процедуры восстановления значений МЭД по уровню радиационных помех на экране видеокамеры подробно обсуждалась в работе специалистов ТЕРСО, опубликованной в июле 2017г.[Ф81]. Они пришли к выводу (довольно очевидному), что полученные значения (530 и 650 Зв/час) ошибочны - во много раз завышены.

## 2.12. МАРТ 2017ГГ. БЛОК 1.РОБОТ «PMORTH<sup>73</sup>» (СМ. [Ф82]).

Змееобразный робот, способный трансформироваться после прохождения по узкому каналу (трубе) и двигаться по решетке в контейнменте (см. раздел 2.10), вновь приступил к работе, теперь уже на 1-ом блоке F-1. За это время он претерпел модернизацию, в которой участвовали создатели робота - Hitachi-GE Nuclear Energy и IRID и получил новое название - «PMORPH ». Главным усовершенствованием аппарата стал зонд, который мог опускаться на кабеле через решетку платформы, по которой передвигался аппарат, погружаться в воду, попавшую в нижнюю часть контейнмента (ее уровень составлял ~2м над бетонным основанием) и проводить там видеосъемку и измерение МЭД (рис. 139).

Размеры зонда: диаметр – 20 мм, длина - 40 мм. Максимальная глубина погружения – 3.5 м. Диапазон измерения дозиметра до  $\sim 1 \times 10^4$  Зв/час, предел набранной дозы – 1000Зв.

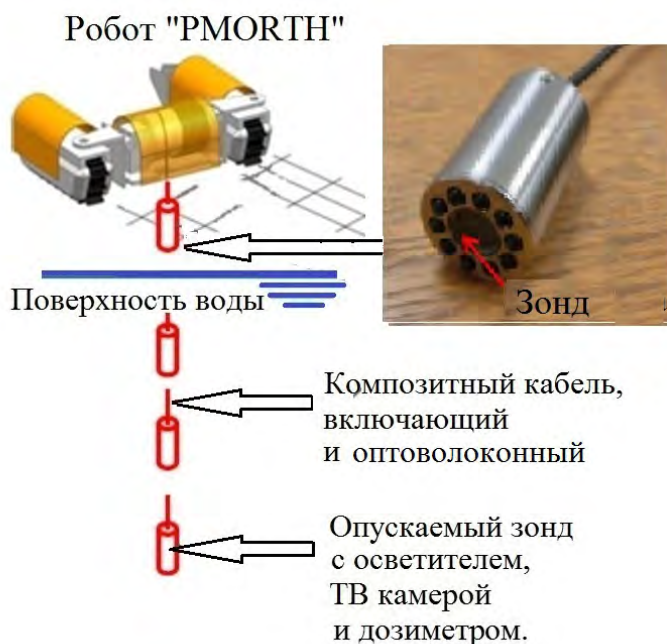


Рис. 139. Робот «PMORPH » и принцип его работы в контейнменте.

<sup>73</sup> «PMORPH» - первая буква взята из названия «контейнмент» (Primary Containment Vessel). Остальные входят в слово «метаморфоза» (metamorphosis), означая изменение формы «Скорпиона».

Принципиальная схема поиска кориума в контейнменте 1-го блока приведена на рис. 140.

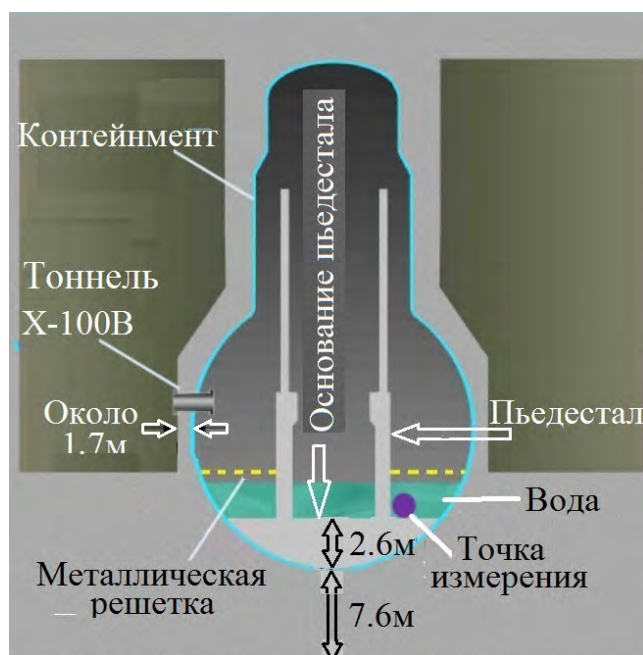


Рис. 140. Принципиальная схема поиска кориума в контейнменте 1-го блока с помощью робота «PMORPH» (март 2017г.) Уровень воды ~2м над бетонным основанием.

Через канал X-100В робот должен был проникнуть внутрь контейнмента, опуститься на решетку, трансформироваться и, двигаясь по ней, подойти к заранее намеченным точкам. В этих точках предполагали с помощью кабеля провести спуск зонда (через отверстие в решетке).

Это позволяло получить видеоинформацию и данные о величине МЭД в разных местах решетки и под ней, на разных высотах от основания пьедестала. В том числе и под водой. Специалисты надеялись, что с помощью «PMORPH» удастся обнаружить на основании пьедестала застывший кориум.

Измерения проходили в течение 5 дней и завершились 22 марта.

На рис.141 приведена схема маршрута, проделанного «PMORPH» 20 марта 2017г. и положение точек D1 – D3, в которых проводились измерения. Слева на рисунке показан снимок решетки, сделанный роботом вблизи точки D2.

В этой точке был опущен зонд, который провел видеосъемку<sup>74</sup> и измерения МЭД (рис. 142).

В отчетах ТЕРСО по всему пятидневному циклу измерений отмечается следующее.

**Заметных повреждений у обследованных конструкций контейнмента не наблюдалось.**

**На трубопроводах, на металлической решетке (рис. 141) и конструкциях виден слой отложений, но происхождение этих отложений еще предстоит установить..**

**Величина МЭД во всех точках измерения относительно не велика – не более 12 Зв/час. Даже с учетом поглощения слоем воды эта величина говорит об отсутствии на дне больших скоплений топлива.**

**Прямых признаков кориума обнаружить не удалось.**

<sup>74</sup> Большая часть полученных изображений имеет низкое разрешение и небольшой размер. Дно практически не различимо из-за плавающих в воде отложений..

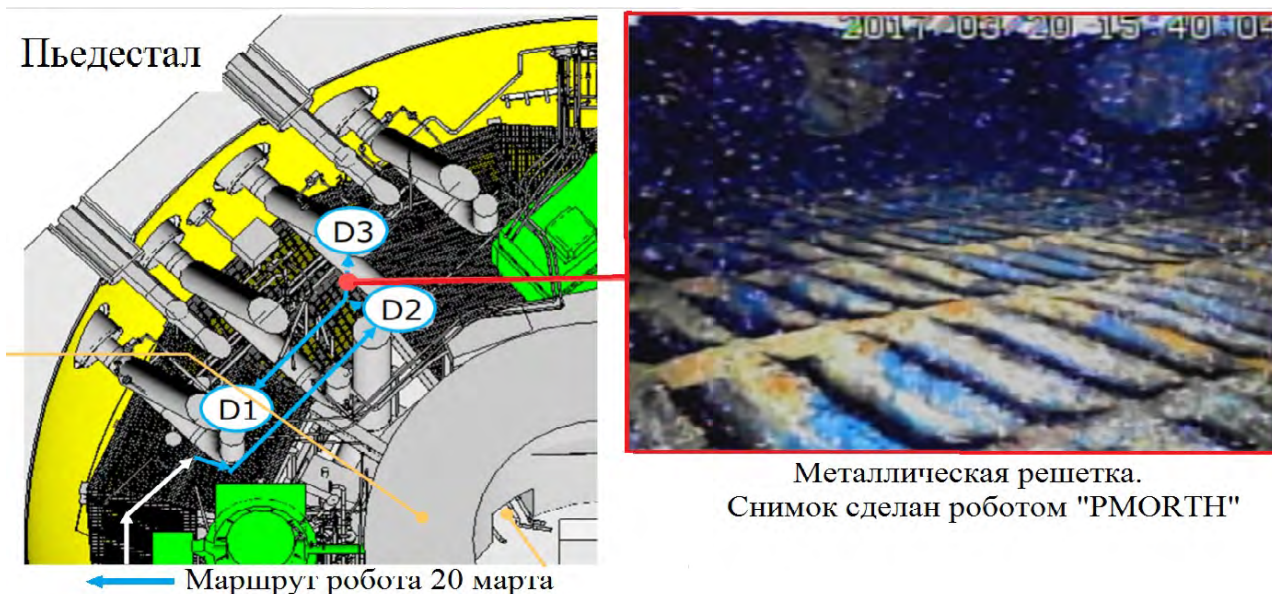


Рис. 141. Маршрут робота «PMORPH» 20 марта 2017г. и снимок решетки, сделанный им вблизи точки измерения D2.

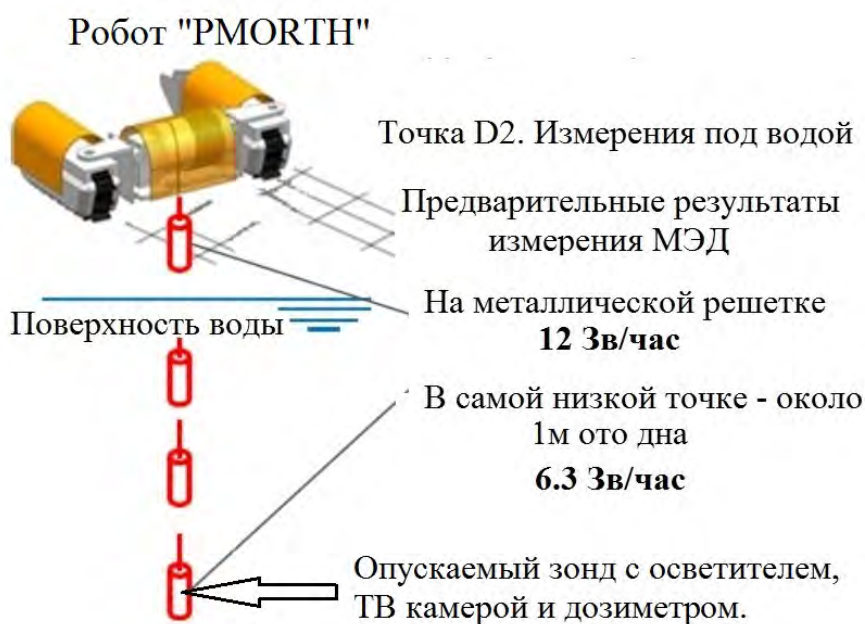


Рис. 142. Результаты первых измерений МЭД на металлической решетке и в воде (при наибольшем погружении).

### 2.13 ИЮЛЬ 2017гг. БЛОК 3. РОБОТ «SUNFISH» (см. , например,[Ф83, Ф84]).

Летом 2017г. с помощью робота начались исследования внутренних частей контейнмента 3-го блока. Ситуация осложнялась тем, что его нижняя часть была затоплена водой на глубину около 6 метров и при работе аппарат должен был двигаться под водой.

Специалисты Терсо установили это еще в 2015 году. 20 и 22 октября в контейнмент через канал Х-53 с с целью проведения съемок, получения данных о МЭД, температуре и взятия проб воды были введены соответствующие датчики (см. рис. 143).



При этом внутри контейнента не зафиксировали повреждений, уровень воды оказался очень близок к расчетному значению<sup>75</sup>, а измеренная доза была ниже, чем в других блоках.

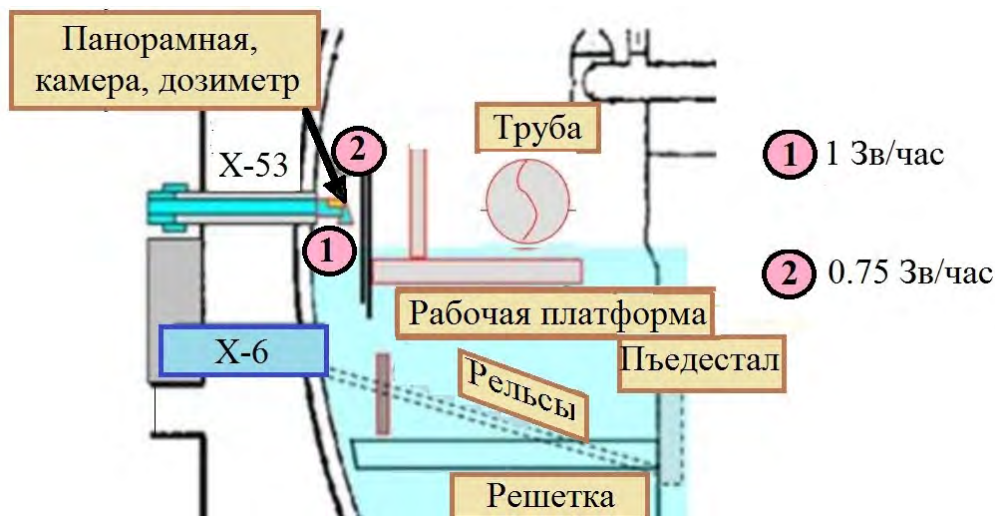


Рис. 143. Схема ввода датчиков в контеймент 3-го блока в октябре 2015г.

Сотрудникам «Toshiba» и IRID потребовалось больше года чтобы разработать плавающий робот, способный проводить под водой необходимые измерения и телесъемку. Он должен был проникнуть внутрь контейнента через канал X-53, оборудованный защитными средствами, предотвращающими выход из реактора радиоактивных газов. Диаметр канала составлял всего 14 сантиметров и это определило малые габариты аппарата (см. рис 144 и 145).

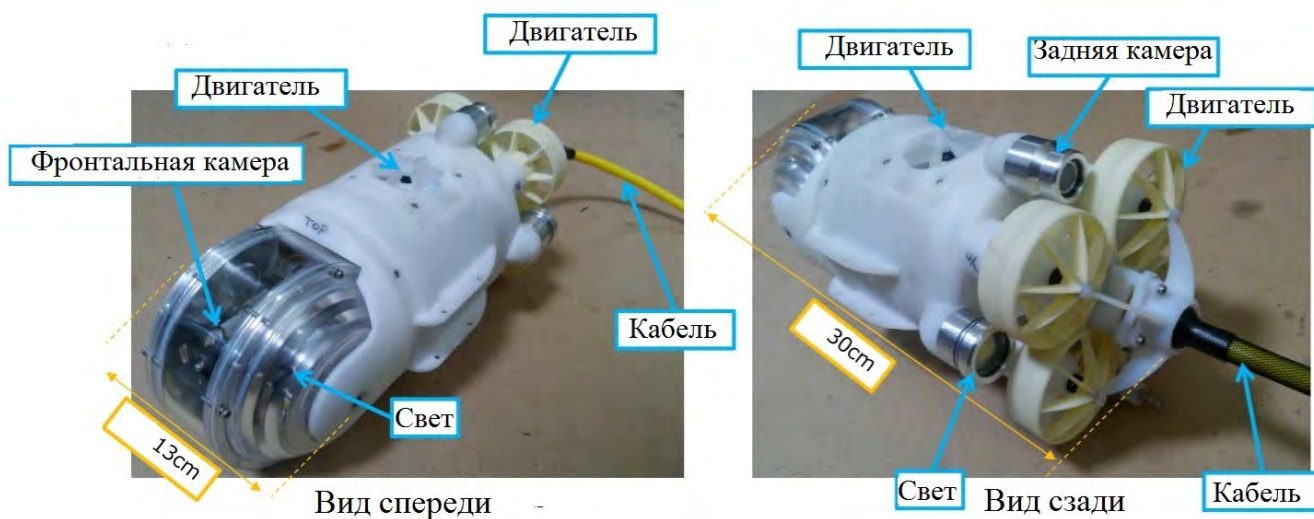
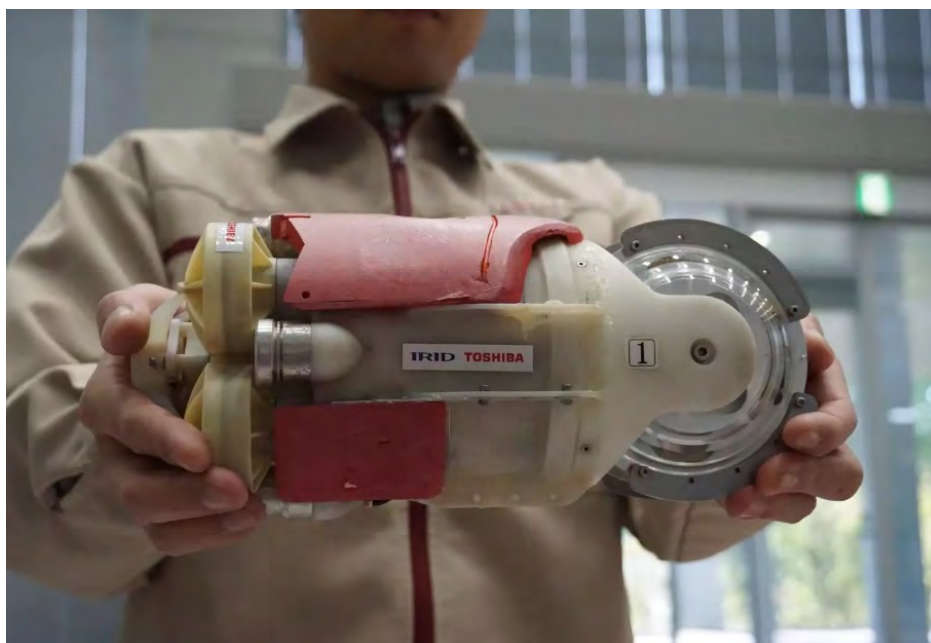


Рис. 144. Робот «SUNFISH» оснащен пятью двигателями (с пропеллерами) двумя телекамерами, осветителями, датчиками и управлялся с помощью кабеля, идущего от центра операторской, расположенной в ~ 500 метрах от 3-го блока. Согласно расчетам радиационная стойкость аппарата ~ 200 Зв.

После проведения трехмесячных испытаний, обучения и доводки аппаратуры «SUNFISH» был признан готовым к работе и ранним утром 19 июля помещен в канал X-53 контейнента 3-го блока. Исследования продолжались до 22 июля.

<sup>75</sup> Измерения, проведенные в 2015г. дали значение 6.3м

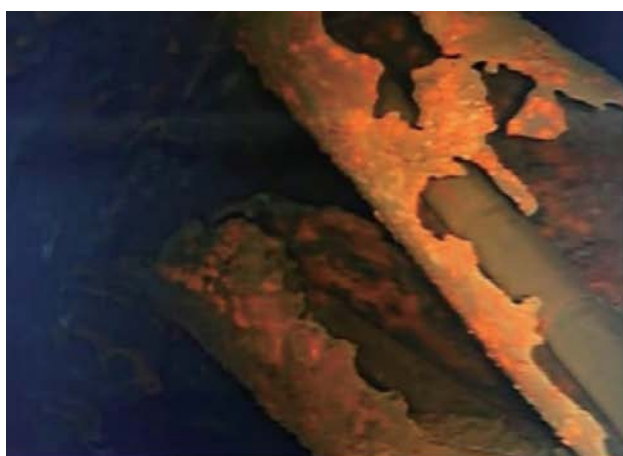


*Рис.145. Робот «SUNFISH».*

Робот не смог найти металлическую рабочую платформу (см. рис. 143), предположительно эта структура опустилась ниже. Однако, им были обнаружены многочисленные металлические конструкции – трубы, тросы и т. п., большинство из которых ранее использовались для постановки и извлечения стержней управления. Они частично покрыты ржавчиной и своеобразными наслоениями.

Полученные с помощью робота изображения не так легко интерпретировать, но после их всестороннего изучения сотрудники ТЕРСКО пришли к следующему выводу.

***Расплавленный кориум вытекал из реактора, скорее всего, через технологические отверстия для стержней СУЗ<sup>76</sup>. Взаимодействуя с конструкциями в контейнменте, он образовывал ЛТСМ. Последние застывали в виде свешивающиеся вниз «сталактитов» и своеобразных наслоениях на конструкциях, на дне конфаймента и его стенках. (рис. 146).***



*Рис. 146. Слева - «сталактиты», как предполагается, застывших лавообразных ТСМ (съемка «SUNFISH» 19 июля 2017г.). Справа – наслоения этих ТСМ (21 июля 2017г.).*

<sup>76</sup> Не исключено, что произошло и частичное расплавления металла корпуса реактора.

***«До сих пор мы не знали точно, где находится топливо и как оно выглядит» - сказал Такахиро Кимото, генеральный директор подразделения ядерной энергетики ТЕРСО «Теперь, когда мы его увидели, мы можем начинать составлять планы по его извлечению!».***

***2.14. ЯНВАРЬ 2018г. БЛОК 2. РОБОТ «БОЛЬШАЯ ЗМЕЯ» (см. , например,[Ф85, Ф86]). .***

Следующий заметный шаг в исследовании местоположения топлива был сделан на 2-ом блоке в январе 2018г. с помощью усовершенствованного робота-зонда, созданного специалистами «Toshiba» и IRID..

Аппарат состоял из направляющей трубы длиной ~ 13 метров и диаметром ~ 11 см, к которой присоединена телескопическая труба длиной ~ 5 метров. На конце последней находился модуль весом 2 кг. На его передней части крепится ТВ панорамная камера со специальным, незапотевающим объективом. Она может поворачиваться на 120<sup>0</sup> по вертикали и 360<sup>0</sup> по горизонтали.

Кроме камеры в модуле находятся: светодиодный осветитель , дозиметр и термометр (см. рис. 147 - 14).

В литературе этому роботу присваивались названия: «Змея», «Удочка», «Телескопическое устройство» и т. п. Для определенности, будем называть его: «Большая змея» (БЗ).

***19 января 2018 г.*** через направляющую трубу по тоннелю Х-6 аппарат ввели в контеймент 2-го блока (рис. 53).

Особое внимание уделялось мерам по защите сотрудников, работающих в помещениях блока от проникающего излучения и от радиоактивных аэрозолей и газов, которые могут выйти из контеймента во время введения и работы БЗ.

При проведении основных исследований операторы находились в безопасном удалении от здания реактора.

В процессе исследования обнаружилось следующее.

***Больших повреждений конструкций не обнаружено.***

***Все основание пьедестала покрыто отложениями, напоминающими песчаные или глинистые осадки.***

***В ряде мест на нем наблюдаются упавшие компоненты топливных сборок.***

***Величины МЭД, также как температуры, почти не зависят от высоты измерения над основанием пьедестала и составляют, соответственно, 7-8 Зв/час и 21<sup>0</sup>С.***

На рис. 55 приведена схема расположения некоторых областей, которые были исследованы роботом БЗ.

На рис.56 - фотографии, полученные с помощью робота БЗ в этих областях.

***А - висящие сверху механизмы СУЗ (привод управляющих стержней).***

***В - основание пьедестала, покрытое отложениями.***

***С - упавшая ручка контейнера топливных стержней среди отложений (учитывая, что длина топливных сборок составляет около 4 метров, а ручка установлена на ее верхнем конце, сборка должна была расплавиться, а расплав протечь за пределы корпуса реактора)***  
***Справа – фото такой стальной ручки (до аварии).***

Наконец, на рис. 57 представлено фото внутри пьедестала реактора 2-го блока, полученное с помощью панорамной камеры робота БЗ, а на 58 – один их моментов работы по вводу БЗ в контеймент.



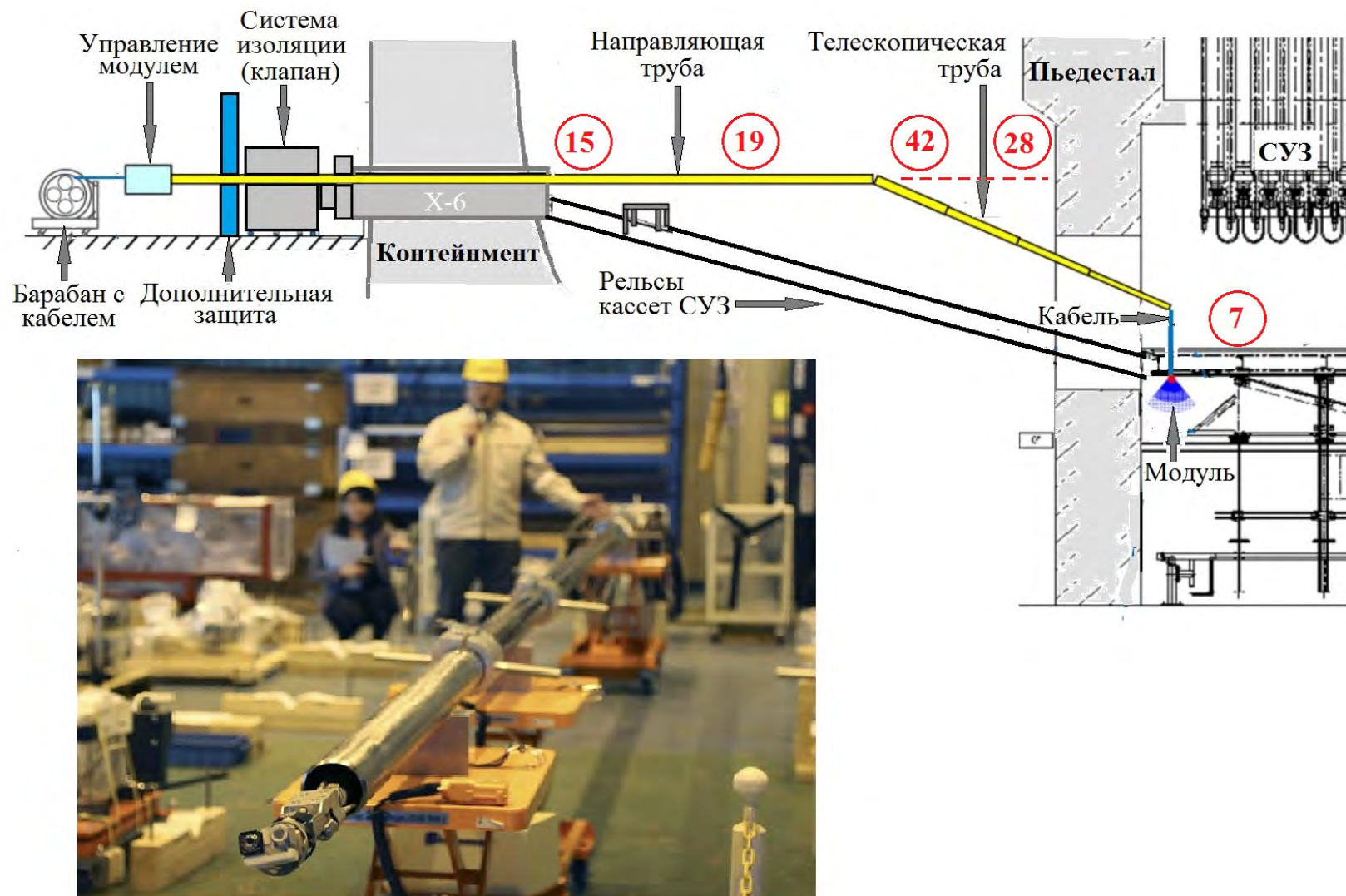


Рис. 147. Общая схема проникновения робота БЗ в контейнер 2-го блока через тоннель X-6 и фото подготовки аппарата к работе. В красных кружках – измеренные МЭД (Зв/час).



Рис. 148. Измерительный модуль, находящийся в головной части «Большой змеи».

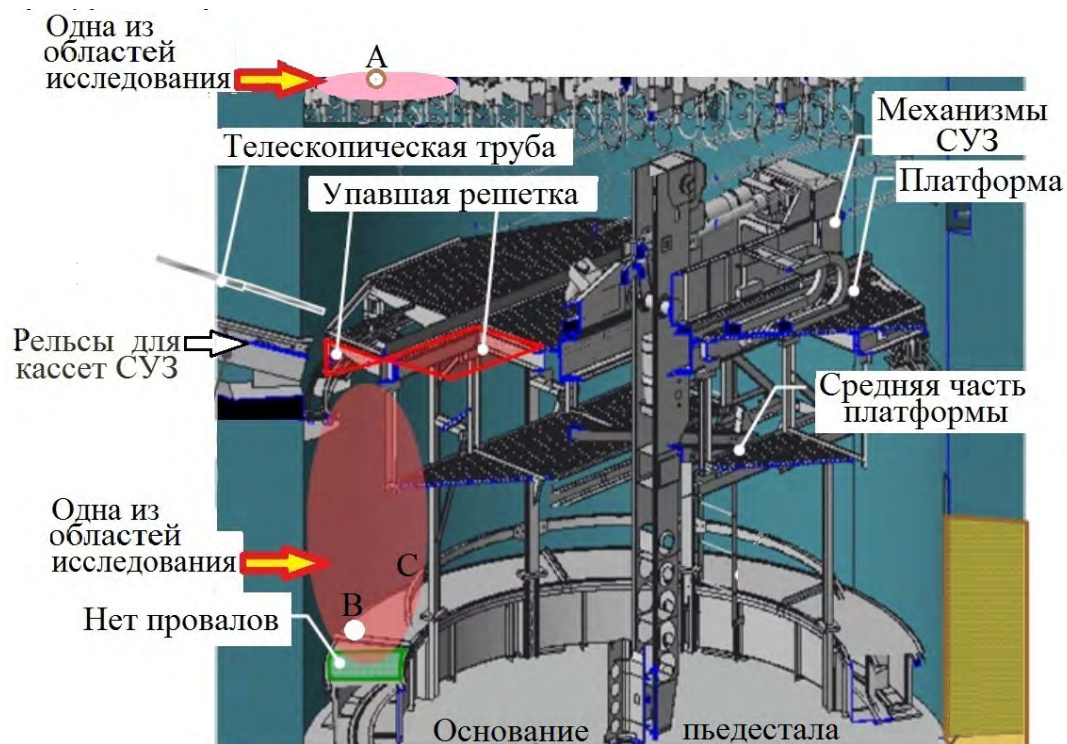


Рис. 149. Расположение некоторых областей исследования в контейнменте 2-го блока, выполненное роботом БЗ.



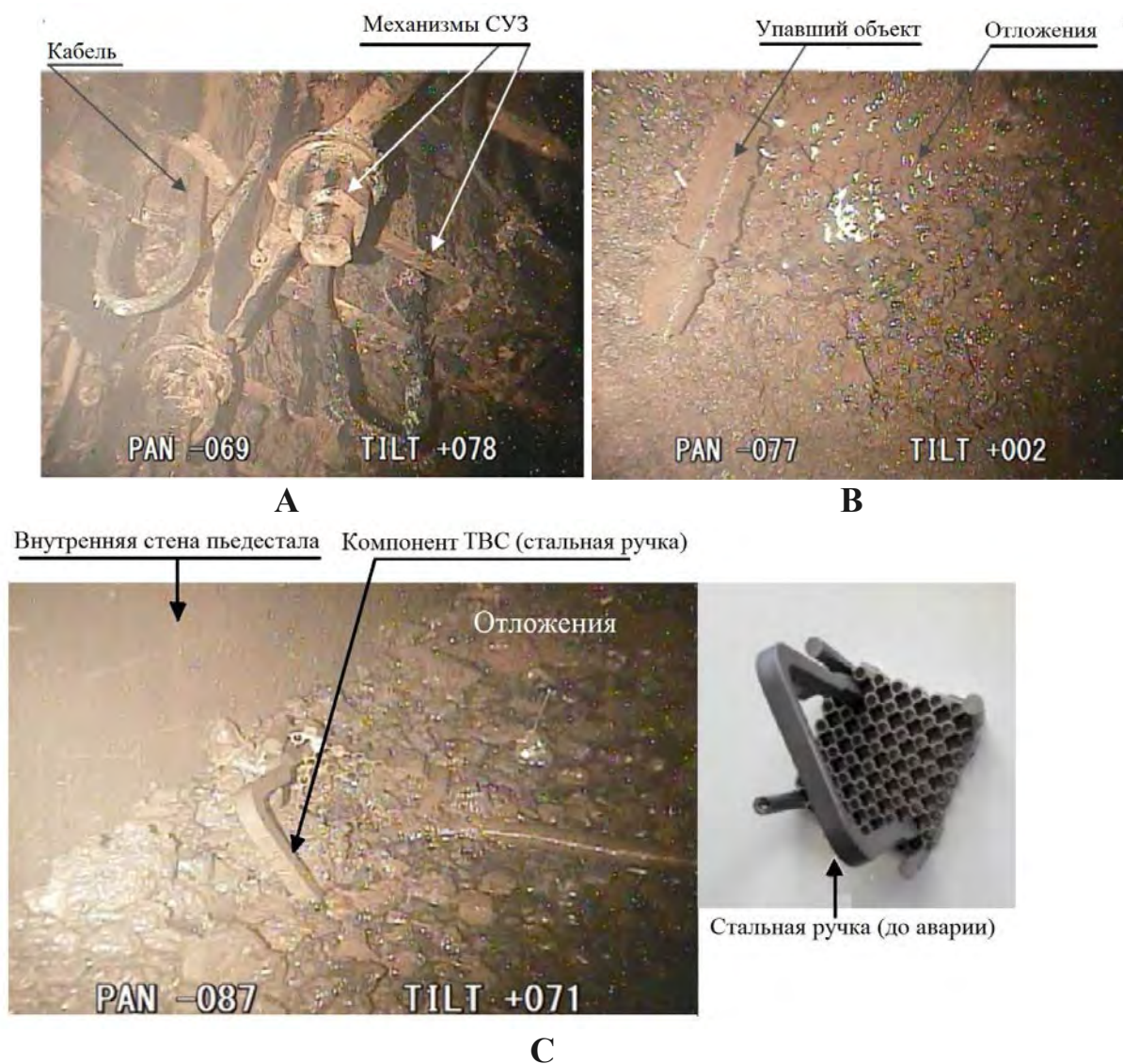


Рис.150. Фотографии, полученные с помощью робота БЗ, внутри контейнмента 2-го блока (подробнее см. выше).



Рис.151 Фотография пьедестала, полученная с помощью робота БЗ





Рис. 152. Специалисты вводят робот БЗ в контейнмент 2-го блока.

#### 2.15. 2018Г. СЕМЬ ЛЕТ ПОСЛЕ АВАРИИ.

К марту 2018г. с момента аварии на Фукусима1 прошло семь лет<sup>77</sup>. Все эти годы шли работы по поиску в реакторах разрушенного топлива. Поиски, которые проводились при участии крупнейших японских промышленных компаний и научных институтов, международной поддержке, при очень больших финансовых затратах. Какие же экспериментальные результаты были получены к этой годовщине?

Ответ на вопрос был дан в докладе **Наохиро Масуда (Naohiro MASUDA)**<sup>78</sup> директора компании по дезактивации и выведению F-1 из эксплуатации [Ф87].

Он привел изображения трех аварийных реакторов, с указанными на них данными о предполагаемом местоположении топливосодержащих материалов и использованных методов их обнаружения (рис. 153).

#### **Окончательные выводы доклада.**

**«Предполагается, что в блоках 1 и 3 большая часть топливного мусора (ТСМ) упала на дно контейнмента. А в блоке 2 основная его масса осталась на дне корпуса реактора и только небольшое количество упало на дно контейнмента».**

Очевидно, что в своих выводах Н. Масуда, во многом, опирался на данные расчетных работ. Дополнительную уверенность ему придавали результаты мюонной томографии –

<sup>77</sup> Как и во многих других странах, число семь считается в Японии особенным, удачным. Семь японских богов счастья, «семь трав», помогающих при болезнях, семь самураев и т. п.

<sup>78</sup> Наохиро Масуда заслужил известность как человек, справившийся в марте 2011 г. с тяжёлой аварией на АЭС «Фукусима Дайни».

относительно нового метода, примененного на F-1 для обнаружения мест топливных скоплений (подробнее см. ниже).

Тем не менее, приходится констатировать, что в конце 2018г. поиски мест таких скоплений все еще находятся в начальном состоянии. Недаром в докладе часто повторяется слово «предполагается».

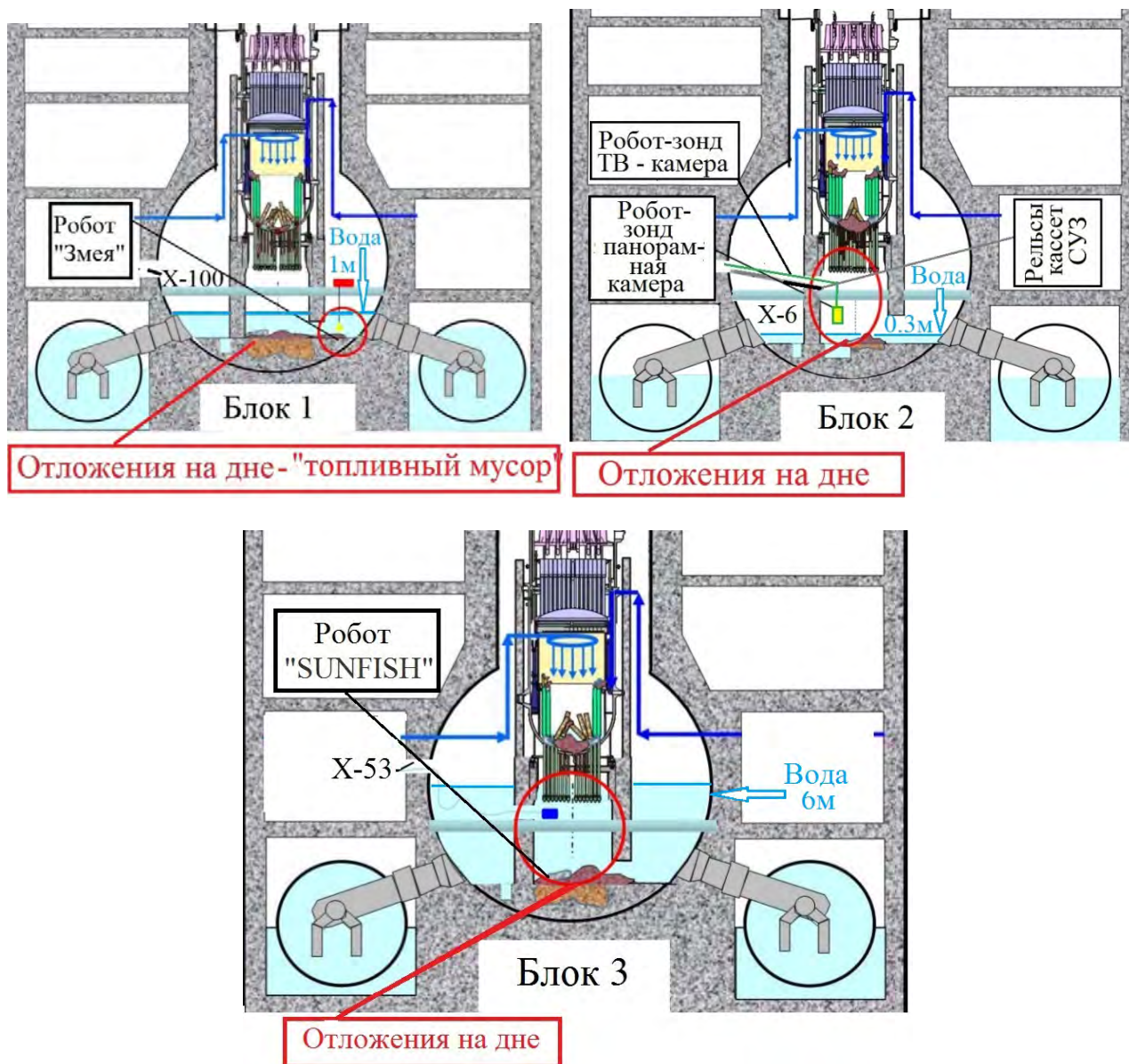


Рис. 153. Обнаруженные места нахождения корюма в трех реакторах F-1 и использованные для этого методы [Ф87].

## 2.16. ДАЛЬНЕЙШИЕ ПЛАНЫ ПО ПОИСКУ МЕСТ НАХОЖДЕНИЯ КОРИУМА В БЛОКАХ F-1 С ПОМОЩЬЮ РОБОТОВ.

Специалистам F-1 для того, чтобы перейти от предположений о местонахождении и состоянии ТСМ к точным утверждениям необходимо решить две основные задачи.

**Во-первых**, взять пробы из предполагаемых скоплений ТСМ и провести их анализы. При этом отработка технологии взятия проб может в дальнейшем помочь при создании механизмов для извлечения из блоков ТСМ.

**Во-вторых**, установить геометрические и физические параметры скоплений ТСМ.



Планы выполнения этих работ обсуждались в ряде публикаций (см., например, [Ф88, Ф89]) Первая из планируемых работ касается исследования отложений в нижней части контейнмента **2-го блока**. Планируемый срок ее проведения - **вторая половина 2018 финансового года**<sup>79</sup>.

**Цель работы заключается в определении (пока предварительном) характеристик материалов этих отложений (например, твердости) и в отборе проб.**

При этом, для проникновения в контейнмент предлагается использовать тоннель Х-6 и робот типа «Большая змея», модифицировав в нем измерительный модуль (рис. 154).

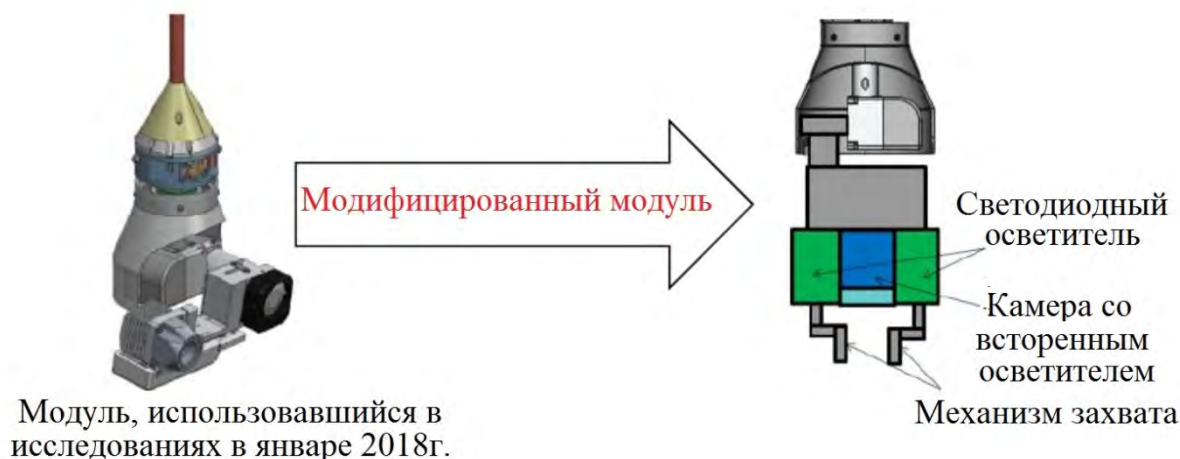


Рис. 154. Один из возможных вариантов измерительного модуля, использовавшегося в в январе 2018г. для исследований контейнмента 2-го блока.

Как и ранее, должны быть приняты все необходимые меры для предотвращения выхода радиоактивных газов и аэрозолей в окружающую среду.

Вторая работа, выполнение которой запланировано **на первую половину 2019 финансового года**<sup>80</sup>, касается скопления ТСМ, расположенного в нижней части контейнмента **1-го блока** под слоем воды. Для доступа робота будет использован тоннель Х-2 (рис. 155).

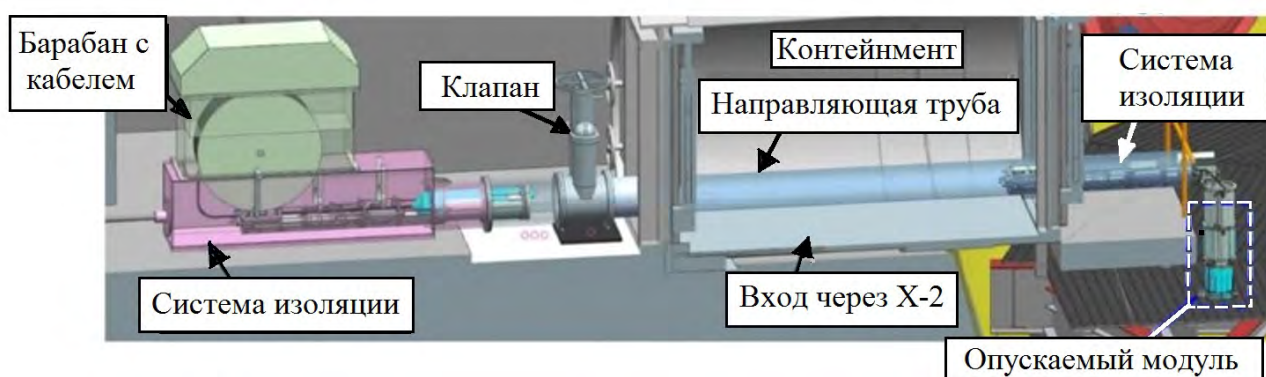


Рис. 155. Предлагаемая схема проникновения робота в контейнмент 1-го блока.

В задачи исследований включены следующие пункты.

**Подробные визуальные наблюдения с помощью камеры с механизмом панорамирования. Сканирование отложений («топливного мусора»). Определение толщины их слоя с помощью ультразвукового датчика.**

<sup>79</sup> В Японии 2018 финансовый год кончается 31 марта 2019г.

<sup>80</sup> После 1 апреля 2019г.



### **Измерение потока нейтронов, идущего с поверхности отложений.**

#### **Отбор проб.**

Для выполнения этой работы создается специальный опускаемый модуль, способный передвигаться под водой. Один из возможных вариантов такого модуля приведен на рис. 156 (без устройства для отбора проб).



Рис. 156. Один из возможных вариантов опускаемого модуля

Во второй половине 2019 финансового года исследователи планируют снова вернуться ко **второму блоку**. Предполагается, что через тоннель Х-6 внутрь контейнмента будет введена «специальная рука»<sup>81</sup>, способная как проводить измерения, так и отбирать пробы (см. рис.157).

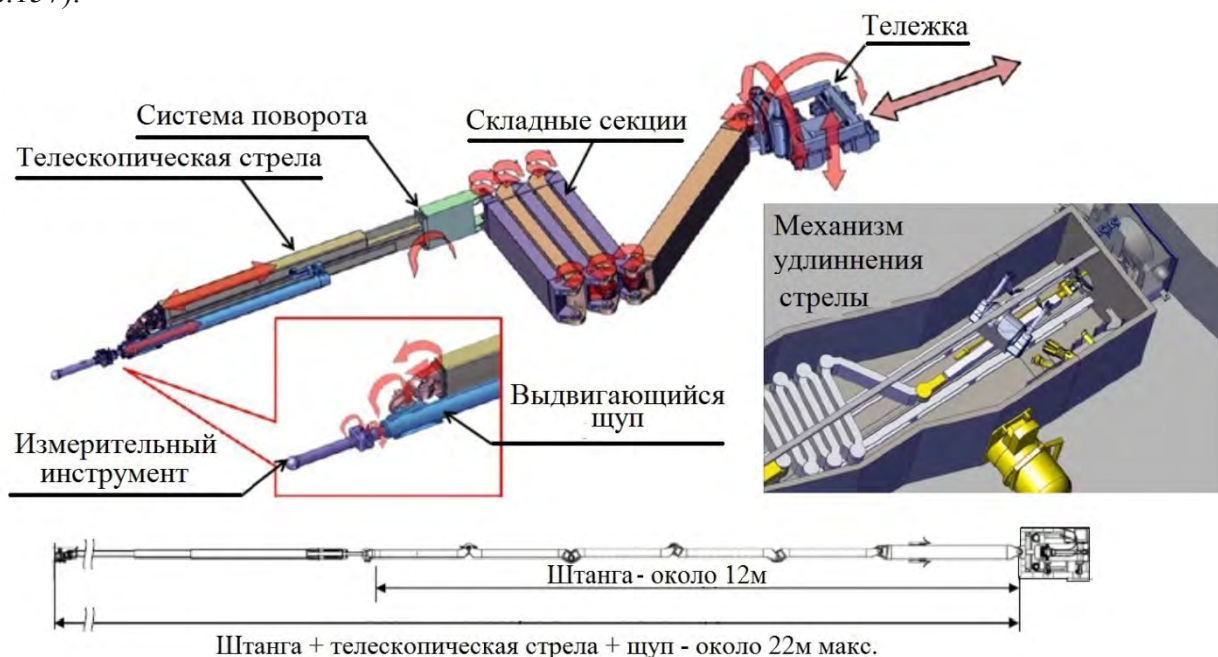


Рис. 157 «Специальная рука», созданная для проведения исследований и отбора проб в контейнменте 2-го блока.

Ее отличительными особенностями будет возможность изменять свою длину в широком диапазоне (вплоть до 22м), использовать при работе сменные инструменты и датчики, отбирать пробы в глубине отложений.

Как считают авторы обзора, опыт, полученный при использовании «специальной руки», может быть необходим при извлечении ТСМ из контейнмента.

Наиболее важным пунктом обсуждаемой программы работ является отбор и анализ проб ТСМ.

<sup>81</sup> Шарнирно - сочлененный расширительный рычаг.

В работе [Ф89], выпущенной в марте 2018г. МЕТІ (через 7лет после аварии), приводится количество отобранных в разрушенных блоках проб. Так внутри контейнентов 2-го и 3-го реакторов были взяты 4 пробы воды (рис. 158) и не одной пробы ТСМ («топливного мусора»).

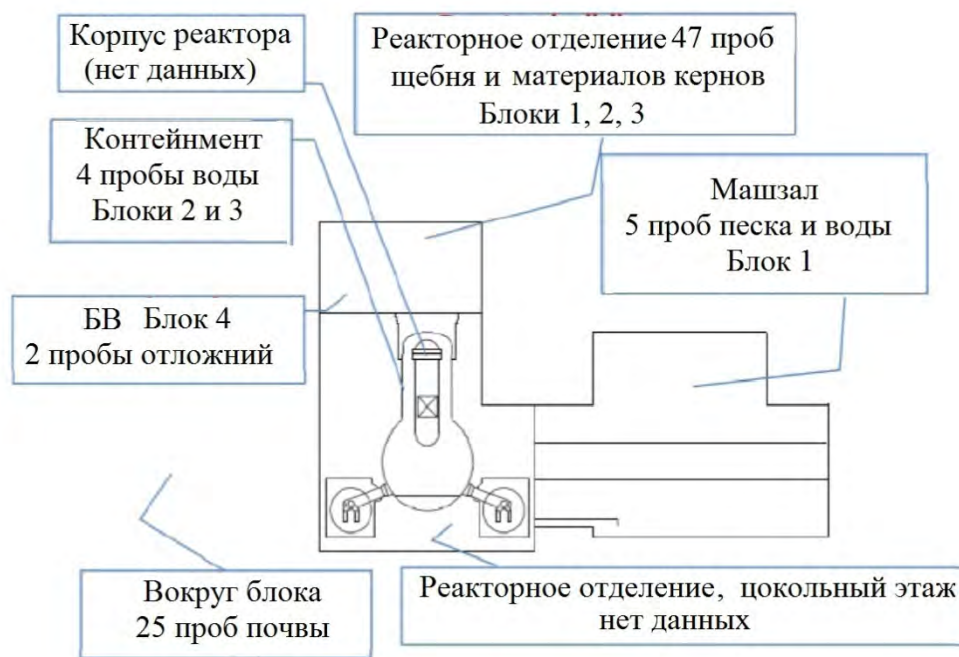


Рис. 158. Число проб ТСМ, отобранных к началу 2018г. из блоков F-1.

Напомним, что на ЧАЭС ликвидаторы через 3 года после аварии обладали развернутыми анализами более чем 300 проб, отобранных практически во всех заметных скоплениях ТСМ. Без такого отбора и проведения подробных исследований сколько-нибудь детальные и реалистические планы по извлечению разрушенного топлива выработать вряд ли возможно.

## 2.17. ВОЗМОЖНОСТИ МЮОННОЙ ТОМОГРАФИИ<sup>82</sup> ПРИ ПОИСКАХ ТОПЛИВА В РЕАКТОРАХ F-1.

Вскоре после аварии на F-1 несколько лабораторий в США и Японии выступили с предложениями использовать для определения положения ТСМ в разрушенных блоках метод мюонной томографии (МТ).

Сущность этого метода состоит в использовании потока космических  $\mu$  - мезонов (мюонов) для сканирования крупных объектов – зданий, промышленных сооружений и т.п. При этом оказывается возможным обнаружить в этих объектах неоднородности - скопления легких или тяжелых материалов и построить их пространственное изображение<sup>83</sup>. (см.[Ф90 – Ф92] и др.),

Каждую минуту квадратную площадку со стороной 1 см, горизонтально лежащую на поверхности Земли, пересекает 1 мюон космического происхождения. Поток этих частиц,

<sup>82</sup> Часто используются другие названия -, мюонное сканирование, мюонная рассеивающая радиография др.

<sup>83</sup> Первым примером практического использования МТ стала попытка нобелевского лауреата Л. Альвареса с коллегами обнаружить скрытые помещения во второй по величине египетской пирамиде - пирамиде Хефрена в Гизе,. Скрытые полости в пирамиде обнаружены не были, но зато были получены экспериментальные подтверждения возможностей метода МТ для исследования крупномасштабных объектов.

обладающих большой проникающей способностью, практически не зависит от географической широты и имеет небольшие сезонные вариации. Средняя энергия мюонов около 4 ГэВ, с максимумом спектра около 2 ГэВ. Угловое распределение пропорционально  $\cos^2(\theta)$ , где  $\theta$  — зенитный угол.

В МТ используют то, что поток мюонов, прошедший через слой вещества, во-первых, уменьшает свою интенсивность, во-вторых, среднюю энергию, в-третьих, меняется траектория частиц - они рассеиваются.

Эти эффекты хорошо наблюдаются при больших толщинах материалов и сильно зависят от природы этих материалов. Так как вплоть до  $E_\mu \sim 100\text{ГэВ}$  мюоны теряют энергию в основном на ионизацию атомов среды (около 2 МэВ на  $1\text{г/см}^2$  вещества) Например, пробег частицы с энергией 3ГэВ в железе составляет около 230см, а в бетоне  $\approx 680\text{см}$ .

Сильно зависит от материала и угол рассеяния частиц. Слой железа толщиной в 10см рассеивает мюоны с энергией 3 ГэВ, в среднем, на угол почти в 3 раза больший, чем 10см бетона. А 10см урана рассеивают частицы еще в 3 раза сильнее железа.

Это дает возможность, изучая поток мезонов, проходящий, например, через бетонную конструкцию, определить, есть ли в ней значительные пустые полости или скопления тяжелых материалов – железа, урана.

Существуют две разновидности метода МТ – метод пролета (называемый еще «абсорбционный») и «рассеяния» (рис. 159).

Первый использует то, что при прохождении потока мюонов через материалы разной природы и плотности он ослабляется по разному. Таким образом, можно получить 2D-изображение исследуемой структуры, подобно изображению на рентгеновском снимке.

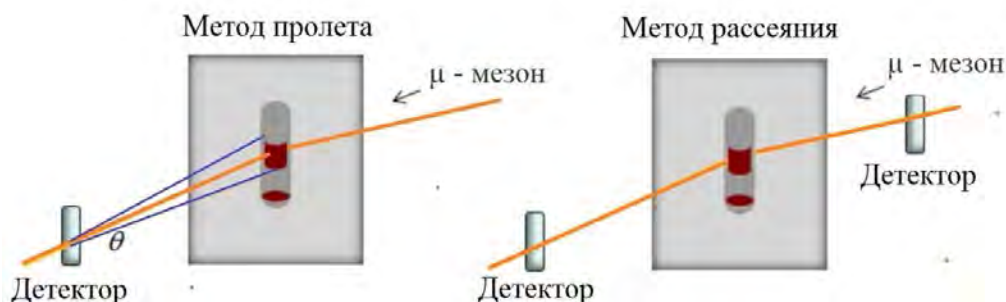


Рис. 159. Два метода мюонной томографии

Метод рассеяния предполагает использование двух позиционно-чувствительных детекторов, в пространстве между которыми находится исследуемая конструкция. Детекторы обеспечивают определение треков каждой частицы до и после контролируемого объекта. Проведя статистический анализ некоторого числа треков, можно выделить в конструкции области, в которых находятся материалы с различными рассеивающими свойствами<sup>84</sup>. Для доказательства применимости метода МТ при поиске разрушенного топлива в блоках F-1 в 2013 году небольшой мюонный детектор был транспортирован из Лос-Аламоса в Японию. Детектор установили рядом с экспериментальным реактором фирмы Тошиба в Кавасаки и в

<sup>84</sup> В начале 2000-х годов в Лос-Аламосской Национальной лаборатории в США было показано, что второй метод позволяет получать большую информацию об исследуемой конструкции.



течение месяца «фотографировали» его в «мюонных лучах» [Ф93, Ф94] (рис. 160).

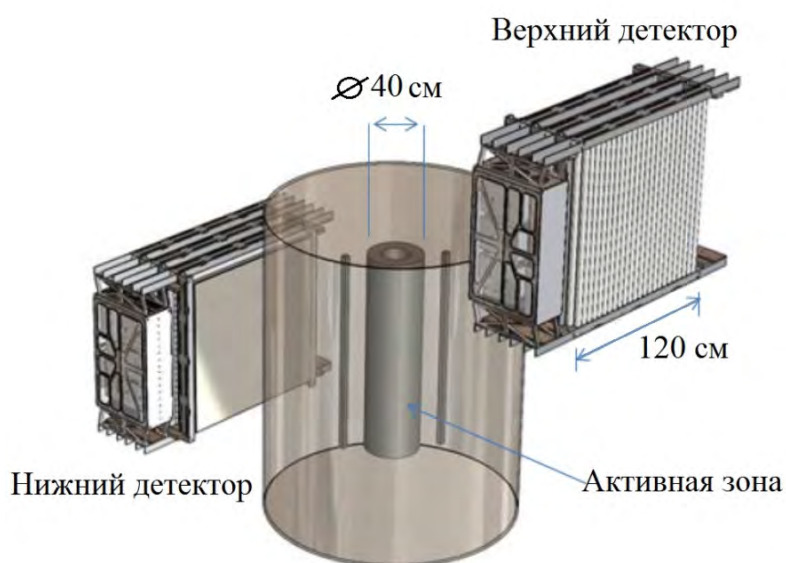


Рис. 160. Мюонный детектор (использующий метод рассеяния) установленный в Кавасаки. ТВЭЛ-ы реактора образовывали полый цилиндр с внешним диаметром в 40см и внутренним 20см.

Центральная часть реактора начинала проступать уже через несколько часов после начала работы, пустоты в центре — через сутки. После четырехнедельной экспозиции картинка стала уже достаточно четкой для детального изучения (рис. 161).

Проведенная демонстрация возможностей МТ окончательно убедила сомневающихся и была начата подготовка к использованию метода на площадке F-1.

В конце 2014г. ТЕРСО объявило, что, созданный в августе 2013г., Международный научно-исследовательский институт проблем вывода из эксплуатации ядерных объектов (IRID) и компания Toshiba начинают работы по монтажу больших мюонных детекторов около 1-го блока F-1. Предполагалось использовать метод рассеяния.

Однако, возникшие трудности привели к значительной задержке в этой работе.

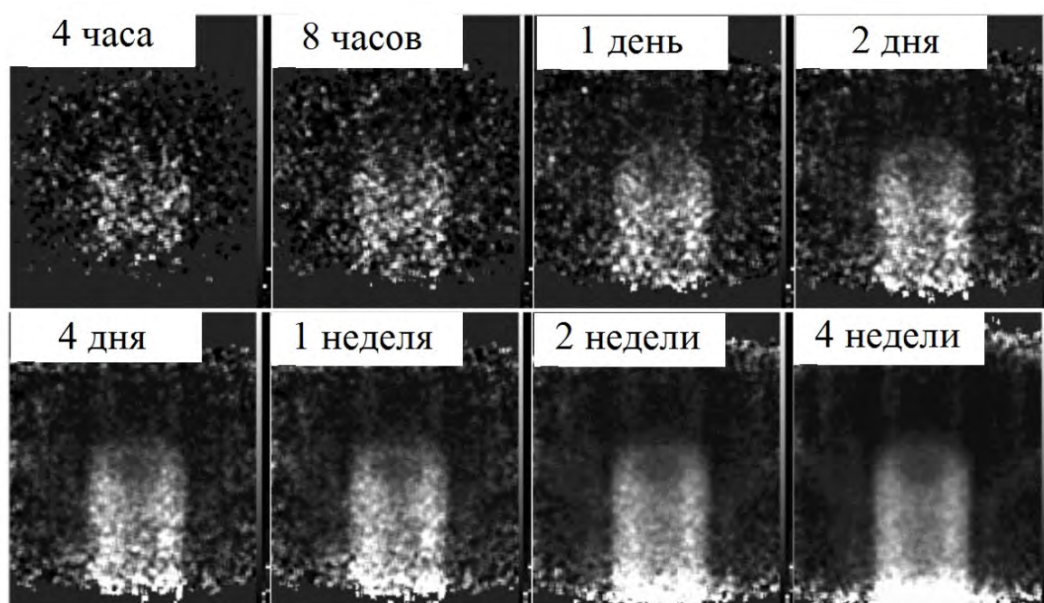


Рис. 161. Результаты МТ реактора в Кавасаки в зависимости от времени экспозиции.

В результате, для первых исследований были использованы относительно небольшие детекторы, поставленные Japan's High Energy Accelerator Research Organization (КЕК). В них использовался метод пролета. Сбор данных на *первом блоке* начались 12 февраля 2015 года. Велся он с помощью двух установок, расположенных на северо-западной (первый детектор) и северной (второй детектор) сторон здания (см. рис. 162 и 163).



Рис. 162. Установка мюонного детектора на F-1.

После сеанса, продлившегося 26 дней, был опубликован отчет [Ф95], содержащий достаточно размытые изображения верхней части блока, полученные с помощью каждого из детекторов (рис. 163).

Тем не менее, информации оказалось достаточно, чтобы сделать первые выводы.

На изображениях на фоне бетонных стен можно выделить конструкции, выполненные из стали - корпус реактора, облицовка контеймента и другие. Их размеры соответствуют проектным чертежам. В то же время, эксперты пришли к выводу, что скоплений такого плотного материала, как ядерное топливо, больших по размеру чем 1м, в «просвеченной» части активной зоны не наблюдается.

***Эти результаты показывают, что расплавление топливосодержащих материалов действительно произошло. Образовавшийся кориум вытек за пределы корпуса реактора – в контейнмент.***

К сожалению, детекторы находились на уровне земли. Это не дало возможности «просветить» нижнюю часть контеймента, где скорее всего оказалась значительная часть ТСМ. В дальнейшем набор статистики был продолжен и длился до сентября 2015г. Полученные за это время данные подтвердили первоначальные выводы..

Просвечивание *второго блока* проводились одним детектором, установленным у западной стены здания (рис. 164) с марта по июль 2016 г.

Результаты исследований были опубликованы в отчетах [Ф96, Ф97].

Отмечается, что на изображении просматриваются затемнения от бетонных конструкций, окружающих контеймент и бассейн отработавшего топлива, от стен и полов здания реактора, .

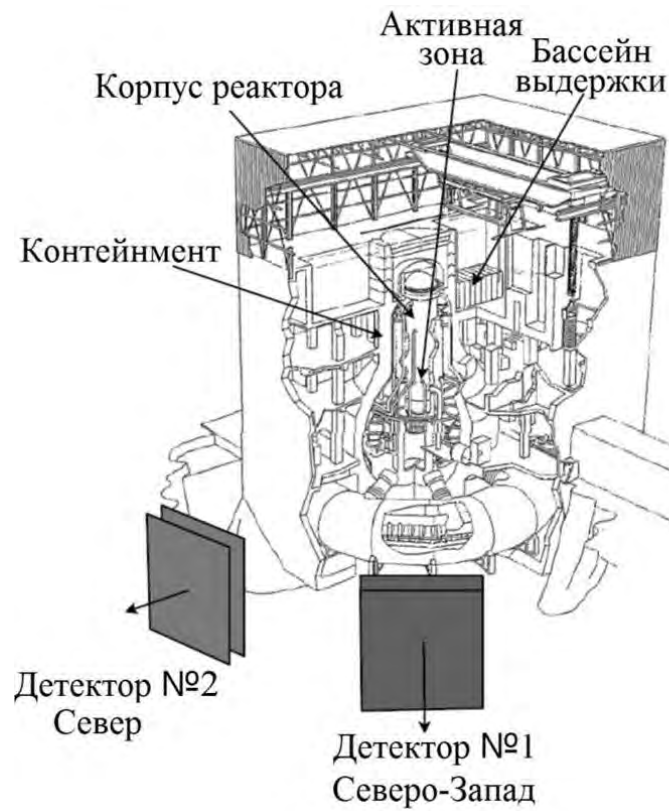


Рис. 163. Расположение двух детекторов мюонов на севере и северо-западе от 1-го блока F-1 и изображением верхней части блока, полученное с помощью 1-го из детекторов после 26-ти дневного сеанса.



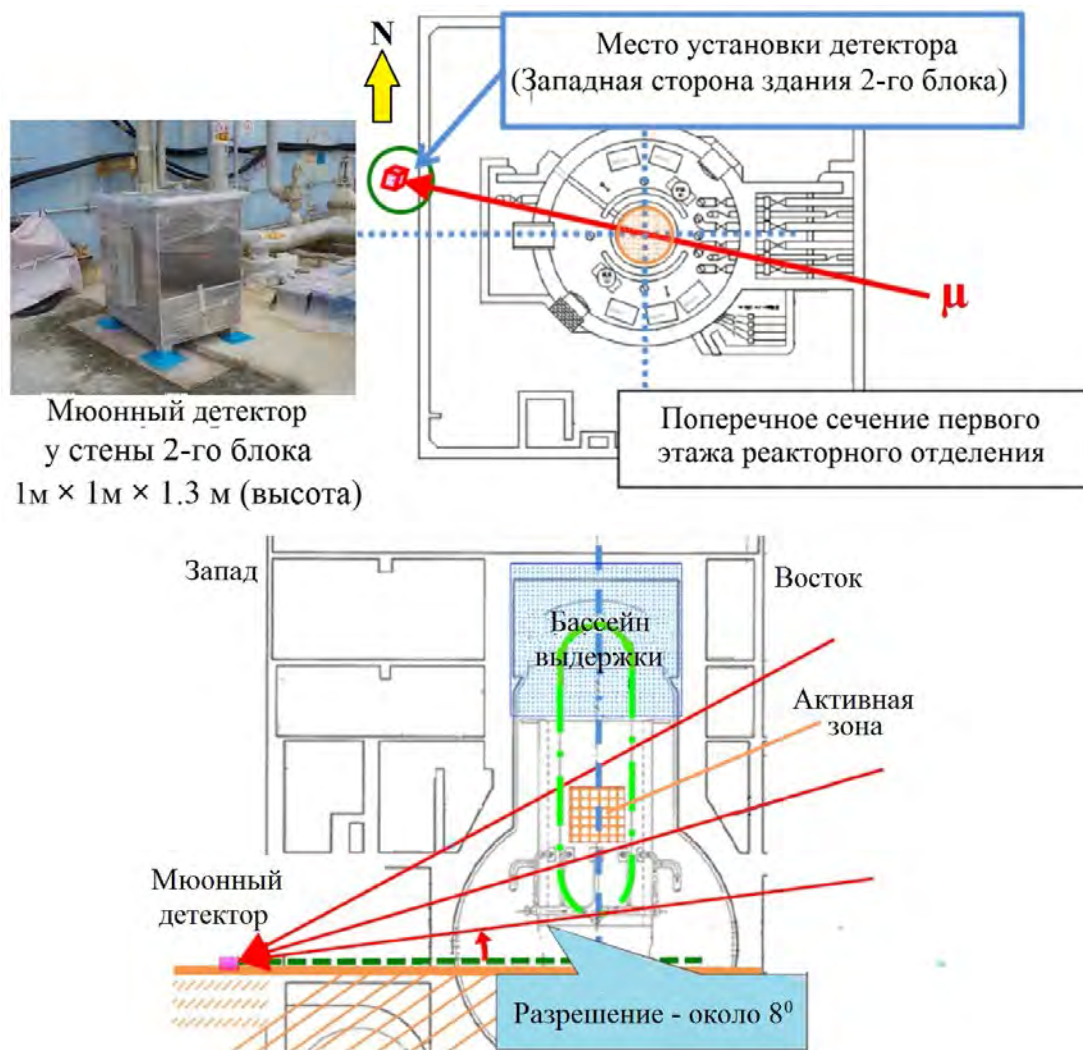


Рис. 164. Расположение детектора мюонов на западе от 2-го блока F-1.

В корпусе реактора значительно выделяется его нижняя часть, в которой, скорее всего, сосредоточились топливосодержащие материалы (см. рис. 165).

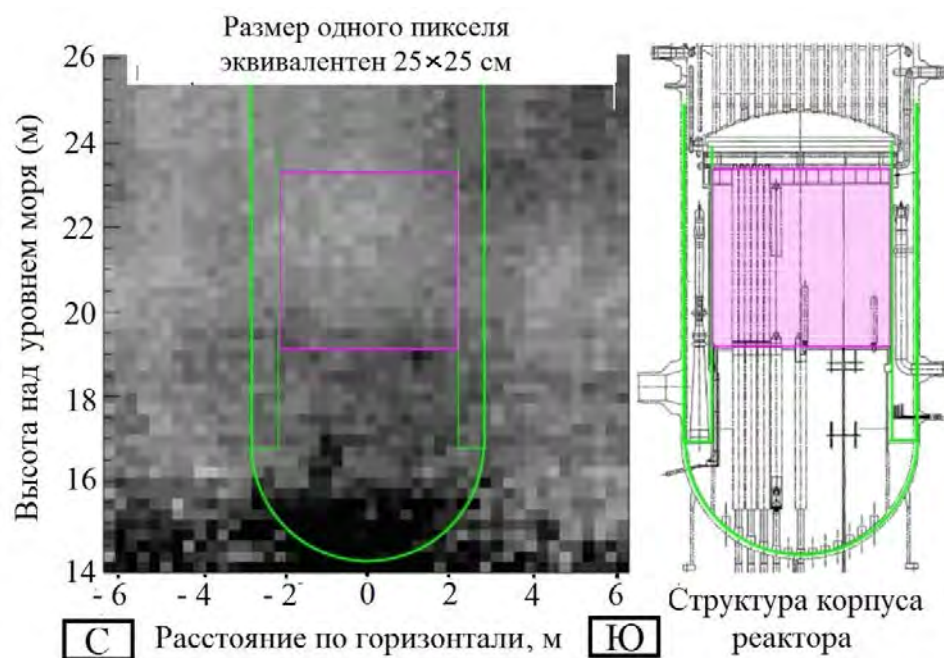


Рис. 165. Изображением активной зоны и нижней части корпуса реактора 2-го блока, полученное с помощью мюонного детектора.

**Главный результат исследования - значительная часть ТСМ опустилась в нижнюю часть корпуса реактора<sup>85</sup>.**

На **третьем блоке** мюонная томография (методом пролета) проводилась с мая по сентябрь 2017г. Расположение детектора относительно корпуса реактора и других помещений показано на схеме рис. 166, результаты измерений на рис. 167.

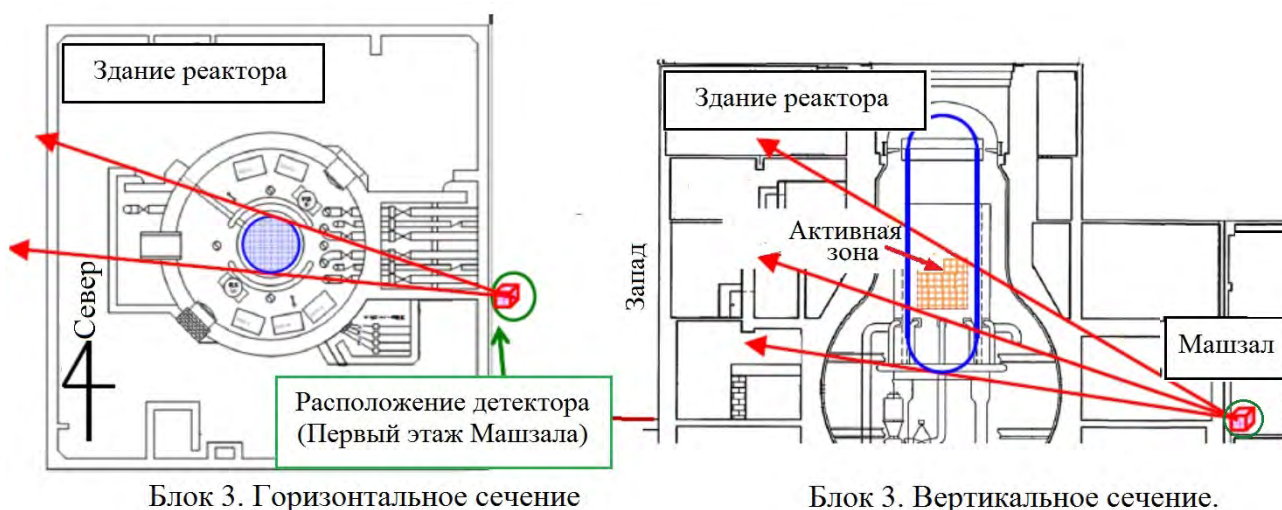


Рис. 166. Схема измерений с помощью мюонного детектора на 3-ем блоке.

Измерения завершились 8 сентября. Полученное к этому времени изображение представлено на рис. 72.

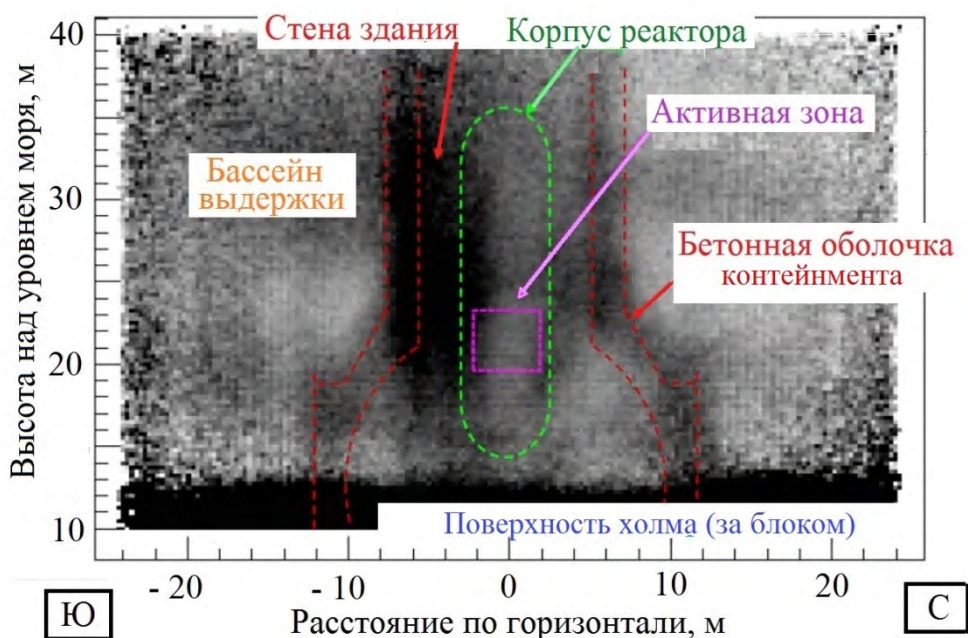


Рис 167. Результаты измерений на 3-ем блоке.

<sup>85</sup> Более пессимистический вывод, о том, что топлива в реакторе 2-го блока осталось менее 30% от первоначальной загрузки сообщили в сентябре 2015г. на конференции японского физического общества сотрудники университета Нагоя. Они основывались на сравнительном анализе данных мюонной томографии, выполненной на 2-ом и 5 блоках F-1. При этом активная зона реактора 5-го блока была полностью загружена топливом.

В отчете [Ф98] ТЕРСО указывается, что в результате обработки этого изображения можно выделить целый ряд конструкций. В том числе железобетонных, таких, как стена здания, оболочка контейнента. Можно определить местоположение бассейна выдержки и найти контуры корпуса реактора.

***Главный результат исследования - в корпусе реактора не обнаружено значительных скоплений ТСМ.***

Таким образом, исследования с помощью МТ подтверждают расчетный анализ и данные полученные с помощью роботов.

Они подтверждают и слова Наохиро Масуда (Naohiro MASUDA) директора компании по дезактивации и выведению F-1 из эксплуатации, приведенные выше [Ф87]..

***«Предполагается, что в блоках 1 и 3 большая часть топливного мусора (ТСМ) упала на дно контейнента. А в блоке 2 его основная масса осталась на дне корпуса реактора и только небольшое количество упало на дно контейнента».***

## ***2.18. ПРЕДЛАГАЕМЫЕ СПОСОБЫ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ТСМ ИЗ АВАРИЙНЫХ БЛОКОВ.***

Через короткое время после аварии в ТЕРСО стали обсуждать предложения о способах извлечения ядерного топлива из пострадавших блоков. А к 2013г., к моменту создания IRID - организации, задачей которой стал сбор и обобщение данных, которые могли быть использованы при снятии F-1 с эксплуатации, число поступивших предложений достигло двухсот. Многие из них опирались на опыт АЭС «Три-Майл Айленд» где в 1979 г. произошло расплавление активной зоны. . Предлагалось заполнить реакторы и контейненты пострадавших блоков водой и, используя ее для защиты от проникающего излучения и предохранения от выхода за пределы контейнента радиоактивных аэрозолей, извлечь ТСМ. Этот метод получил название «полное погружение».

Однако, между авариями на ТМА и F-1 существовало существенное различие..

В первом случае не была нарушена целостность корпуса реактора, тогда как на блоках японской АЭС это произошло и расплавленная масса ТСМ попала на дно контейнента.

Поэтому по мере накопления необходимой информации, стратегия извлечения топлива с использованием «полного погружения» уже не выглядела такой простой и привлекательной. Ее осуществление должно было столкнуться с многочисленными трудностями.

Например, с утечкой высокоактивной воды. Тем более, что высота столба этой воды при полном заполнении реактора должна была достигать ~ 30м, создавая статическое давление внизу контейнента около 3 атмосфер.

Согласно некоторым оценкам даже при небольшом землетрясении контеймент, наполненный водой, испытавший перед этим воздействие повышенной температуры и взрывной волны должен разрушиться.

Подвергалась сомнению возможность эффективно управлять дистанционной техникой в недостаточно прозрачной среде и т.п.

В «Техническом стратегическом плане 2017 года», выпущенном в августе 2017г. [Ф99] NDF<sup>86</sup>, предлагаются и подробно обсуждаются уже три возможных варианта извлечения топлива из блоков F-1.<sup>87</sup>

---

<sup>86</sup> NDF - «Государственный фонд по выплатам компенсаций и оказанию помощи при демонтаже реакторов после аварий на атомных станциях» (*Nuclear Damage Compensation and Decommissioning Facilitation Corporation*). Фонд был создан в сентябре 2011 г. Правительством Японии. Являясь консультативным органом, NDF выдает рекомендации по удалению топлива из пострадавших реакторов F-1. В обязанности NDF также входят вопросы утилизации радиоактивных отходов и содействие в выплатах компенсаций ущерба пострадавшим из-за атомной аварии F-1.

«Технический стратегический план 2017 года» содержит около 300 страниц текста и иллюстраций и носит достаточно общий и рекомендательный характер.

<sup>87</sup> Это варианты назывались приоритетными и в Стратегических планах, опубликованных в 2015 и 2016 годах.



Во-первых, «Полное погружение» и удаления топлива через верхнюю часть корпуса, во-вторых, удаление ТСМ через верхнюю часть корпуса при «частичном погружении» и, наконец, удаление ТСМ через отверстие, сделанное в боковой стенке контейнента (при «частичном погружении») (см. рис. 168)..

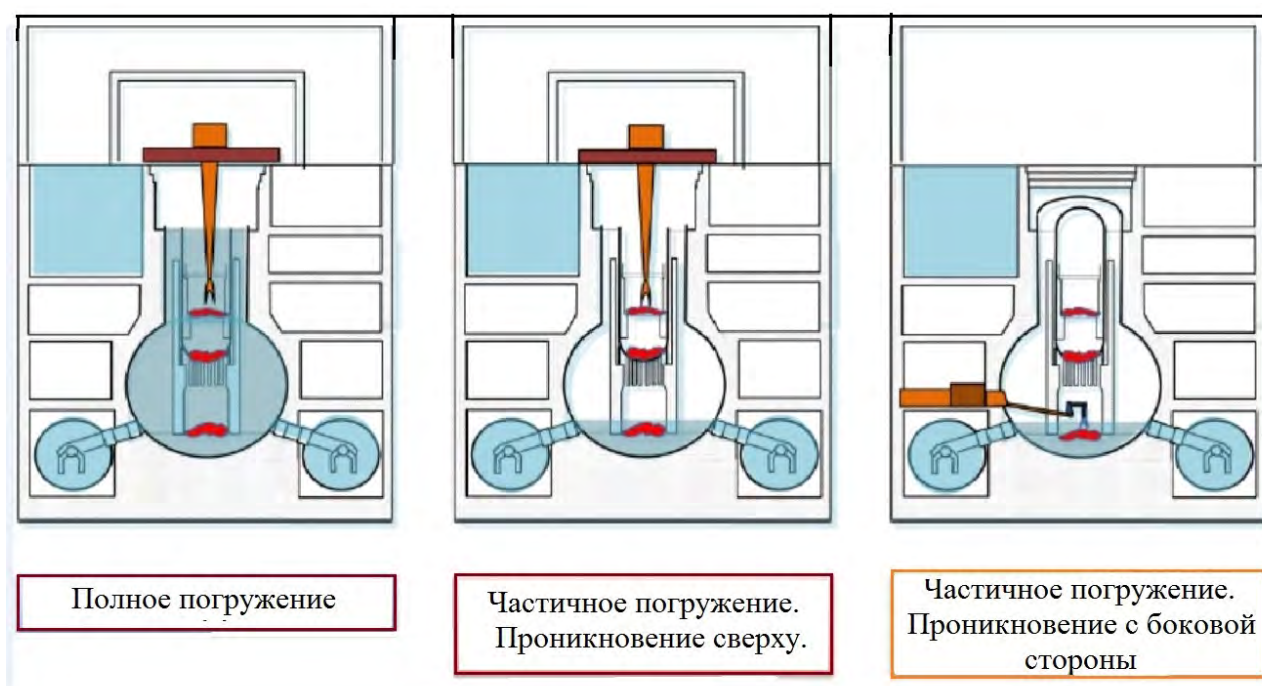


Рис. 168. Предлагаемые в «Техническом стратегическом плане 2017 года» способы извлечения ТСМ из 1 – 3 блоков F-1.

В вариантах, когда проникновение к ТСМ осуществляется «сверху» предполагается, что основная часть оборудования и устройств для извлечения и перегрузки располагается на восстановленном и очищенном операционном этаже в дополнительно оборудованном герметичном помещении. К моменту выхода работы [Ф99] специалисты провели предварительные оценки сейсмической безопасности (устойчивости при землетрясениях) конструкций контейнента при полном и частичном заполнении его водой, с учетом возможных повреждений при аварии и деградации за 40 лет эксплуатации. Они дали оптимистические результаты, но работа должна быть продолжена.

Частичное погружение<sup>88</sup> означает, что защитные свойства слоя воды будут использоваться только тогда, когда ТСМ находятся на дне контейнента. Поэтому два последних варианта извлечения в начальный период потребуют дополнительного охлаждения извлекаемых масс<sup>89</sup>. Для предотвращения выхода за пределы рабочих помещений радиоактивных аэрозолей предлагается поддерживать в них пониженное давление, заполнение азотом и т. п. В варианте проникновения через боковую стенку в контейнент (через проход<sup>90</sup>) необходимо построить специальное рабочее помещение, позволяющее избежать утечки радиоактивных веществ. В этом помещении можно поместить робота с рукой-манипулятором. Дистанционно управляемый механизм мог бы через проход проникнуть манипулятором в контейнент и сначала отбирать пробы, а затем начать извлекать ТСМ (рис. 169)

При обсуждении стратегии извлечения особое внимание уделяется безопасности проведения работ. Не только радиационной, но и ядерной. Так отмечается, что при попадании скопления ТСМ в воду или изменении их формы в процессе извлечения необходимо контролировать

<sup>88</sup> В 3 блоке необходимо предварительно понизить уровень воды.

<sup>89</sup> Отработавшее топливо обычно требует хранения в БВ в течение 5 лет, после чего может перемещаться в сухое хранилище, где также требует принятия специальных мер для охлаждения.

<sup>90</sup> Для маршрута доступа со стороны может быть приспособлен один из существующих тоннелей, например, использующийся для кассет СУЗ.

критичность этого скопления. Хотя возможность повышения такой характеристики и представляется маловероятным.

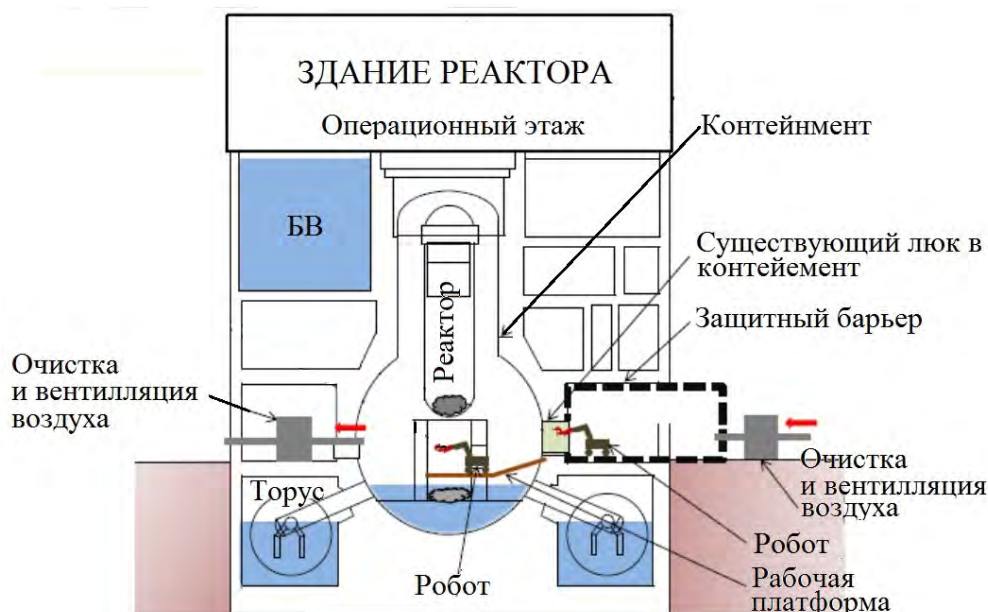


Рис. 169. Проникновение с боковой стороны.

Для полной очистки блока от ТСМ возможно использовать проникновение как сверху, так и с боковой стороны (см., например, [Ф100]).

Прежде чем удалять скопления топливных материалов и радиоактивные конструкции, находящиеся в реакторе и контейменте, предстоит выполнить большие по объему и сложные работы по их фрагментации,

Серьезные трудности предстоит преодолеть и при очистке поверхностей от наплывов высокоактивных застывших ТСМ. Рассматриваются несколько основных типов измельчения таких материалов: с помощью лазера, плазменной резки, гидравлической резки и механические - дроблением и бурением.

Выбор и обоснование метода извлечения предполагается сделать в 2019г., а к работам в этом направлении приступить в 2021г. (см. рис. 170).



Рис. 170. Предполагаемый график выполнения работ.

В настоящее время (начало 2019г.) предполагается, в первую очередь, провести извлечение ТСМ, используя боковой проход. Поскольку метод «проникновения сверху» требует оборудования на операционном этаже большого герметичного помещения, что может помешать запланированным работам по удалению отработавшего топлива.

## 2.19. ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОБ.

Извлечение и дальнейшее обращение с ТСМ требует знания их механических, химических и радиационных свойств. А это подразумевает организацию отбора и исследования многочисленных проб этих материалов. В разделе 2.16. , где речь шла о дальнейших планах по поиску мест нахождения кориума в блоках F-1, уже говорилось о том, что в сейчас количество этих проб совершенно не достаточно и обсуждались необходимые меры по исправлению этого недостатка.



Рис. 76. Расположение и состав «Центра анализа и исследований радиоактивных материалов» в городе Окума (у территории F-1).



В настоящее время Japan Atomic Energy Agency (JAEA) создает «Центр анализа и исследований» в Окуме, рядом с площадкой F-1 (рис. 171). Он располагается в трех зданиях: административном корпусе, лаборатории-1 и лаборатории-2. Лаборатория-1 предназначена для работы с образцами низкой и средней активности, на поверхности которых МЭД составляет менее 1 Зв/ч. В лаборатории-2 будут исследовать образцы высокой активности, имеющими МЭД более 1 Зв/ч на поверхности.

Детальное проектирование центра началось летом 2016 года, а строительство в апреле 2017 г. Предполагается, что работать он начнет в конце 2019, начале 2020г.

Будут изучаться формы и размеры отдельных образцов, проводиться определение их механических характеристик, анализы химического и радионуклидного состава, возможности образования критических композиций и т.п.

Чтобы лучше понять состав образовавшихся при аварии ТСМ и провести предварительный отбор методов для их извлечения с 2016г. в лаборатории JAEA начали проводиться эксперименты моделирующие взаимодействие расплавленного топлива с бетоном (программа MCCI - Molten-Core-Concrete-Interaction). Образцы топлива из оксида урана нагревались вместе с конструкционными материалами реактора и бетоном. После образования различных по составу топливных композиций изучались их свойства, в частности, критические параметры (см., например, [101]).

В лаборатории СЕА во Франции в период между 2016-2017 годами были смоделированы образцы ТСМ различного состава. Это позволило изучить их свойства и испытать на образцах возможности лазерной резки образцов [Ф102].

Согласно существующим оценкам извлечение топлива из аварийных блоков продлится около 40 лет. За это время могут происходить существенные изменения в состоянии ТСМ. Например, их диспергирование под действием внешних условий или внутреннего облучения. Это скажется на условиях извлечения и дальнейшего хранения образцов.

В конце января 2018г. консорциум предприятий Росатома по итогам тендера был выбран исполнителем работ в рамках субсидируемого японским правительством проекта по разработке анализа изменения со временем свойств кориума на аварийных блоках Фукусимы-1.

«Предполагается изготовить модельные «фукусимские образцы», имитирующие реальные фрагменты кориума, провести их испытания по программе так называемого «ускоренного старения», определить динамику изменения свойств образцов в зависимости от времени их старения, внутреннего ионизирующего облучения, влияния химических реакций на их поверхности.

Далее предстоит подтвердить достоверность полученных экспериментальных данных по их соответствию экспериментальным данным, полученным в свое время при изучении топливосодержащих материалов с аварийного энергоблока Чернобыльской АЭС, и выяснить, в какой степени тот или иной фактор (ионизирующее излучение и химические реакции) влияют на процесс деградации «фукусимских образцов».

Затем надо разработать прогнозную модель изменения со временем (с шагом примерно в 10 лет) основных свойств этих образцов и разработать рекомендации по ее применению для оценки изменения ключевых параметров реальных топливосодержащих материалов АЭС Фукусима-1 при их хранении в специальных контейнерах» (см.[Ф103 – Ф104]).

## 2.20. ПЕРВЫЕ РАБОТЫ 2019г.

В соответствии с планами дальнейших исследований (см. раздел 2.16.) в начале 2019г. робот - зонд, оснащенный 3-сантиметровыми захватами (рис. 172), дозиметром и телекамерой, был введен в контеймент 2-го блока через тоннель Х-6.

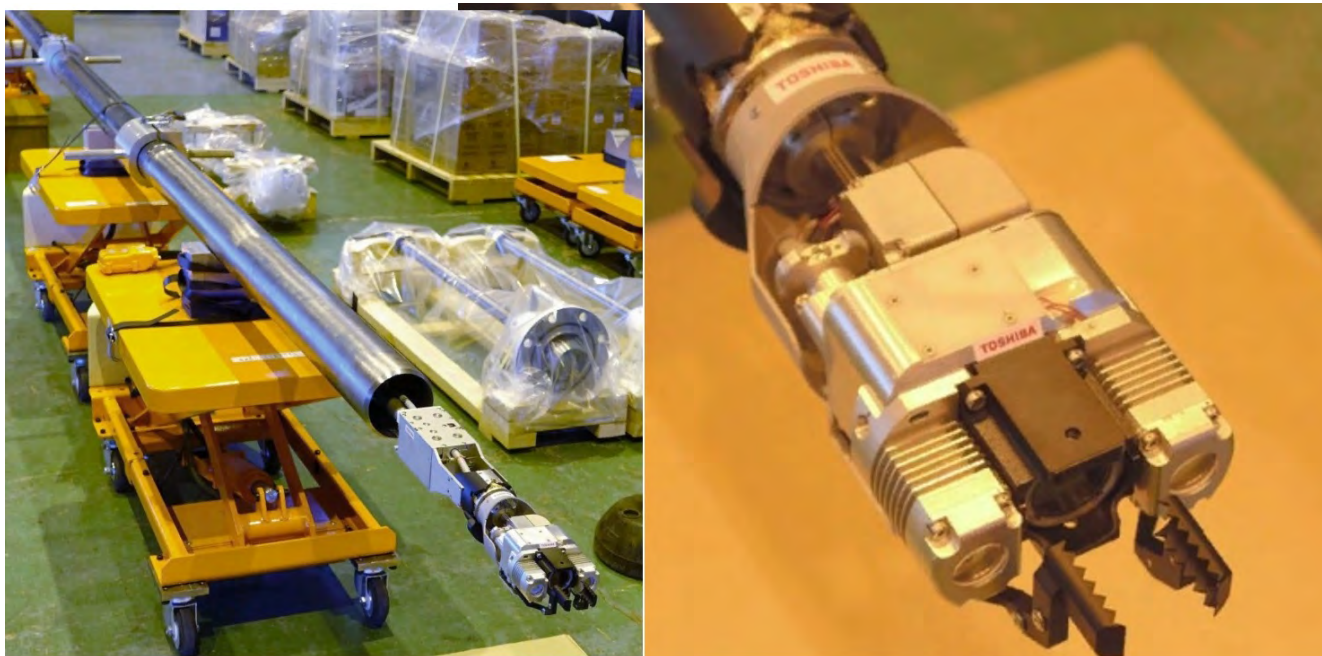


Рис. 172. Общий вид робота – зонда и головная (опускаемая) его часть перед началом работы.

Операторы дистанционно управляли им из здания, расположенного рядом с реакторным блоком (Рис. 173).



Рис. 173. Пульта управления роботом – зондом.

Сеанс работы продолжался около 8 часов и за (рис. 174) это время удалось захватить и поднять над поверхностью отложений (на высоту ~ 5см) пять небольших, похожих на гравий, кусочков ТСМ. Извлекать их из реактора не стали.

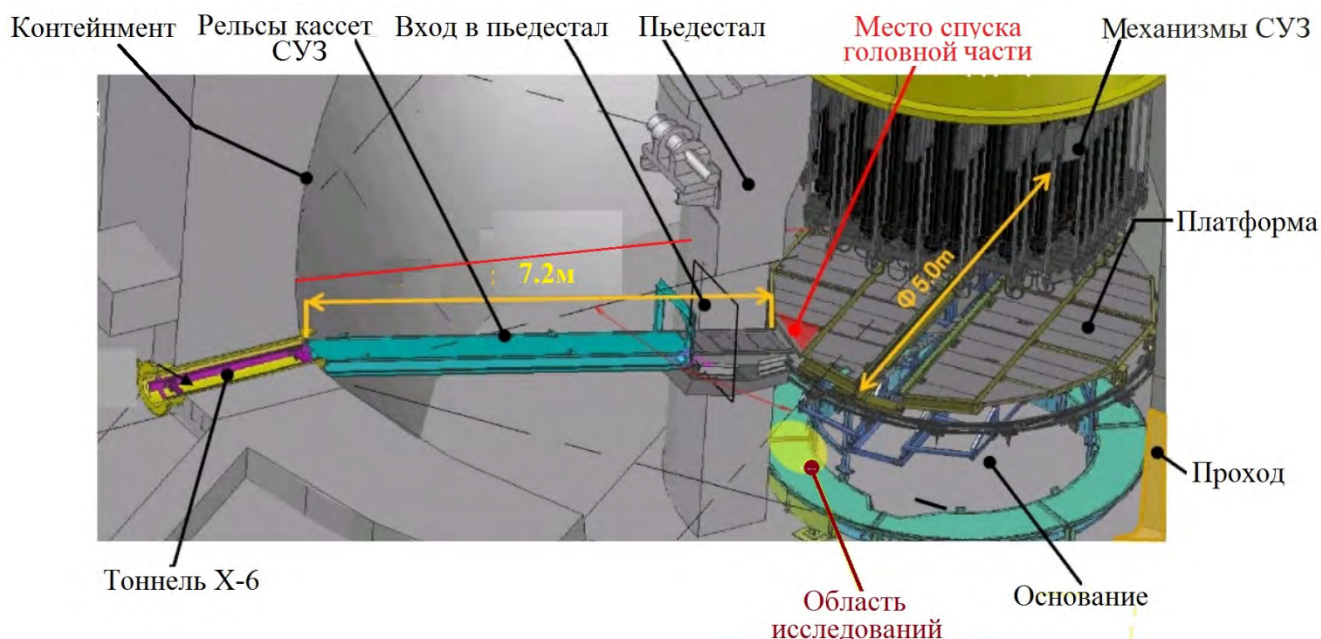


Рис. 174. Путь робота- зонда, место спуска его головной части и область исследований.

«До сих пор мы могли наблюдать сами отложения, а нам необходимо было определить можно ли взять из них пробы» - сообщил представитель Toshiba. «Теперь можно планировать отбор и исследование образцов ТСМ. И это является следующим ключевым шагом исследований»<sup>91</sup>.

Предполагается, что такие характеристики отложений, как состав, радиоактивность, твердость и т.п. будут использоваться для разработки оборудования и контейнеров при их окончательном удалении.

Как сообщили в ТЕРСО извлечение проб ожидается в 2019г.

## 2.21. НЕКОТОРЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ.

В заключение обзора состояния работ на F-1 авторы хотели бы сделать несколько замечаний.

1. Одна из целей настоящего раздела - дать представление о большом объеме работы, который за прошедшие 8 лет выполнен японскими специалистами для ответа на вопросы о том где находятся основные массы ТСМ и какими основными свойствами (существенными для их извлечения и дальнейшего хранения) они обладают. Следует отметить, что к концу 2018г. на этом пути были получены только первые результаты<sup>92</sup>. Поэтому назначенный сейчас срок начала извлечения основных масс ТСМ – 2021 год представляется излишне оптимистичным.

<sup>91</sup> Специалисты ТЕРСО планируют начать массово отбирать пробы в начале 2020 года.

<sup>92</sup> В качестве одного из примеров того, какие неожиданности могут ожидать исследователей и как трудно будет получить информацию на сформулированные выше вопросы можно обратиться к работе [Ф105], опубликованной в конце ноября 2015г. В ней рассматривается вероятность проникновения кориума, образовавшегося в результате аварии на 1-ом блоке в «Торус». Показано, что такая вероятность существует.



2. В ситуации, когда неизвестно откуда и что именно предстоит извлекать достаточно много работ, в которых детально обсуждаются трудности извлечения, выглядят преждевременными. Поэтому мы подробно на них не останавливались.

3. При изучении попыток определить местоположения ТСМ в разрушенных блоках F-1 можно сделать вывод, что основных успехов удалось достичь не с помощью сложных и очень дорогих роботов, которые самостоятельно передвигались по помещениям («Скорпион» и др.) и застревали в них. Наиболее важная информация была получена при использовании более простых и «грубых» средств - роботов-зондов.

В какой-то мере это перекликается с применением длинных штанг, оснащенных приборами, которые вводились в пробуренные скважины, при поисках топлива на ЧАЭС.

