

**серия изданий по
серия изданий по
безопасности
безопасности**

№ 75-INSAG-1

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНСУЛЬТАТИВНАЯ ГРУППА ПО БЕЗОПАСНОСТИ АЭС

**Итоговый доклад о совещании по
рассмотрению причин и последствий
аварии в Чернобыле**

**ИТОГОВЫЙ ДОКЛАД О СОВЕЩАНИИ ПО
РАССМОТРЕНИЮ ПРИЧИН И ПОСЛЕДСТВИЙ
АВАРИИ В ЧЕРНОБЫЛЕ**

**Доклад Международной
консультативной группы по ядерной безопасности**

Членами Международного агентства по атомной энергии являются следующие государства:

АВСТРАЛИЯ	КАНАДА	ПОЛЬША
АВСТРИЯ	КАТАР	ПОРТУГАЛИЯ
АЛБАНИЯ	КЕНИЯ	РУМЫНИЯ
АЛЖИР	КИПР	САЛЬВАДОР
АРГЕНТИНА	КИТАЙ	САУДОВСКАЯ АРАВИЯ
АФГАНИСТАН	КОЛУМБИЯ	СЕНЕГАЛ
БАНГЛАДЕШ	КОРЕЙСКАЯ НАРОДНО- ДЕМОКРАТИЧЕСКАЯ РЕСПУБЛИКА	СИНГАПУР
БЕЛОРУССКАЯ СОВЕТСКАЯ СОЦИАЛИСТИЧЕСКАЯ РЕСПУБЛИКА	КОРЕЙСКАЯ РЕСПУБЛИКА	СИРИЙСКАЯ АРАБСКАЯ РЕСПУБЛИКА
БЕЛЬГИЯ	КОСТА-РИКА	СОЕДИНЕННОЕ КОРОЛЕВСТВО
БИРМА	КОТ д'ИВУАР	ВЕЛИКОБРИТАНИИ И СЕВЕРНОЙ ИРЛАНДИИ
БОЛГАРИЯ	КУБА	СОЕДИНЕННЫЕ ШТАТЫ АМЕРИКИ
БОЛИВИЯ	КУВЕЙТ	СОЮЗ СОВЕТСКИХ СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ РЕСПУБЛИК
БРАЗИЛИЯ	ЛИБЕРИЯ	СУДАН
ВЕНГРИЯ	ЛИВАН	СЬЕРРА-ЛЕОНЕ
ВЕНЕСУЭЛА	ЛИВИЙСКАЯ АРАБСКАЯ ДЖАМАХИРИЯ	ТАИЛАНД
ВЬЕТНАМ	ЛИХТЕНШТЕЙН	ТУНИС
ГАБОН	ЛЮКСЕМБУРГ	ТУРЦИЯ
ГАИТИ	МАВРИКИЙ	УГАЙДА
ГАНА	МАДАГАСКАР	УКРАИНСКАЯ СОВЕТСКАЯ СОЦИАЛИСТИЧЕСКАЯ РЕСПУБЛИКА
ГВАТЕМАЛА	МАЛАЙЗИЯ	УРУГВАЙ
ГЕРМАНСКАЯ ДЕМОКРАТИЧЕСКАЯ РЕСПУБЛИКА	МАЛИ	ФЕДЕРАТИВНАЯ РЕСПУБЛИКА ГЕРМАНИИ
ГРЕЦИЯ	МАРОККО	ФИЛИППИНЫ
ДАНИЯ	МЕКСИКА	ФИНЛЯНДИЯ
ДЕМОКРАТИЧЕСКАЯ КАМПУЧИЯ	МОНАКО	ФРАНЦИЯ
ДОМИНИКАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА	МОНГОЛИЯ	ЧЕХОСЛОВАЦКАЯ СОЦИАЛИСТИЧЕСКАЯ РЕСПУБЛИКА
ЕГИПЕТ	НАМИБИЯ	ЧИЛИ
ЗАИР	НИГЕР	ШВЕЙЦАРИЯ
ЗАМБИЯ	НИГЕРИЯ	ШВЕЦИЯ
ЗИМБАБВЕ	НИДЕРЛАНДЫ	ШРИ ЛАНКА
ИЗРАИЛЬ	НИКАРАГУА	ЭКВАДОР
ИНДИЯ	НОВАЯ ЗЕЛАНДИЯ	ЭФИОПИЯ
ИНДОНЕЗИЯ	НОРВЕГИЯ	ЮГОСЛАВИЯ
ИОРДАНИЯ	ОБЪЕДИНЕННАЯ РЕСПУБЛИКА	ЮЖНАЯ АФРИКА
ИРАК	ТАНЗАНИЯ	ЯМАЙКА
ИРАН, ИСЛАМСКАЯ РЕСПУБЛИКА	ОБЪЕДИНЕННЫЕ АРАБСКИЕ ЭМИРАТЫ	ЯПОНИЯ
ИРЛАНДИЯ	ПАКИСТАН	
ИСЛАНДИЯ	ПАНАМА	
ИСПАНИЯ	ПАПСКИЙ ПРЕСТОЛ	
ИТАЛИЯ	ПАРАГВАЙ	
КАМЕРУН	ПЕРУ	

Устав Агентства был утвержден 23 октября 1956 года на Конференции по выработке Устава МАГАТЭ, которая состоялась в Центральных учреждениях Организации Объединенных Наций в Нью-Йорке. Устав вступил в силу 29 июля 1957 года. Центральные учреждения Агентства находятся в Вене. Главной целью Агентства является достижение "более скорого и широкого использования атомной энергии для поддержания мира, здоровья и благосостояния во всем мире".

© МАГАТЭ, 1988

Запросы о разрешении на переиздание или перевод информации, содержащейся в данной публикации, направлять в письменном виде по адресу: Международное агентство по атомной энергии, Wagramerstrasse 5, P.O. Box 100, A-1400 Vienna, Austria.

Отпечатано МАГАТЭ в Австрии
Апрель 1988

**ИТОГОВЫЙ ДОКЛАД О СОВЕЩАНИИ ПО
РАССМОТРЕНИЮ ПРИЧИН И ПОСЛЕДСТВИЙ
АВАРИИ В ЧЕРНОБЫЛЕ**

**Доклад Международной
консультативной группы по ядерной безопасности**

**МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ
ВЕНА, 1988**

Международная консультативная группа по ядерной безопасности (МКГЯБ) является консультативной группой при Генеральном директоре Международного агентства по атомной энергии, основные функции которой заключаются в следующем:

- (1) обеспечивать форум для обмена информацией по общим вопросам ядерной безопасности, имеющим международное значение;
- (2) выявлять важные современные вопросы ядерной безопасности и формулировать выводы на основе результатов деятельности в области ядерной безопасности в рамках МАГАТЭ и на основе другой информации;
- (3) консультировать по вопросам ядерной безопасности, в отношении которых может потребоваться обмен информацией и (или) дополнительная деятельность;
- (4) формулировать общепринятые концепции безопасности там, где это возможно.

**ЭТОТ ВЫПУСК СЕРИИ ИЗДАНИЙ ПО БЕЗОПАСНОСТИ ОПУБЛИКОВАН
ТАКЖЕ НА АНГЛИЙСКОМ, ИСПАНСКОМ И ФРАНЦУЗСКОМ ЯЗЫКАХ**

**ИТОГОВЫЙ ДОКЛАД О СОВЕЩАНИИ ПО РАССМОТРЕНИЮ
ПРИЧИН И ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИИ В ЧЕРНОБЫЛЕ**

МАГАТЭ, ВЕНА, 1988

STI/PUB/740

ISBN 92 0 422088 4

ПРЕДИСЛОВИЕ

Генерального директора

Одна из главных функций Международного агентства по атомной энергии — служить в качестве форума, где государства-члены могут учиться на опыте других и сотрудничать в деле мирного использования ядерной энергии. Во время моего визита в Москву 9 мая 1986 г. СССР выразил готовность предоставить МАГАТЭ информацию относительно аварии в Чернобыле. 21 мая Совет управляющих принял решение созвать для обсуждения аварии заседание экспертов по вопросам ядерной безопасности. Было решено также, что результаты этого совещания и рекомендации относительно дальнейших действий МАГАТЭ должны быть переданы Совету управляющих перед его сессией в сентябре 1986 г., чтобы содействовать государствам-членам МАГАТЭ в изучении опыта этой аварии и таким образом повысить безопасность в ядерной энергетике.

Совещание по рассмотрению причин и последствий аварии проходило в Вене 25—29 августа 1986 года под председательством швейцарского ученого-ядерщика, бывшего заместителя Генерального директора МАГАТЭ, г-на Р. Рометча.

Я обратился с просьбой к МКГЯБ (Международной консультативной группе по ядерной безопасности) принять участие в этом совещании и подготовить доклад, обобщающий полученную информацию и результаты дискуссий на совещании, а также содержащий рекомендации МКГЯБ относительно дальнейших действий.

Большое число экспертов из государств-членов МАГАТЭ и из других международных организаций приняли участие в работе совещания. Они получили от советских экспертов подробную информацию об аварии и использовали свои знания в обсуждении конкретных вопросов, а также способствовали разработке конкретных предложений по результатам совещания. В течение недели после совещания МКГЯБ эксперты-консультанты подготовили в соответствии с моей просьбой этот доклад, опираясь на помощь назначенных МАГАТЭ экспертов по широкому кругу вопросов ядерной безопасности и радиационной защиты, а также ряда советских экспертов, привлеченных к работе МКГЯБ.

Активная дискуссия между экспертами в ходе этого недельного совещания привела, как указывается в докладе МКГЯБ, к воссозданию более ясной картины эволюции аварии и ее последствий, что отражено в докладе. С учетом предложений, выдвинутых в ходе совещания в свете большего понимания аварии, МКГЯБ представляет в докладе свои рекомендации относительно дальнейших мероприятий.

Некоторые мероприятия предполагают сотрудничество между МАГАТЭ и другими международными организациями, такими как ВОЗ, ВМО, ФАО и НКДАР ООН, и уже намечено обсудить вопросы организации такого сотрудничества.

В докладе МКГЯБ, который не подменяет подготовленные советскими экспертами рабочие документы, синтезированы и сведены воедино письменные и устные доклады советских экспертов и результаты дискуссий между участниками, с тем чтобы авария и ее последствия могли быть поняты техническими специалистами и нетех-

ническими мыслящими политиками. Таким образом, доклад может служить в качестве важного исходного материала для дальнейшего рассмотрения значения аварии в Чернобыле.

Доклад МКГЯБ закладывает прочную основу для действий, которые, по моему мнению, мы должны осуществлять, не дожидаясь выводов, которые будут сделаны в дальнейшем. Как мне представляется, МАГАТЭ должно сейчас действовать в предложенных МКГЯБ направлениях без промедления, с тем чтобы расширить программу ядерной безопасности и радиационной защиты. Я считаю, что Совет управляющих сочтет данный доклад информативным и полезным при оценке планов наших мероприятий.

Я хотел бы выразить благодарность всем, кто работал столь активно над составлением этого доклада: председателю и другим членам МКГЯБ, экспертам—консультантам МКГЯБ, экспертам, назначенным МАГАТЭ, советским экспертам, которые были привлечены к работе МКГЯБ, техническим сотрудникам МАГАТЭ и другим сотрудникам, оказавшим большую помощь.

Отдавая себе отчет в том, сколь серьезными могут быть последствия ошибок в ядерной области, жизненно важно тщательно изучить каждую ошибку и извлечь из нее уроки. Все, кто участвовал в работе совещания по рассмотрению причин и последствий аварии в Чернобыле и подготовке данного доклада, способствовали проведению тщательного исследования и позволили всем нам извлечь серьезные уроки из печального опыта Чернобыля, содействуя тем самым укреплению ядерной безопасности.

ПРИМЕЧАНИЕ РЕДАКЦИИ

Упоминание определенных компаний или их изделий или фирменных названий не подразумевает какого-либо одобрения или рекомендации со стороны МАГАТЭ.

СОДЕРЖАНИЕ

КРАТКИЙ ОБЗОР	1
1. Введение	1
2. Совещание по рассмотрению причин и последствий аварии	1
3. Доклад МКГЯБ	2
4. Описание четвертого блока Чернобыльской АЭС	2
5. Описание аварии	3
6. Оперативные действия на площадке АЭС	4
7. Выброс радионуклидов	5
8. Перенос радионуклидов через окружающую среду и облучение отдельных лиц из числа населения	6
9. Последствия для здоровья	6
10. Ликвидация последствий аварии и дезактивация	7
11. Общие замечания и выводы	8
ВВЕДЕНИЕ	13
1. Цель настоящего доклада	13
2. Рассматриваемые в докладе вопросы	13
3. Подготовка доклада	14
Раздел I: АВАРИЯ НА БЛОКЕ №4 ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС	15
1. Обзор обстоятельств аварии	15
2. Описание событий	17
3. Хронология событий	27
4. Главные факторы, способствовавшие возникновению аварии	28
5. Меры по улучшению безопасности	30
6. Уроки и рекомендации	31
Раздел II: ВЫБРОС РАДИОНУКЛИДОВ В ПРОЦЕССЕ АВАРИИ	33
1. Представленная Советским Союзом информация о выбросе	33
2. Рассмотрение выброса с точки зрения его механизма	37
3. Удержание выброшенных веществ	39
4. Методы оценки характеристик радиоактивного выброса при крупных авариях в свете выбросов радионуклидов в Чернобыле	40
5. Рекомендации относительно работы по результатам совещания и деятельности, предполагающей международное сотрудничество	41
Раздел III: МЕРОПРИЯТИЯ НА ПЛОЩАДКЕ	45
1. Борьба с пожаром	46
2. Меры по ликвидации последствий аварии	47
3. Фундаментальная оценка мероприятий по ликвидации аварии	48

4. Радиологическое исследование площадки	49
5. Очистка площадки	51
6. Робототехника	51
7. Диагностические приборы	51
8. Консервация поврежденного блока	52
Раздел IV: АСПЕКТЫ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В СВЯЗИ С	
АВАРИЕЙ	57
1. Введение	57
2. Первоначальные противоаварийные мероприятия в пределах площадки ..	57
3. Противоаварийные мероприятия за пределами площадки	58
4. Дезактивация	61
5. Перемещение радионуклидов и дозы облучения населения	63
6. Последствия для здоровья	67
Раздел V: ПРОБЛЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ, ТРЕБУЮЩИЕ ДАЛЬНЕЙШЕГО	
ОБСУЖДЕНИЯ	73
Проблема № 1. Оценка регламентов безопасности	73
Проблема № 2. Рабочий анализ последовательности событий при аварии	73
Проблема № 3. Реальность создания защитной обложки, способной выдержать такую аварию	74
Проблема № 4. Значение взаимодействия "человек—машина" для точного определения начала аварии	74
Проблема № 5. Совершенствование теоретических знаний для оценки "характеристик радиоактивного выброса"	75
Проблема № 6. Меры по ликвидации аварий на площадке	75
Проблема № 7. Опыт в области эксплуатационной безопасности	76
Проблема № 8. Дезактивация площадки	76
Проблема № 9. Модели прогнозирования рассеивания радионуклидов	76
Проблема №10. Радиационная защита	77
Раздел VI: ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ВЫВОДЫ	79
A. Ядерная безопасность	80
1. <i>Не выявлено никаких новых физических явлений</i>	<i>80</i>
2. <i>Необходимо создать "культуру безопасности" на всех действующих АЭС ..</i>	<i>80</i>
3. <i>Проекты реакторов должны действительно воплощать концепцию</i> <i>эшелонированной защиты</i>	<i>81</i>
4. <i>Вновь подчеркнуто значение удовлетворительного взаимодействия</i> <i>человека и машины</i>	<i>81</i>
B. Радиационная защита	82
1. <i>Оперативное принятие мер</i>	<i>82</i>
2. <i>Выброс радионуклидов</i>	<i>83</i>

3. Перенос радионуклидов и облучение населения	84
4. Поздние стохастические последствия для здоровья	84
5. Дезактивация	85
С. Итоговое заключение	85
Раздел VII: РЕКОМЕНДАЦИИ	87
А. Ядерная безопасность	87
1. Проведение дальнейших исследований с учетом принятых решений	87
2. Дальнейшая деятельность МАГАТЭ и другие международные мероприятия	87
В. Радиационная защита	89
1. Меры по выполнению принятых решений	89
2. Дальнейшая деятельность МАГАТЭ и другие международные мероприятия	89
С. Общие замечания	91
Приложение: РЕАКТОРЫ РБМК 3-ГО и 4-ГО БЛОКОВ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ	93
1. История эксплуатации реакторов РБМК-1000	93
2. Общее описание площадки Чернобыльской станции и особенности конструкции реакторов РБМК-1000	93
3. Система безопасности	103
СПИСОК УЧАСТНИКОВ	109

КРАТКИЙ ОБЗОР

1. ВВЕДЕНИЕ

26 апреля 1986 года в 1 час 23 мин на четвертом блоке Чернобыльской АЭС, расположенной на территории Украинской ССР в Советском Союзе произошла авария, которая привела к разрушению активной зоны реактора и части здания, в котором он расположен. Большие количества радиоактивных веществ активной зоны реактора были выброшены из здания в окружающую среду. Из-за выброса раскаленных веществ начались пожары, что осложнило ситуацию и привело к подъему еще большего количества радиоактивных веществ на большую высоту в воздух. Мужественные действия советских аварийных бригад, начавшиеся сразу же после аварии и продолжавшиеся на протяжении последующих нескольких дней, эффективно снизили этот дополнительный выброс радиоактивных веществ. 31 человек эксплуатационного персонала станции и аварийных бригад отдали свои жизни, чтобы остановить выбросы и смягчить последствия аварии.

Большая часть выброшенных радиоактивных веществ переносилась в форме газов и частиц пыли воздушными потоками. В результате радиоактивные вещества рассеялись на большие расстояния, причем большая часть из них осталась на территории Советского Союза.

2. СОВЕЩАНИЕ ПО РАССМОТРЕНИЮ ПРИЧИН И ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИИ

МАГАТЭ и Советский Союз договорились провести в Вене совещание по рассмотрению причин и последствий аварии. Это совещание проходило с 25 по 29 августа 1986 года.

На совещании ведущие советские ученые и инженеры-ядерщики представили доклад, в котором содержались основная техническая информация о Чернобыльской АЭС, описание причин аварии, последовательность событий во время аварии, ее последствия и принятые контрмеры. Советские эксперты также рассказали о технических, медицинских программах и о программах по исследованию окружающей среды, начатых после аварии. Эти исследования должны дать новую информацию относительно рисков, связанных с ядерной энергетикой, и воздействия ионизирующего излучения на здоровье человека.

Откровенное и открытое изложение материалов советскими экспертами было хорошо встречено участниками. По общему мнению, результаты совещания превзошли ожидания. После выступлений советских участников было задано много вопросов в письменном виде, отражающих желание уточнить некоторые подробности, которые необходимы для того, чтобы можно было воспользоваться полученной информацией.

Было продемонстрировано общее мнение относительно необходимости укрепления международного сотрудничества в области ядерной и радиационной безопасности. Пред-

ставляется, что проведенные обсуждения смогли помочь советским экспертам в планировании необходимой исследовательской программы.

3. ДОКЛАД МКГЯБ

Генеральный директор МАГАТЭ предложил Международной консультативной группе по ядерной безопасности (МКГЯБ) подготовить на основе представленной и обсужденной информации и дискуссии краткий доклад о работе совещания. Он также высказал просьбу, чтобы этот доклад был представлен ему для рассмотрения и передачи Совету управляющих МАГАТЭ до начала его заседания в сентябре. Доклад также должен был содержать рекомендации МКГЯБ, касающиеся дальнейшей деятельности.

Основная часть этого доклада взята из хорошо подготовленной информации, представленной советскими экспертами на совещание (подготовленные Государственным комитетом по использованию атомной энергии СССР рабочие документы "Авария на Чернобыльской АЭС и ее последствия", информация представлена на совещание экспертов МАГАТЭ, проходившего с 25 по 29 августа 1986 года в г. Вене), а также из дополнительного материала, представленного советскими экспертами во время совещания (диапозитивы совещания по рассмотрению причин и последствий аварий, части I и II). Этот материал вряд ли может быть еще более сжато представлен в данном кратком обзоре; приведены только основные моменты. Доклад МКГЯБ содержит обобщенные результаты многих полезных обсуждений на заседаниях рабочей группы, проведенных между советскими экспертами и приглашенными специалистами, назначенными МАГАТЭ специалистами для обсуждения, экспертами из состава персонала МАГАТЭ и, наконец, самими членами МКГЯБ. В результате этого появилось более четкое понимание, хотя часть из сообщенной информации является предварительной, вследствие имеющихся на этой ранней стадии неопределенностей относительно подробностей. В самом деле было бы удивительным, если бы этот доклад, изданный после столь короткого времени для подготовки и в то время, когда многие вопросы все еще требуют своего анализа, оказался бы точным во всех деталях. МКГЯБ поэтому пришлось взять на себя ответственность в формулировании выводов и рекомендаций, касающихся дальнейшей деятельности. Основная задача этого доклада и состоит в том, чтобы изложить эти предварительные выводы и рекомендации, подготовленные на основании имеющейся информации, которая все еще носит предварительный характер. Тем не менее, доклад отражает консенсус членов МКГЯБ.

4. ОПИСАНИЕ ЧЕТВЕРТОГО БЛОКА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС

Четвертый блок Чернобыльской АЭС, с рабочей мощностью 1000 МВт (эл.), 3200 МВт (тепл.) является одним из 15 реакторов типа РБМК, эксплуатируемых в

Советском Союзе. В Чернобыле в эксплуатации находились четыре реактора, и два других реактора находятся в стадии строительства. Реакторы РБМК обычно строятся парно, при двух блоках, занимающих противоположные стороны единого комплекса постройки. Блоки №№3 и 4 Чернобыльской АЭС объединены подобным образом и связаны с некоторыми общими системами станции.

Реактор является реактором с графитовым замедлителем и с каналом под давлением. Он охлаждается посредством циркуляции легкой воды, которая достигает температуры кипения в верхних участках вертикальных герметичных труб для производства пара. Пар образуется в двух петлях охлаждения, к каждой из которых подключено по 840 топливных каналов, два пара, четыре циркуляционных насоса и соответствующее оборудование. Сепараторы пара подают пар непосредственно на два электрических турбогенератора по 500 мегаватт, каждый из них снабжен конденсатором и системой питательной воды. Перегрузка реактора осуществляется на мощности при использовании специальной перегрузочной машины.

Основная часть контура теплоносителя находится в нескольких герметичных помещениях. Эти помещения соединены с заполненными водой системами подавления, расположенными ниже реактора, для отвода и конденсации пара, который может попасть в помещение вследствие любой утечки теплоносителя.

Существенное отличие представляет собой верхняя часть реактора, особенно верхний и нижний узлы на каналах, предназначенные для выгрузки и загрузки топлива и расположенные над активной зоной. При равномерном облучении топлива реактор РБМК обладает положительным паровым коэффициентом реактивности. Однако температурный коэффициент топлива отрицателен, и чистый эффект от изменения мощности зависит от уровня мощности. При нормальных условиях эксплуатации чистый эффект (мощностной коэффициент) при полной мощности является отрицательным и становится положительным при снижении мощности ниже приблизительно 20% от полной. Эксплуатация реактора на мощности ниже 700 МВт(тепл.) ограничивается правилами эксплуатации ввиду проблем, связанных с поддержанием теплогидравлических параметров в нормальном рабочем диапазоне.

В реакторе РБМК имеется 211 стержней-поглотителей, которые используются для управления общим и пространственным распределением энерговыделения и для аварийной защиты. Аварийная защита в реакторе РБМК обеспечивается введением всех стержней-поглотителей в активную зону со скоростью, достигающей 0,4 м/с. Для обеспечения требуемого распределения энерговыделения и эффективности использования отрицательной реактивности в аварийных условиях, правилами предписывается, что не менее 30 эффективных стержней должны оставаться введенными в активную зону реактора.

5. ОПИСАНИЕ АВАРИИ

Авария произошла во время испытания, которое должно было проводиться с турбогенератором во время нормальной запланированной остановки реактора. Предполагалось проверить способность турбогенератора во время полного отключения энергоснаб-

жения станции подавать электрическую энергию в течение короткого периода до того, как резервные дизельные генераторы смогут подавать энергию в аварийных условиях. Неверно составленная программа испытания с точки зрения безопасности и грубые нарушения основных правил эксплуатации привели к тому, что реактор вышел на низкую мощность (200 МВт (тепл.)), при которой расход теплоносителя и условия охлаждения не могли стабильно поддерживаться посредством ручного управления. С учетом особых характеристик конструкции, о которых уже говорилось (положительный мощностной коэффициент при низких уровнях мощности), реактор эксплуатировался в опасном режиме. В то же время операторы преднамеренно и в нарушение правил вывели большинство стержней управления и защиты из активной зоны и отключили некоторые важные системы безопасности.

Последующие события привели к интенсивному парообразованию в активной зоне реактора, создав, таким образом, положительную реактивность. Наблюдалось начало резкого повышения мощности, и была сделана попытка вручную остановить цепную реакцию, при заблокированной системе аварийной остановки, которая должна была бы сработать ранее, при начале испытания. Однако возможность быстрой аварийной остановки реактора была ограничена, поскольку почти все стержни управления были полностью извлечены из активной зоны.

Непрерывное повышение реактивности вследствие парообразования привело к мгновенному критическому скачку мощности. Советские эксперты рассчитали, что первый пик мощности достиг 100-кратного превышения номинальной мощности в течение 4 секунд.

Энергия, высвободившаяся в топливе в результате скачка мощности, внезапно разорвала часть топлива в мелкие куски. Механизм этого разрыва хорошо известен из экспериментов по программе исследований в области безопасности. Мелкие частицы раскаленного топлива (возможно, также испарившееся топливо) привели к паровому взрыву.

Выделение энергии сдвинуло 1000-тонную защитную крышку реактора и привело к тому, что были срезаны все каналы охлаждения по обеим сторонам активной зоны реактора. Через 2–3 секунды был услышан второй взрыв, и горячие куски были выброшены из разрушенного здания. До сих пор не ясно, какую роль мог бы играть в этом взрыве водород. Разрушение реактора обеспечило доступ воздуха, который, соответственно, привел к горению графита.

6. ОПЕРАТИВНЫЕ ДЕЙСТВИЯ НА ПЛОЩАДКЕ АЭС

Авария привела к тому, что часть горячих кусков графита и топлива была выброшена на крыши расположенных вблизи частей здания. Начались пожары, особенно в зале блока №4, на крыше блока №3 и на крыше машинного зала, в котором расположены турбогенераторы двух реакторов. Пожарные бригады из близко расположенных городов Припять и Чернобыль немедленно приступили к действиям и героически боролись с огнем, который на протяжении некоторого времени угрожал безопасности блока №3.

Наконец, в 5 часов утра 26 апреля приблизительно через 3,5 часа после начала пожара огонь был погашен. В это же время блок №3, который продолжал работать, по существу не получив повреждений, был остановлен. Блоки №№1 и 2 были остановлены рано утром 27 апреля.

Радиоактивные продукты деления продолжали выходить из блока №4 в существенных количествах до 5 мая, приблизительно в течение 9 дней после аварии.

На первых этапах выброс продуктов деления был связан с горением графита, высокая температура которого поддерживалась от тепла, выделяемого продуктами деления. Большие количества бора, доломита, песка, глины и свинца были сброшены на реактор для уменьшения выброса продуктов деления. В целом было сброшено около 5000 тонн материала, включая 2400 тонн свинца. Некоторое время после 1 мая выброс летучих продуктов деления в действительности увеличивался, так как сброшенный материал изолировал активную зону, которая после этого вновь разогрелась. Однако 5 мая скорость остывания стала превышать скорость нагрева, в частности по мере выгорания тлеющего графита.

7. ВЫБРОС РАДИОНУКЛИДОВ

Разрушение конструкций защитных строений и активной зоны Чернобыльской АЭС привело к выбросу радиоактивности со станции. Советские эксперты рассчитали, что со станции было выброшено 100% радионуклидов благородных газов. Выброс остальных конденсируемых радионуклидов составил приблизительно до 2×10^{18} Бк (5×10^7 кюри)¹ или около 3–4% общего количества радионуклидов в активной зоне. Этот выброс состоял приблизительно из 10–20% радионуклидов цезия, иода и теллура и около 3–6% других радионуклидов.

Выброс радионуклидов с Чернобыльской АЭС не был единичным быстрым выбросом. Скорее, был мощный первоначальный выброс, сопровождавшийся разрушительными событиями аварии. Мощность выброса на протяжении нескольких следующих дней снижалась, вероятно, благодаря предпринятым мерам по ликвидации аварии. Мощность выброса составляла около 7×10^{16} Бк/день (2×10^6 Ки/день) через 5 дней после начала аварии. С этого момента мощность выброса стала возрастать и достигла 3×10^{17} Бк/день (8×10^6 Ки/день) приблизительно через девять дней после начала аварии. Затем произошло снижение выброса радионуклидов до 4×10^{13} Бк/день (1×10^3 Ки/день). С этого времени мощность выброса продолжала снижаться.

Советские эксперты проводят дальнейшее изучение физической и химической природы выброса радионуклидов. Определяются химические формы вещества и дисперсный состав аэрозолей. Постоянное взаимодействие с советскими экспертами в процессе этой работы будет представлять ценность для всех программ в области реакторной безопасности.

¹ Радиоактивные выбросы и активности скорректированы на 6 мая 1986 г. Все выбросы и мощности выбросов имеют погрешность оценки $\pm 50\%$.

8. ПЕРЕНОС РАДИОНУКЛИДОВ ЧЕРЕЗ ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ И ОБЛУЧЕНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ ЛИЦ ИЗ ЧИСЛА НАСЕЛЕНИЯ

Эта авария отличается от тех, которые обычно рассматриваются при радиационных оценках гипотетических аварийных выбросов с АЭС, тем, что выброс был продолжительным, изменялся во времени по мощности и составу радионуклидов и метеорологические условия были сложными. Эти характеристики привели к очень сложному характеру атмосферного оседания на поверхность земли как в пределах СССР, так и в других странах. Характер оседания был установлен очень быстро посредством мониторинга окружающей среды. Осажденные радионуклиды, в особенности иод-131 и изотопы цезия, проникли в земные пищевые цепочки. Были введены и соблюдались запреты на потребление различных продуктов питания, и в Советском Союзе были предприняты меры, там, где это требовалось, по обеспечению незараженной питьевой водой.

Первоначальные оценки доз были получены из данных мониторинга окружающей среды, и в необходимых случаях были дополнены прогнозным моделированием. На более позднем этапе были проведены непосредственные измерения содержания иода-131 в щитовидной железе отдельных лиц, особенно детей, и для определения уровней цезия-137 были проведены измерения всего тела. Эти прямые измерения позволили сделать более точные оценки реально полученных доз.

Радионуклидом, который сыграет наибольшую роль для коллективной дозы (то есть общей дозы для населения СССР) и для дозы для всего тела отдельных лиц, является цезий-137. Коллективная доза для населения европейской части СССР на протяжении последующих 50—70 лет оценивается равной порядка 2×10^6 чел.·Зв, причем большая часть отдельных лиц на протяжении всей жизни получит дозу, меньшую, чем доза от естественного фона радиации. Иод-131 привел к относительно высоким дозам для щитовидной железы некоторых отдельных лиц за короткий срок, однако он не представляет важности на длительный период ни для отдельных лиц, ни для всего населения.

В течение следующих месяцев и лет эти оценки будут уточнены и расширены с включением доз в других странах в рамках запланированной международной деятельности. Огромное количество данных мониторинга как имеющихся, так и тех, которые будут получены в СССР и в других местах, обеспечит на международной основе бесценную базу для проверки и усовершенствования моделей переноса в окружающей среде.

9. ПОСЛЕДСТВИЯ ДЛЯ ЗДОРОВЬЯ

Последствия чернобыльской аварии для здоровья можно подразделить на две категории: ранние нестохастические и поздние стохастические. Ранние проявления наблюдались лишь у персонала АЭС и пожарных, получивших облучение на площадке сразу после разрушения реактора. Из примерно 300 человек, поступивших в больницы, у 203 человек установлены симптомы острой лучевой болезни в результате дозы гамма-облучения на все тело порядка 2—16 Гр. Помимо проникающего гамма-облучения

часть получивших высокие дозы облучения подверглась облучению бета-активными радионуклидами. В ряде случаев это бета-облучение вызвало крайне трудно поддававшееся лечению весьма обширные радиационные ожоги кожи, которые в значительной мере способствовали наступлению смерти 29 пострадавших. Необходимо приложить все усилия, для того чтобы не допустить впредь такого облучения. Для этой группы внутреннее облучение было с клинической точки зрения незначительным; исключить можно было также существенное нейтронное облучение. Ни у одного из 135 000 человек, эвакуированных из прилегающей к АЭС 30-километровой зоны, каких-либо клинических проявлений острой лучевой болезни не обнаружено.

Лечение лиц с острым лучевым синдромом основывалось главным образом на поддерживающей и заместительной терапии, а также на активной борьбе с инфекциями. Эти основные методы представляются относительно эффективными в пределах ограничений, связанных с различными дозами облучения. Трансплатации костного мозга 13 пациентам, получившим особо большие дозы облучения, оказались терапевтически неэффективными. Необходимо широко распространить опыт лечения лучевой болезни. Показало свою целесообразность централизованное руководство медицинскими мероприятиями по ликвидации последствий аварии.

Масштабы воздействия на здоровье поздних стохастических эффектов, главным образом опухолевого и генетического характера, возможно оценить лишь после оценки полученных коллективных доз. Информация по этому вопросу из Советского Союза носит предварительный и приблизительный характер. На основе полученной информации представляется, что в течение последующих 70 лет число спонтанных заболеваний всеми раковыми болезнями в группе эвакуированных 135 000 человек вряд ли увеличится более чем на 0,6%. Соответствующий показатель для остальной группы населения большинства регионов европейской части Советского Союза, как ожидается, не превысит 0,15%, и, вероятно, будет ниже порядка 0,03%. Относительное увеличение смертности в результате рака щитовидной железы может составить 1%.

По оценкам, число случаев ухудшения здоровья в результате генетических эффектов не должно превысить 20—40% от дополнительного числа случаев заболевания раком. В настоящее время отсутствует информация, на основе которой можно было бы оценить последствия внутриутробного облучения плода у беременных женщин в пределах 30-километровой зоны.

Данные о коллективных дозах в других странах продолжают оцениваться, а оценку возможных стохастических последствий следует отложить до появления такой информации.

10. ЛИКВИДАЦИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИИ И ДЕЗАКТИВАЦИЯ

Немедленно по получении в Москве сообщения об аварии на место для оказания помощи местным органам и руководству АЭС была выслана группа специалистов. Был организован централизованный штаб аварии, наделенный всеми полномочиями и властью для руководства организаций мер по ликвидации последствий аварии.

Были организованы метеорологический и радиационный контроль с использованием самолетов и вертолетов, были также приведены в состояние готовности бригады медицинской помощи. В зависимости от состояния загрязнения окружающей среды осуществлялись такие чрезвычайные противоаварийные меры, как запрещение выхода на улицу, профилактическая раздача йодистых препаратов и эвакуация.

В связи с эвакуацией возник огромный комплекс проблем: перевозка населения и скота, наблюдение за состоянием среды, медицинская и социальная помощь, транспорт и материально-техническое обеспечение. В течение первых двух дней около 300 человек оперативного и противоаварийного персонала потребовалось госпитализировать в результате лучевых поражений и ожогов. Ни один из 135 000 человек, эвакуированных из прилегающей к станции 30-километровой зоны, не был госпитализирован по причине лучевого поражения.

Из практики мер по ликвидации последствий аварии можно сделать общий вывод о том, что, хотя они должны были осуществляться на местном уровне, практическая организация и осуществление всего комплекса мер по ликвидации последствий аварии требовала резкого ускорения мобилизации ресурсов. Учитывая масштабы аварии, наличия таких ресурсов, а также полномочий для их мобилизации невозможно было ожидать на местном уровне. Необходимо признать, что при любой столь серьезной аварии, в каком бы месте или стране она ни произошла, потребуется крупнейшая мобилизация людских и материальных ресурсов для того, чтобы взять под контроль ситуацию и уменьшить последствия для населения и окружающей среды.

Оказалось возможным эффективно дезактивировать с применением различных средств весьма сильно загрязненные блоки №№ 1, 2, 3 до уровней, приемлемых для персонала, который должен поддерживать эти блоки в безопасном остановленном состоянии.

Небывальными были масштабы заражения площадки АЭС и прилегающих районов. К проблемам, с которыми придется столкнуться при осуществлении мер по дезактивации этих районов, относятся безопасное захоронение больших количеств загрязненного грунта; снятие слоя грунта и контроль за облучением осуществляющих эту деятельность работников; фиксация радионуклидов в почве, а также нахождение методов дезактивации лесов и водоемов.

Опыт в этой области имеет огромное значение, и существует настоятельная необходимость международного обмена опытом.

11. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ И ВЫВОДЫ

- (1) В ходе данного совещания советские эксперты рассказали о различных модификациях реакторов типа РБМК. Они направлены на то, чтобы в сочетании с совершенствованием административных правил, значительно затруднить возможность создания таких эксплуатационных условий, которые могут привести к быстрому скачку реактивности вследствие любой причины, включая грубое нарушение регламентов эксплуатации. Краткое исследование, приводимое здесь, не может дать полной гарантии того, что эти доработки достигли намеченной цели. Однако

МКГЯБ решительно поддерживает тот факт, что советские компетентные органы поставили перед собой такую цель в отношении реакторов РБМК.

- (2) В самом общем виде МКГЯБ делает вывод о том, что на Чернобыльской АЭС произошло крупное событие, относящееся к классу событий, называемых "аварии с разрушением активной зоны" (или CDA). Сейчас экспертам во всем мире в области безопасности предоставляется возможность на уроках этого трагического события значительно углубить наше понимание проблем ядерной безопасности. Эта авария является почти "худшим" случаем в смысле рисков, связанных с ядерной энергетикой.
- (3) Важными элементами философии обеспечения безопасности ядерных реакторов является принцип множественности барьеров и эшелонированной защиты. В соответствии с этой философией при отказе любого компонента должно оставаться не менее двух барьеров, предохраняющих окружающую среду от аварийного выброса радиоактивных веществ из активной зоны реактора. И перед проектировщиками систем безопасности стоит задача обеспечить общую функциональную независимость каждого из различных барьеров в случае аварии. В соответствии с концепцией эшелонированной защиты современных реакторов ручные команды операторов отменяются автоматической системой безопасности, если они серьезно угрожают безопасности установки.

Автоматическая система защиты реакторов РБМК была спроектирована много лет назад. В то время больше доверяли надлежащим действиям оператора, нежели автоматическим системам безопасности, которые считались менее надежными. Как отмечалось, с учетом опыта эксплуатации и изучения аварий, например, на станции "Три Майл Айленд", проектировщики РБМК в последние годы внесли много усовершенствований в системе безопасности. Тем не менее, по-прежнему в большой степени полагались на соответствующие действия оператора.

Эффективность барьерной концепции в предотвращении больших выбросов продуктов деления после аварии была доказана неоднократно, включая аварию на реакторе "Три Майл". Барьерная концепция, в частности, должна подкрепляться исходно безопасными характеристиками конструкции реакторной установки АЭС. В самой реакторной установке аварийный рост реактивности, ведущий к быстрым скачкам мощности, должен пресекаться немедленно и автоматически независимыми, множественными и проверяемыми механизмами останова реактора, прежде чем наступит серьезное повреждение любой из его систем. Объясняется это тем фактом, что быстрый скачок мощности, как это произошло на Чернобыльской АЭС, может поставить под угрозу все барьеры, предназначенные для предотвращения крупных выбросов продуктов деления после аварии.

- (4) До Чернобыльской аварии произошло не менее трех аварий, связанных со скачком мощности реактора, (на реакторах NRX, EBR-1 и SL-1)². Были проведены

² NRX – экспериментальный реактор с тяжеловодным замедлителем и теплоносителем, который был серьезно поврежден в результате резкого повышения мощности в 1952 г. EBR-1 – реактор на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем, разрушенный в результате скачка реактивности в 1952 г. SL-1 – экспериментальный легководный реактор, разрушенный в 1962 г. в результате повышения мощности, когда оператор слишком высоко поднял управляющий стержень.

многочисленные специальные эксперименты и обширный анализ переходных процессов в условиях быстрого повышения реактивности. База данных по авариям такого типа обширна. На их основе можно сделать общий вывод о том, что аварии такого вида необходимо предотвращать с высокой степенью надежности, поскольку в результате их потенциально возможно разрушение всех естественных и конструктивных барьеров, предназначенных для предотвращения больших выбросов продуктов деления. Как отмечено в предыдущем пункте, мгновенный рост реактивности, ведущий к резкому повышению мощности, должен прекращаться немедленно и автоматически средствами безопасности, предусмотренными в проекте.

- (5) Как отмечалось в докладе советских экспертов и обсуждалось международными экспертами, причиной аварии была невероятная совокупность человеческих ошибок и нарушений правил эксплуатации в сочетании со специфическими особенностями реактора, которые усугубили и усилили эффект ошибок и привели к повышению реактивности.

Из этого можно сделать один важнейший вывод: важно наделить всеми полномочиями и ответственностью за безопасность установки одного из старших сотрудников из числа эксплуатационного персонала. Столь же важно надлежащим образом пересмотреть и утвердить официальные регламенты, в дополнение к которым необходимо создать и поддерживать "культуру ядерной безопасности". Этот процесс принятия дополнительных мер должен проводиться в сочетании с необходимыми дисциплинарными мерами.

- (6) Как и в других технических процессах, автоматическое управление на современных АЭС преследует двойную цель: освободить персонал (операторов) от рутинной работы и помочь ему в управлении сложными ситуациями. Для удовлетворения требованиям ядерной безопасности используются два главных уровня управления: эксплуатационный и обеспечивающий безопасность управления. Система последнего уровня следит за всеми такими ситуациями, когда проходящие на установке процессы выходят за рамки нормальной эксплуатации. Системы безопасности принимают контрмеры, начиная со снижения энерговыделения до быстрой остановки реактора. С использованием этих средств установка будет переведена в безопасное состояние при любых условиях. Однако практически опыт эксплуатации атомных электростанций показывает, что эксплуатационный уровень управления гораздо в большей степени влияет на безопасность, чем это первоначально предполагалось, и возможно, больше, чем следовало бы, люди полагаются на правильность действий персонала. Как результат, наблюдается тенденция к проектированию более надежных систем эксплуатационного управления (например, заложение дублирующих систем или улучшение энергосбережения), а также усовершенствованию или расширению систем, контролируемых повышением мощности. Таким образом, расширение автоматических систем управления происходит в результате анализа накопленного опыта эксплуатации.

С точки зрения безопасности важнейшим вопросом является помощь оператору. Не вызывает сомнения тот факт, что сложной ситуацией легче и надежнее

управляет автоматическая система. Несомненно, проектировщики такой системы имеют больше времени для рассмотрения всех вариантов процесса, нежели оператор в реальной ситуации. Однако важным в автоматических системах является то, что они должны предоставлять информацию оператору, показывая ему состояние установки и реакцию на его действие. Это позволяет оператору в случае отказа автоматической системы включать системы безопасности вручную.

- (7) В ходе аварии, начавшейся утром 26 апреля с резкого скачка мощности сразу после 1 часа 23 мин, 40 сек, в реакторе последовательно проходил комплекс весьма сложных физических и химических явлений. Многие из этих явлений, например, разрушение топлива, паровой взрыв и горение графита, уже описаны и проанализированы. До события в Чернобыле практический опыт разрушительных явлений такого характера был ограничен лишь весьма малыми масштабами, поэтому анализ серьезных аварий был, скорее, теоретическим. Сейчас, после того как произошла крупная серьезная авария, советские и другие эксперты могут извлечь большую пользу из анализа подробной хроники событий с целью возможного использования его результатов при принятии решений о проектировании и лицензировании
- (8) Ход эвакуации после чернобыльской аварии выявил ряд проблем в области процедур, материально-технического обеспечения и административных действий. Кроме того, технические и медицинские проблемы были беспрецедентными по своим масштабам. Уроки этой аварии будут весьма полезными для организации и координации операций по ликвидации последствий аварии, особенно аварий, имеющих крупные радиационные последствия.
- (9) Что касается дезактивации и аварийно-восстановительных работ, проводимых на Чернобыльской АЭС, то объемы и масштабы усилий далеко превосходят все, предпринимавшееся до этого на любой площадке АЭС. Отмечается, что все другие специалисты, отвечающие за проведение такого вида работ, должны изучить этот случай и извлечь из него уроки.
- (10) Борьба с пожаром на АЭС в условиях острой радиационной опасности явилась совершенно новой областью. Процедуры, оборудование и защитная одежда, применявшиеся во время этой аварии, должны быть тщательно изучены всеми лицами, в чьи обязанности входят противоаварийные меры такого рода.
- (11) Лечение острой лучевой болезни оказалось эффективным в пределах, определяемых величиной полученной дозы. Обширные ожоги кожи в результате бета-облучения существенно осложнили поддерживающую и заместительную терапию болезни, а также в значительной степени способствовали летальному исходу болезни у 29 пострадавших. Необходимо разработать технические средства для предотвращения обширных ожогов кожи в случае повторения в будущем аварий подобного рода. Проведенная в отдельных случаях пересадка костного мозга, как оказалось, не показала реальных терапевтических преимуществ в данной группе пострадавших. Внутреннее облучение не оказало какого-либо существенного влияния на возникновение острой лучевой болезни. Этот опыт должен быть всесторонне рассмотрен специалистами в области медицины.

(12) Были сделаны предварительные оценки доз, полученных отдельными лицами в Советском Союзе, а также дозы, полученной населением в целом. По мере поступления новых данных эти оценки будут уточнены, а оценка общих радиационных последствий этой аварии будет проведена НКДАР ООН совместно с МАГАТЭ и ВОЗ на основе данных, полученных от государств-членов. На международном уровне будут обсуждены методологические проблемы эпидемиологических исследований работников и отдельных групп населения в районе станции.

На основе этих замечаний и выводов МКГЯБ направляет Генеральному директору МАГАТЭ свои рекомендации, касающиеся дальнейшей деятельности.

ВВЕДЕНИЕ

1. ЦЕЛЬ НАСТОЯЩЕГО ДОКЛАДА

26 апреля 1986 года на четвертом блоке Чернобыльской АЭС, расположенной на территории Украинской ССР в Советском Союзе, произошла крупная авария, наиболее серьезная из всех, когда-либо происходивших на АЭС. Мощный выброс радиоактивности в результате аварии позволил осознать, что событие, считавшееся крайне маловероятным, стало реальностью. МАГАТЭ и Советский Союз договорились о проведении в Вене совещания по рассмотрению причин и последствий аварии. Это совещание было проведено в период с 25 по 29 августа 1986 года. Более 500 высококвалифицированных экспертов из 62 стран и 21 международной организации заслушали доклад советских экспертов и приняли участие в откровенных и очень плодотворных дискуссиях.

Генеральный директор МАГАТЭ обратился к Международной консультативной группе по ядерной безопасности (МКГЯБ) с просьбой подготовить на основе представленной информации и дискуссии краткий доклад о работе совещания. Он также высказал просьбу, чтобы этот доклад был представлен ему для рассмотрения и передачи Совету управляющих МАГАТЭ до начала его заседания в сентябре. Доклад должен был содержать рекомендации МКГЯБ, касающиеся дальнейшей деятельности.

2. РАССМАТРИВАЕМЫЕ В ДОКЛАДЕ ВОПРОСЫ

На совещании по рассмотрению причин и последствий аварии были обсуждены факторы, которые способствовали возникновению аварии и широкому распространению ее последствий. В связи со сложной природой аварии и размерами ее последствий советским и другим международным экспертам потребуется длительное время для полной и всесторонней оценки аварии и ее воздействия. В докладе отражена информация, представленная на совещании по рассмотрению причин и последствий аварии в Чернобыле.

В кратком обзоре дается картина аварии, ее причины и последствия, а также общие замечания и выводы МКГЯБ.

В разделах I—IV основной части доклада члены МКГЯБ представляют свою точку зрения на причины аварии, ее развитие и последствия, аварийно-восстановительные действия, а также на радиационные противоаварийные меры, природу воздействия на здоровье и меры, предпринятые для ограничения последствий аварии. Основой для этих выводов послужили советские доклады и дискуссии в ходе совещания по рассмотрению причин и последствий аварии.

В разделах V рассматриваются проблемы безопасности, которые требуют последующего обсуждения. В разделе VI МКГЯБ представляет свои замечания и выводы на основании опыта, полученного в настоящее время в связи с аварией. В разделе VII

содержатся рекомендации МКГЯБ по целому спектру проблем: от эксплуатации реактора до радиационной защиты и международного сотрудничества в области ядерной безопасности.

Доклад снабжен техническим приложением, в котором содержится информация об истории эксплуатации реакторов РБМК, а также исходная информация о блоке №4 Чернобыльской АЭС. Эти данные необходимы для понимания других разделов доклада.

3. ПОДГОТОВКА ДОКЛАДА

Ответственность за подготовку доклада была в основном возложена на МКГЯБ. Группа экспертов, отобранных МАГАТЭ в консультации с председателем МКГЯБ, оказала помощь МКГЯБ в подготовке доклада. Эти эксперты подготовили технические разделы доклада, которые были впоследствии рассмотрены МКГЯБ. Кроме того, для разъяснений и дискуссий была предоставлена помощь советских экспертов. Сотрудники отдела ядерной безопасности также оказали помощь МКГЯБ и другим экспертам в подготовке этих технических документов.

При подготовке этого доклада МКГЯБ использовала рабочие документы предоставленные Советским Союзом участникам совещания по рассмотрению причин и последствий аварии³, а также дополнительную информацию, полученную от советских экспертов в ходе их докладов и во время дискуссий рабочих групп в ходе совещания.

МКГЯБ несет полную ответственность за этот доклад и выражает свою благодарность советским экспертам за тесное сотрудничество, экспертам, назначенным МАГАТЭ, — за оказание технической помощи, и штатным сотрудникам МАГАТЭ — за оказание эффективной поддержки. Подготовка настоящего доклада в такие сжатые сроки стала возможной благодаря их продуктивному и творческому сотрудничеству.

³ "Авария на Чернобыльской АЭС и ее последствия". (Информация, подготовленная ГКАЭ СССР для совещания экспертов МАГАТЭ, Вена, 25–29 августа 1986 г.), Вена, части I и II, август 1986 г.

АВАРИЯ НА БЛОКЕ №4 ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС

1. ОБЗОР ОБСТОЯТЕЛЬСТВ АВАРИИ

Этот обзорный подраздел предназначен главным образом для рядового читателя. Он носит самостоятельный характер и охватывает те же вопросы что и подраздел 2, хотя в несколько ином контексте; в нем сделана попытка дать неспециалисту представление о масштабах исследований, выполненных экспертами, назначенными МАГАТЭ. В подразделе 2 (описание событий) подробно рассматриваются технические вопросы.

Блок №4 Чернобыльской АЭС весьма успешно эксплуатировался в течение трех лет. Опыт эксплуатации реакторов этого типа составляет более 100 реакторов-лет. Блок №4 Чернобыльской АЭС был в действительности наиболее удачным блоком РБМК. В ночь с 25 на 26 апреля предполагалось провести специальные испытания электрических систем перед остановкой на обычный ремонт.

Цель этих испытаний — продемонстрировать повышение возможностей турбогенераторов поддержания важных систем в условиях полного обесточивания станции. Это должно было производиться посредством отключения подачи пара на один из турбогенераторов, проверкой возможности поддержания нужного напряжения при его выбеге, используя главные циркуляционные насосы в качестве нагрузки. Инициатива испытаний исходила от специалистов по электротехнике, а не специалистов в ядерной области, поэтому разработка регламента испытаний была возложена на первых.

Предположение, что это были электротехнические испытания, не затрагивающие безопасность реактора, по-видимому, приуменьшило внимание, уделяемое им с точки зрения безопасности. Как установлено, регламент был плохо разработан с точки зрения безопасности, и разрешение на проведение их персоналом установки было дано без необходимого официального утверждения группой технологической безопасности станции. Однако, как станет ясно из последующего, авария бы не произошла, если бы не многочисленные другие взаимосвязанные события.

После отсрочек со стороны диспетчера системы ночью 25 апреля возобновилась дальнейшая подготовка блока к испытаниям, включая снижение мощности до намеченного для испытаний уровня 700–1000 МВт (тепл.). Это оказалось трудным из-за неправильного обращения оператора с системой управления. В результате мощность реактора упала до слишком низкого уровня.

Мощность вновь была повышена. С некоторыми трудностями был достигнут уровень 200 МВт (тепл.), и это потребовало выведения многих регулирующих стержней. Следует отметить, что продолжительная эксплуатация на уровне ниже 700 МВт (тепл.) запрещена нормальными процедурами безопасности ввиду проблем термогидравлической неустойчивости. Было включено еще два главных циркуляционных насоса, для того чтобы обеспечить после испытаний возможность продолжения эксплуатации реактора с необходимым числом насосов. Высокий расход воды, вызванный включением этих дополнительных насосов, представлял собой нарушение

нормальных процедур эксплуатации установки, так как он превысил утвержденные уровни как для активной зоны реактора, так и для некоторых отдельных насосов и, что более важно, затруднил управление основными системами теплоносителя.

Одним из важных последствий явилось то, что операторы заблокировали автоматическую остановку реактора по таким параметрам, как давление пара и уровень воды в барабанах-сепараторах, с тем чтобы их неустойчивость не вызвала такую остановку реактора и не приостановила испытаний; вновь серьезное нарушение нормальной процедуры эксплуатации установки.

Стремясь достигнуть стабильности, оператор манипулировал расходом питательной воды и регулируемыми стержнями и в конечном счете приступил к испытаниям, прекратив подачу пара на турбину.

Как раз перед этим компьютеризованная система централизованного контроля выдала оператору информацию о состоянии реактора, включая положение на это время всех регулирующих стержней. Это было ясное предупреждение, поскольку оно свидетельствовало об отсутствии запаса компенсирующей способности регулирующих стержней организовать защиту от аварийной ситуации. Требовалась немедленная остановка реактора. Однако оператор приступил к электротехническим испытаниям, хотя состояние блока, как очевидно и как об этом будет сказано впоследствии, было крайне нестабильным.

С момента испытаний начался выбег турбогенератора. Здесь следует отметить серьезное нарушение процедуры. Ранее была блокирована автоматическая остановка реактора при отключении обоих турбогенераторов, с тем чтобы реактор оставался на мощности для повторения, в случае необходимости, испытаний. Следует пояснить, что испытания могли и должны были проводиться таким образом, чтобы сработала система автоматической остановки реактора при начале испытаний.

Прекращение подачи пара на турбину и влияние этого на расход питательной воды, на давление пара и на расход теплоносителя вызвало возмущение системы и быстрое парообразование в большей части активной зоны. Это привело к быстрому подъему мощности реактора, с которыми не могла справиться система аварийной остановки. Этот подъем был вызван влиянием положительного парового коэффициента реактивности (как объяснено в следующем абзаце), который характерен для эксплуатации реактора РБМК на низкой мощности и при достигнутой конфигурации активной зоны. Увеличение уровня мощности, вызванное повышением реактивности, привело к самопроизвольному очень быстрому парообразованию. Оно также привело, как полагают, к перегреву и фрагментации топлива, которое при контакте с теплоносителем также вызвало бурное парообразование. Взрывной эффект этого процесса привел к полному разрушению активной зоны реактора и связанных с нею конструкций.

Активная зона оказалась столь чувствительной во время испытаний, потому что сложное манипулирование установкой для сохранения уровня мощности привело к тому, что положительный паровой коэффициент реактивности сыграл решающую роль. Это определялось изменениями в расходе питательной воды, которые свели к минимуму парообразование в теплоносителе, выведением многих регулирующих стержней из активной зоны и эксплуатацией на низкой мощности, и все эти факторы повысили вклад

парового коэффициента в параметр, определяющий общую стабильность (модальной коэффициент: это — параметр, который, если его не скомпенсировать, может привести к опасному усилению любых небольших отклонений от нормы изменений мощности). Следует ясно указать, что для реактора РБМК этот эффект не имеет значения при нормальной эксплуатации, когда мощность достаточно высока, а регулирующие стержни находятся в стандартном положении.

Эти факторы, которые отрицательно повлияли на паровой коэффициент во время Чернобыльской аварии, имели дополнительные отрицательные эффекты, так как положение регулирующих стержней было нарушено и недогрев теплоносителя уменьшился. Однако важным явилось доминирование парового коэффициента как фактора мощностного коэффициента при этих аномальных условиях.

Ошибки и нарушения процедур были основными приводящими факторами, вызвавшими аварию. По-видимому, было решено, что проведение испытаний необходимо. Это привело непосредственно к оставлению реактора под нагрузкой во время испытаний продолжительной эксплуатации на мощности 200 МВт (тепл.), трудностям в управлении, вызванным включением дополнительных насосов, блокировкой системы автоматической остановки реактора и игнорированием показаний запаса радиоактивности. Эта серия преднамеренных нарушений процедуры, чрезвычайных самих по себе, в сочетании со специфическими конструктивными рабочими характеристиками реактора РБМК на малой мощности привела к катастрофе.

2. ОПИСАНИЕ СОБЫТИЙ

В этом разделе описаны те же события в подробной повествовательной форме (в таблице I приводятся основные моменты во временной шкале). Цель заключается в том, чтобы дать больше технических подробностей специалисту с тем, чтобы читатель не был удивлен дублированием материала подраздела 1.

Последовательность событий в этом разделе выведена на основании фактических данных по реактору, весьма полезной дискуссии с советскими экспертами и математического моделирования, результаты которого были ими представлены.

Чтобы понять события, которые привели к аварии на блоке №4 Чернобыльской АЭС, полезно, во-первых, выделить некоторые важные события в течение 25 и 26 апреля. Специальные испытания были запланированы накануне остановки блока для запланированного ремонта. Цель испытаний — продемонстрировать, что новая система регулирования напряжения на шинах генератора может обеспечить достаточную мощность для работы быстродействующего насоса САОР в течение 40–50 секунд, используя инерцию турбогенератора на выбеге после закрытия аварийного запорного клапана турбины. В ходе предыдущих испытаний не удалось продемонстрировать это из-за слишком быстрого падения напряжения при снижении количества оборотов турбины.

Электрическая нагрузка насоса САОР должна была имитироваться энергопитанием большего, чем обычно, числа главных циркуляционных насосов, получающих энергопитание от турбогенератора. Испытания намеревались провести как чисто электротехнические, которые, как полагали, не будут воздействовать на ядерную безопасность.

ТАБЛИЦА I. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ СОБЫТИЙ ПРИ АВАРИИ

Время	Событие	Объяснение	
		Результат события	Значение
25 апреля 1 ч 00 мин 00 с	Начало снижения мощности ^a реактора	Начальные этапы программы испытаний и остановки для планового ремонта	Медленное снижение мощности снижает последствия нарастающего отравления ксеноном
13 ч 05 мин 00 с	Снижение мощности реактора ^b прекращено при 50% от полной мощности. Турбогенератор №7 отключен. Электропитание собственных нужд переведено на шины турбогенератора №8 (четыре главных циркуляционных насоса, два питательных насоса, другое оборудование)		Во время испытания эти элементы будут работать от турбогенератора на выбеге. Схема питания насосов на этот момент: четыре питаются от турбогенератора №8, два — от сети, два — резервных, подсоединенные к общей сети
14 ч 00 мин 00 с	САОР отключена ^c	Отключение произведено в соответствии с планом испытания, так как у бригады обслуживания было желание избежать ложного срабатывания	Нарушена норма безопасности, однако заблокированная САОР не сработала при переходном процессе, приведшем к разрушению активной зоны. Могла быть полезной в период после разрушения Примечание: обсуждение с советскими специалистами событий при аварии подтвердило, что для испытания не было необходимости блокировать САОР
	Диспетчер энергосети запрещает ^d снижение мощности		Длительное удержание на мощности еще более сократило бы скорость накопления ксенона на уровне мощности при испытании

САОР по-прежнему отключена^e

23 ч 10 мин 00 с	Снижение мощности продолжено ^f до заданного уровня 700–1000 МВт (тепл.)		В соответствии с регламентом испытания был избран уровень, превышающий минимально допустимую эксплуатационную мощность реактора (приблизительно 700 МВт (тепл.))
26 апреля			
0 ч 28 мин 00 с	Ошибка оператора: при ^g переключении с локального (ЛАР) на общее (АР) автоматическое регулирование мощности не введена команда удержания мощности на требуемом уровне	Мощность упала до 30 МВт (тепл.), поскольку стержни автоматического регулирования оказались не в состоянии, а оператор не принял незамедлительных мер для компенсации парообразования вследствие недопустимого переноса мощности	В системе добивалась отрицательная реактивность, и для ее компенсации было извлечено еще больше стержней ручного регулирования
1 ч 00 мин 00 с	Реактор стабилизирован ^h при мощности 200 МВт (тепл.)	Реактор работал на уровне мощности ниже минимально допустимого. Не соблюден требуемый оперативный запас реактивности	Отсутствие запаса реактивности для повышения мощности
1 ч 03 мин 00 с	Четвертый главный циркуляционный насос ⁱ , питаемый от сети, был подключен к левой петле системы теплоотвода	Вследствие низкой мощности и увеличенного расхода теплоносителя в системе теплоотвода температура теплоносителя достигла точки насыщения	Это создает добавочную отрицательную реактивность в системе, вследствие чего требуется большее извлечение стержней для ее компенсации
1 ч 07 мин 00 с	Четвертый главный циркуляционный насос ⁱ , питаемый от сети, подключен к правой петле системы теплоотвода	Расход в некоторых главных циркуляционных насосах превысил допустимую величину. Появились значительные отклонения уровня воды и давления пара в барабанах-сепараторах	Нарушение пределов неустойчивости расхода вследствие потенциальных проблем, связанных с кавитацией. Подключение обоих насосов привело к дальнейшему извлечению стержней регулирования и дальнейшему снижению запаса реактивности

ТАБЛИЦА I. (продолж.)

Время	Событие	Объяснение	
		Результат события	Значение
1 ч 19 мин 00 с	Оператор увеличил ^k расход питательной воды. Примерно в это время <i>оператор блокирует сигналы остановки реактора по уровню воды и давлению в барабанах-сепараторах</i>	Увеличение дополнительного охлаждения активной зоны ведет к еще большему снижению парообразования. Сложности управления в течение этого периода	
1 ч 19 мин 30 с	Начало повышения уровня воды в барабанах-сепараторах. Расход питательной воды в три раза превышает номинальную величину Стержни автоматической регулировки поднялись ^l к верхнему ограничителю <i>Стержни ручного регулирования подняты вверх^m.</i> Начало падения давления пара в барабанах-сепараторах	Количество питательной воды, поступающей в систему, превышает скорость парообразования. Более холодная вода достигла активной зоны и снизила содержание пара и парообразование в активной зоне	Уровень в барабане-сепараторе возрастает Расчетное среднее парообразование в активной зоне в настоящий момент равно нулю Добавление отрицательной реактивности компенсировано извлечением стержней
1 ч 19 мин 58 с	Вентиль стравливания пара закрыт ⁿ	Замедление скорости падения давления пара	
1 ч 21 мин 50 с	Расход питательной воды в четыре раза превысил номинальный	Уровень в барабанах-сепараторах все еще повышается, давление все еще падает	Положение стержней регулирования в соответствии с моделью неизменно. Снижение давления приводит к достаточному парообразованию для компенсации дополнительного расхода питательной воды

	<i>Оператор резко снижает расход питательной воды⁰</i>		
1 ч 22 мин 10 с	Паросодержание начинает расти ^P , стержни автоматического регулирования начинают опускаться, уровень воды в барабанах-сепараторах стабилизируется	Повышение температуры воды на входе в активную зону, что приводит к росту парообразования в среднем по активной зоне, стержни регулирования вводятся, чтобы его компенсировать	
1 ч 22 мин 30 с	Расход питательной воды снизился до двух третей номинального расхода	Оператор не может удержать расход питательной воды на нужном уровне вследствие недостаточной точности системы управления, конструкция которой не предусматривала такого режима эксплуатации	Стержни регулирования введены для компенсации добавленной реактивности вследствие повышенного парообразования
	Распечатаны поле энерговыделения и положения каждого стержня регулирования ^Q	Это сделано для установления распределения нейтронного потока и запаса реактивности перед началом испытаний	<i>Подтверждение того, что рабочий запас реактивности составлял половину минимально допустимого, и оператор на основе компьютерной распечатки должен был немедленно начать остановку реактора</i>
1 ч 22 мин 45 с	Расход питательной воды стабилизировался	Паросодержание в активной зоне стабилизируется, давление начинает расти	
1 ч 23 мин 04 с	Эксплуатационный персонал заблокировал сигнал аварийной остановки двух турбогенераторов ^F . Закрыт аварийный клапан подачи пара на турбину ^S . Реактор продолжает работать на мощности 200 МВт (тепл.)	Началось испытание турбогенератора №8	<i>Отключение последней аварийной технологической системы безопасности для обеспечения возможности повторения испытания. Эта аварийная система спасла бы реактор. Оператор знал, что он создает переходный режим, требующий остановки. (Это не было предусмотрено в программе испытания)</i>

ТАБЛИЦА I. (продолж.)

Время	Событие	Объяснение	
		Результат события	Значение
1 ч 23 мин 10 с	Одна группа стержней автоматического регулирования начинает подниматься	Парообразование в активной зоне снижается вследствие повышения давления в системе	
1 ч 23 мин 21 с	Две группы стержней автоматического регулирования вновь начинают опускаться	Снижение расхода теплоносителя и повышение температуры воды на входе в активную зону	Оба эти результата приводят к добавлению положительной реактивности в активной зоне. Регулирующие стержни пытаются сбалансировать это добавление
1 ч 23 мин 31 с	Общая реактивность возрастает [†] с последующим медленным ростом мощности реактора	Стержни регулирования более не способны балансировать добавочную реактивность	Мощность медленно возрастает, положительный коэффициент мощности усугубляет нарушение баланса реактивности
1 ч 23 мин 40 с	Оператор нажимает кнопку АЗ-5 (аварийная остановка реактора)	Отсутствие явного эффекта	
1 ч 23 мин 43 с	Срабатывают аварийные сигналы избытка мощности и снижения периода Резкий рост расчетной температуры топлива		Аварийная защита недостаточно эффективна для предотвращения выхода реактора из-под контроля Кризис теплообмена
1 ч 23 мин 44 с	Резкое повышение мощности		Рассчитанная мощность превышает полную в 100 раз

В результате инициатива и управление испытаниями были возложены на инженеров электриков. Ядерной безопасности было уделено мало внимания, и не было получено надлежащего разрешения. Таким образом, были созданы предпосылки, но, как станет ясно из последующего, авария не произошла бы без широкого набора других взаимосвязанных проблем и серьезных нарушений.

Основными запланированными этапами испытаний были: понижение мощности до 700–1000 МВт (тепл.), блокирование САОР для предотвращения ложного срабатывания при испытаниях, переключение электропитания главных циркуляционных насосов, таким образом, что четыре из них получали питание от электрической службы АЭС, а четыре — от турбогенератора и, наконец, изоляция турбогенератора.

25 апреля в 1 час 00 мин снижением мощности реактора^а началась подготовка к испытаниям^а. В 13 ч 05 мин мощность реактора достигла 50%, и турбогенератор №7 был остановлен^б. Вскоре после этого (в 14 ч 00 мин) была отключена САОР^с. Снижение мощности по диспетчерскому требованию было остановлено^д и возобновлено приблизительно девять часов спустя.

В этот период САОР оставалась отключенной^е. Хотя это не оказало сильного влияния на последующие события, но факт, что САОР не была вновь подключена, отражает отношение эксплуатационного персонала к нарушениям нормальных процедур. В 23 ч 00 мин снижение мощности было продолжено^ф, и произошло еще одно необычное событие. Во время перевода оператором управления мощностью реактора с локальной на общую регулируемую систему не поступило запроса "держать мощность". В результате мощность быстро упала^г ниже минимально допустимого уровня 700 МВт (тепл.). Как следствие, быстро упал уровень мощности, вызванный коллапсом парообразования (недостаточное кипение) в реакторе. Мощность реактора упала до 30 МВт (тепл.), и оператору удалось вновь повысить его мощность до 200 МВт (тепл.) лишь в результате ручного вывода регулирующих стержней.

При режиме мощности ниже приблизительно 700 МВт (тепл.) отношение между объемом и массой пара высоко не линейно до точки, когда небольшие изменения мощности (а отсюда и паровой массы) ведут к большим изменениям объема пара (отсюда и парообразования), весьма затрудняя управление мощностью и питательной водой. Комбинация вывода слишком большого числа регулирующих стержней из активной зоны и эксплуатации на этом низком уровне мощности нарушала ряд процедур. Она также создала условия, которые одновременно ускорили в силу динамических характеристик реактора возмущения блока или реактора и снизили эффективность системы защиты.

Положение регулирующих стержней исключительно важно при определении этих динамических характеристик. Чем больше они выдвинуты, например, для поддержания постоянной мощности, тем более положительным становится паровой коэффициент и более чувствительным — реактор к любым эффектам, которые имеют результатом изменения в распределении и (или) уровне пара в активной зоне. При изменении мощности разогрев топлива и отвод тепла в теплоноситель изменяют темп изменения мощ-

^а Сноска относится к последовательности в табл. I .

ности. Температурный коэффициент топлива является отрицательным, а чистый эффект повышения температуры топлива и дополнительное парообразование в результате этого повышения зависят от уровня мощности. Для реактора РБМК в нормальных условиях чистый эффект (выраженный через мощностной коэффициент) отрицателен при полной мощности и становится положительным приблизительно ниже 20% мощности. Если манипуляции оператора приводят к повышению парового коэффициента сверх нормы, то это оказывает прямое воздействие на значение мощностного коэффициента и диапазон режимов работы реактора на мощности, на которой он остается положительным.

Реактор продолжал работать на мощности 200 МВт (тепл.) – уровне, который запрещен для продолжительной эксплуатации. Тем не менее, оператор решил продолжать программу испытаний. Хотя это было серьезным нарушением эксплуатационной процедуры, этого было еще недостаточно, чтобы вызвать аварию. Последующие действия усугубили проблему.

Оператор включил четвертый насос в каждой петле согласно плануⁱ, но ввиду того, что реактор работал в режиме низкого парообразования при низком термодинамическом сопротивлении в системе циркуляции, насосы вызвали увеличение расхода воды до точки, когда разрешенные для насосов по соображениям кавитации пределы были превышены. Дальнейшее балансирование дроссельными клапанами оказалось невозможным, и увеличение расхода воды в активной зоне привело к проблемам, связанным с уровнем воды в барабанах-сепараторах. Оператор компенсировал увеличением расхода питательной воды, однако ему не удалось достигнуть желаемого уровня воды в барабанах-сепараторах из-за неточности контроля за питательной водой на этих уровнях мощности.

26 апреля к 1 ч 19 мин уровень воды в барабанах-сепараторах все еще оставался возле аварийной отметки. Оператор увеличил расход питательной воды^k. Эта операция по подпитке, повысив уровень воды в барабанах-сепараторах, имела результатом снижение парообразования, что несколько добавило отрицательной реактивности в систему. Стержни АР попытались скомпенсировать^l, однако для этого требовалось дальнейшее перемещение вверх ручных стержней для сохранения баланса реактивности^m. Давление в системе начало падать, и был перекрыт байпас в турбину в попытке стабилизировать давлениеⁿ. Давление, расход воды и парообразование взаимосвязаны, так как они определяют действия системы управления. Чувствительность реакции системы на эту взаимосвязь повышается в условиях низкой мощности. Поскольку операторы испытывали трудность в отношении контроля давления и уровня, они блокировали устройства автоматической остановки реактора, связанные с этими параметрами^k.

Следует отметить, что начиная с этого момента (1 ч 19 мин 26 апреля) большая часть представленной информации основана на расчетах, представленных советскими экспертами.

Когда оператор решил, что уровень воды в барабанах-сепараторах достаточно высок, он резко снизил расход питательной воды^o, вызвав усиление парообразования и положительной реактивности, и регулирующие стержни были автоматически опущены, чтобы компенсировать и сохранить постоянную мощность реактора^p. До испытаний

оператор располагал распечаткой распределения потока нейтронов, полученной из системы централизованного контроля станции.

Эта распечатка показывает, что из активной зоны было извлечено слишком много регулирующих стержней, и что не было достаточного запаса реактивности для выполнения требований при остановке⁴. В это время оператору следовало остановить реактор.

Устройство автоматической остановки реактора по отключению второго генератора было заблокировано, чтобы позволить, если потребуются, возобновление испытаний⁵. Это явилось ключевым нарушением программы испытаний, поскольку реактор был бы безопасно остановлен при начале испытаний даже при существующем положении стержней. Испытания могли быть и должны были быть проведены таким образом, чтобы реактор был остановлен при начале испытаний. Такая процедура успешно осуществлялась в предыдущих испытаниях. К этому времени сигналы защиты реактора поступали только от датчиков превышения давления и низкого периода.

После перекрытия аварийного стопорного клапана⁶ давление пара начало повышаться. Расход воды через активную зону начал понижаться, так как четыре главных циркуляционных насоса приводились в движение выбегающим генератором. Повышение давления, снижение расхода питательной воды и снижение расхода воды через реактор являются конкурирующими факторами, которые определяют объемные показатели пара, и отсюда мощность реактора. Следует подчеркнуть, что в то время реактор находился в таком состоянии, когда небольшие изменения мощности привели бы к многократному увеличению объемного паросодержания и, соответственно, росту мощности. Комбинация этих факторов в конечном счете привела к повышению мощности, начавшемуся приблизительно в 1 ч 23 мин 30 с⁷.

В 1 ч 23 мин 40 с начальник смены блока приказал остановить реактор, но уже было слишком поздно. Запас реактивности, оставшийся в стержнях активной зоны, был недостаточен, а остальные стержни, находившиеся в верхней части активной зоны, не могли быть опущены достаточно быстро, чтобы преодолеть превышение мощности, вызванное вышперечисленными конкурирующими факторами. Было рассчитано, что мощность превысила 530 МВт в течение трех секунд, а период разгона стал намного меньше 20 с. К этому времени инициация автоматической остановки по сигналам датчиков высокой мощности и низкого периода слишком запоздала, чтобы быть эффективной. Положительный паровой коэффициент реактивности, присущий конструкции РБМК, способствовал увеличению реактивности и быстрому превышению критического значения. Через 4 секунды после 1 ч 23 мин 40 с мощность по расчетам в 100 раз превысила полную. Это катастрофическое нарастание мощности реактора имело результатом фрагментацию топлива, быструю генерацию пара и, в конце концов, разрушение активной зоны реактора и связанных с нею конструкций.

Быстрое нарастание повреждений в первые секунды аварии, высокий уровень радиации и высокие температуры на последующем этапе помешала сделать прямые измерения. Последующее описание событий основано на визуальных наблюдениях, замерах уровней радиации, экспериментальных данных до аварии и расчетах после аварии. Необходимы последующие аналитические и экспериментальные исследования, так же как и анализ поврежденных материалов для более глубокого изучения последствий аварии и связанных с ними процессов.

Известны следующие факты: произошел взрыв с извержением некоторого количества вещества; произошел второй взрыв с извержением топлива и графита; графитовые блоки были найдены за пределами здания; осколки топлива были найдены за пределами здания; здания были сильно повреждены; оказались разрушенными кран и разгрузочно-загрузочная машина; верхняя плита была перемещена в вертикальное положение в шахте реактора; все каналы были разрушены; цепная реакция прекратилась.

Эти наблюдения взаимосвязаны в последующем описании. Значительное возрастание реактивности имело результатом дополнительное высокое энерговыделение. В подобных случаях горячее топливо и другие частицы, как правило, взаимодействуют с окружающей водой. Последующее парообразование привело к повышению давления. Избыточное давление и выделение тепла привели к разрыву ряда технологических каналов и верхней части этих каналов. Во время этого первого взрыва измельченный материал был выброшен, и крыша реакторного зала получила повреждение. В реакторном пространстве, которое запланировано на разрыв лишь одного технологического канала, создалось избыточное давление и оказалась приподнятой верхняя крышка реактора весом 1000 тонн.

В этот момент были разрушены все технологические каналы, регулирующие стержни поднялись, а горизонтальные трубопроводы оказались срезанными. Второй взрыв последовал через 2—3 секунды после первого. Еще не ясно, явился ли его причиной образовавшийся водород, вступивший в реакцию с воздухом, или он был результатом второго скачка мощности. Было выброшено около 25% графитовых блоков и материала из технологических каналов. Взрыв переместил оборудование системы в активную зону реактора, реакторный зал и пространство под активной зоной. Содержащие воду защитные баки были разорваны.

Операторам удалось подать воду, используя вспомогательные питательные насосы. Вода была подана на сепараторы пара и коллекторы между сепараторами и насосами. В течение приблизительно половины суток расход подаваемой воды составлял 200—300 тонн в час. Вода забиралась из бака-хранилища для подачи в сохранившуюся часть реактора через САОР. Часть воды испарилась. Оставшаяся вода вытекла из блока №4 в направлении блоков №1 и №2.

В результате повреждения здания образовался воздушный поток через активную зону, вызванный высокой температурой активной зоны. Температуру активной зоны измерить оказалось невозможно, поэтому поведение графита и топлива не может быть полностью описано. Было замечено, что в первые сутки из реактора шел пар, а на вторые сутки было отмечено небольшое количество темного дыма. Очевидно, что происходила реакция графита с воздухом и паром. По оценке советских экспертов, сгорело по крайней мере 10% графита, хотя эта оценка, возможно, занижена. Было бы удивительно, если бы в действительности в реакции участвовало большее количество графита.

Аварийные команды доставили в шахту реактора различные материалы общим весом 5000 тонн. Эта мера явно уменьшила воздушный поток и выброс продуктов деления, хотя она также уменьшила и теплоотдачу в окружающую среду.

В нижнюю часть здания удалось подать азот. Некоторые трубопроводы были разрезаны, чтобы направить поток, хотя различные пути потока неизвестны.

Посредством измерений гамма-излучения на внешней стороне бетонной биологической защиты было определено, что большая часть топлива находится ниже активной зоны в помещении трубопроводов. Как полагают, часть топлива находится в зоне горизонтальных выходных трубопроводов. Эти измерения также показывают, что часть топлива осталась в активной зоне, главным образом во внешней периферийной части. Каким образом это топливо зафиксировано внутри этого объема, еще неясно. 3–4% топлива было выброшено либо в виде осколков (только на площадке) или частиц диаметром от 1 мк до десятков мк.

Бетонная плита под реактором не расплавилась. На этой стадии невозможно произвести оценку взаимодействия расплава с бетоном.

3. ХРОНОЛОГИЯ СОБЫТИЙ

3.1. Хронология событий до быстрого повышения мощности

Представленная последовательность событий (в табл. I⁵) основывается на описании, данном советскими рабочими документами. Для справок из этого доклада включен рис. 1.

3.2. Хронология событий после резкого повышения мощности

Точная разбивка по интервалам времени (момент первого взрыва принимается за ноль) в настоящем разделе неизвестна, она используется только для построения последовательности событий. Точная периодизация значения не имеет.

Примерно во время первого взрыва

Топливо в пределах около 30% объема разрушилось, что привело к взаимодействию с окружающей водой и последующему образованию пара и росту давления. Могло образоваться некоторое количество водорода.

Были разрушены некоторые топливные каналы вследствие нагрузок от тепловыделения радиоактивного распада, механических повреждений и чрезмерного давления. Предполагается, что разрушение произошло вблизи места скачка мощности, запорных пробок топливных каналов и трубопроводов над верхней защитной плитой активной зоны и колен впускных трубопроводов под нижней плитой активной зоны.

Через крышку блока №4 было выброшено некоторое количество топлива, графита кладки или материала каналов.

⁵ Основные нарушения и важные особенности, которые в конечном счете привели к катастрофе, выделены в табл. наклонным шрифтом. Сноски относятся к соответствующим буквенным обозначениям в тексте.

Через две—пять секунд

Вследствие парообразования в первом контуре давление внутри реакторного пространства возросло, возможно, до нескольких мегапаскалей (нескольких десятков бар), и пар образовывался как во время, так и после процесса разрушения.

Верхняя плита активной зоны (около 100 тонн) начала приподниматься, что привело к разрыву всех топливных каналов, поднятию регулирующих стержней и срезу горизонтальных трубопроводов.

Через две—три секунды после первого произошел второй взрыв. До сих пор не ясно, вызван ли этот взрыв вторым забросом мощности или наличием взрывоопасного водорода.

Продолжалось перемещение топлива в отсек под нижней плитой активной зоны и в район горизонтальных трубопроводов.

Графитовые блоки сместились в радиальном направлении, что привело к повреждению заполненного водой защитного бака.

В первые несколько минут

Пар и вода из разорванных трубопроводов системы снабжения и вода из защитных баков поступили в активную зону, реакторный зал и помещения под нижней плитой активной зоны.

Возможные реакции с графитом, цирконием и топливом.

В первый день

Вспомогательными насосами питательной воды в паросепараторы и водосборники почти сразу после аварии в течение около половины дня закачивалась вода с расходом по массе 200—300 тонн/час.

Закачка воды была прекращена вследствие опасности затопления блоков №1 и №2.

Прорыв пара из реактора.

Через район активной зоны устанавливается воздушный поток, приводимый высокими температурами активной зоны.

Со второго по десятый день

В результате реакции с графитом из реактора выходит черный дым.

Засыпка изолирующими и фильтрующими материалами.

Начиная с 5 мая прокачивание азота через активную зону реактора.

4. ГЛАВНЫЕ ФАКТОРЫ, СПОСОБСТВОВАВШИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЮ АВАРИИ

Предшествующее изложение основано на информации и рабочих документах, представленных советскими экспертами. На основе этой информации мы имели достоверное объяснение последовательности событий на блоке №4 Чернобыльской

АЭС и не пытались найти альтернативные объяснения. С нашей точки зрения, основными факторами, способствовавшими возникновению этой аварии, являются следующие:

Отключение автоматической защиты

Если бы эти системы защиты не были отключены, введение аварийных стержней остановило бы переходный процесс, невзирая ни на какие обстоятельства. Стоит повторить, что это испытание могло и должно было быть проведено таким образом, чтобы реактор был остановлен при начале испытания. С этой-то целью эксперимент и производился, но этим требованием пренебрегли.

Эксплуатация на неприемлемо низких уровнях мощности

После снижения мощности реактора она упала значительно ниже минимально допустимого для длительной эксплуатации уровня 700 МВт (тепл.) вследствие неверного переключения системы управления. Этот уровень установлен с целью избежать эксплуатацию реактора в таком режиме, когда повышение мощности приводит к еще большему ее росту. Чем больше паросодержание и ниже уровень мощности, тем сильнее этот эффект. В этих условиях эксперимент должен был быть прекращен.

Было не только принято решение продолжать эксперимент, но оно также сопровождалось серией дополнительных действий, которые еще более повысили уязвимость реактора в режиме малой мощности. Подключение дополнительных насосов и увеличение расхода теплоносителя значительно выше номинальных уровней создали условия для ускорения роста мощности.

Непосредственно перед отключением турбогенератора расход питательной воды был резко сокращен.

Система стержней автоматического регулирования успешно компенсировала это сокращение, но после этого она уже была не способна компенсировать снижение общего расхода, когда началось испытание. Без аварийной останавливающей защиты этот ускоряющийся рост мощности был неуправляем.

Доминирующим эффектом явилось то, что эксплуатация АЭС требовала высокого значения паросодержания. Те же действия привели также к недопустимым изменениям расположения регулирующих стержней и существенно снизили дополнительное охлаждение основного теплоносителя. Важным фактором остается неблагоприятное изменение паросодержания как основной составляющей коэффициента мощности в этих условиях. Следует отметить, что конструкции реактора РБМК не свойственны такого рода сложности при эксплуатации на полной мощности.

Решение о продолжении испытания

Испытание было начато в условиях, не соответствующих предписанным, и продолжалось, несмотря на очевидность того, что управление установкой было затруднено и было нарушено условие "запаса реактивности".

Все вышеуказанные моменты имеют довольно похожий характер и касаются дисциплины и действий персонала и руководства. Видимо, такое отношение сложилось в результате самонадеянности, явившейся следствием успешной безотказной эксплуатации и стремления во что бы то ни стало провести испытание.

Взаимосвязь с конструкцией АЭС

Физические характеристики:

Одной из характерных особенностей реактора РБМК является его положительный паровой коэффициент реактивности. Нет сомнения, что реакторы с такими характеристиками могут эксплуатироваться безопасно, однако тщательное внимание должно быть уделено конструкции систем безопасности и управления. Системы остановки должны быть спроектированы с достаточной скоростью срабатывания и реактивностью, позволяющей им справиться с максимальной положительной реактивностью, возникающей вследствие избыточного парообразования в теплоносителе при всех авариях, предусматриваемых при проектировании. Конструкция аппарата должна сводить к минимуму потенциальную возможность неправильного восприятия операторами физических характеристик.

Защитные оболочки:

Нижняя и верхняя бетонные конструкции выдержали нагрузки от заброса мощности, а также последующие нагрузки. Система сброса давления не получила повреждений и не усугубила аварии или разрушений. Однако очевидно, что радиационные последствия аварии были усугублены подъемом верхней плиты.

5. МЕРЫ ПО УЛУЧШЕНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ

Причины аварии многочисленны. Их сочетание привело к катастрофе. В отношении вопросов регламентов, действий персонала и руководства советские эксперты продемонстрировали общее намерение усовершенствовать их. В отношении же конструктивных особенностей в сочетании с ошибками и неверными оценками можно сказать больше. Признано, что необходимо максимально снизить уязвимость АЭС в отношении крупных нарушений, и в этом направлении предпринимается ряд шагов.

С целью недопущения установки регулирующих стержней в положение, когда нарушается требование наличия надлежащего "запаса реактивности", все стержни будут снабжены концевыми выключателями, обеспечивающими минимальное введение на глубину 1,2 м, и в активной зоне будут постоянно находиться 70—80 стержней. Эти две меры также в большой степени снизят значение парового коэффициента реактивности, и общая защита против проектных отказов, обусловленных особенностями конструкции, несомненно, повысится. Наблюдение требования о недопустимости эксплуатации на мощности ниже 700 МВт (тепл.) будет предотвращено введением дополнительной защитной остановки.

Эти первые меры будут осуществлены в ближайшее время. В дальнейшем для решения проблемы положительного парового коэффициента будут установлены непо-

движные поглотители и модифицировано топливо повышением обогащения с 2,0% до 2,4%. Другим перспективным усовершенствованием, которое приветствуется в наибольшей степени, является быстродействующая система остановки, подходы к которой в настоящее время изучаются.

6. УРОКИ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Понимание чернобыльской катастрофы приводит к следующим выводам:

- (a) конструкции АЭС должны быть в наиболее возможной степени невосприимчивы к ошибке оператора и к преднамеренному нарушению регламентов безопасности;
- (b) регламенты, относящиеся к эксплуатации АЭС, должны готовиться тщательным образом с уделением постоянного внимания влиянию на безопасность тех или иных намерений. Это особо важно в случаях, когда предполагаются нештатные действия;
- (c) когда предполагаются особые процедуры, которые первоначально задумывают и подробно разрабатывают специалисты, главную ответственность за безопасность эксплуатации должны нести старшие руководящие работники АЭС. В такой работе оценка задачи с точки зрения безопасности должна проводиться персоналом, всесторонне осознающим все ее последствия. Также важно для технических специалистов непосредственно участвовать в осуществлении специальных работ на станции, однако это не должно означать полноты полномочий в вопросах безопасности;
- (d) вообще необходима уверенность в том, что эксплуатационный персонал будет следовать установленным регламентам. Для обеспечения этого необходимо создание соответствующей атмосферы, которая обеспечивает надлежащее равновесие между необходимостью обеспечить выполнение поставленных задач и безопасностью, и при которой проводятся проверки "качества" обеспечения эксплуатационной безопасности, а неприятные и строгие методы обеспечения безопасности рассматриваются как благо, а не помеха.

Кроме того, дается следующая рекомендация.

Очевидно, что для дальнейшей оценки различных явлений и хода событий после резкого увеличения мощности настоятельно необходимо провести дополнительные исследования и проверки индивидуальных эффектов. Самое главное, необходимо проанализировать вещество из пространства активной зоны. Дальнейший анализ обеспечит лучшее понимание развития аварии и повреждений.

ВЫБРОС РАДИОНУКЛИДОВ В РЕЗУЛЬТАТЕ АВАРИИ

Выбросы радионуклидов в результате Чернобыльской аварии имели серьезные последствия в Советском Союзе и послужили причиной опасения общественности в большей части Западной Европы. Время и продолжительность процессов выбросов были необычными в сравнении с оценками, произведенными на основе анализов серьезных аварий, выполненных для реакторов других типов. Кроме того, изотопный состав и характер выброшенных материалов довольно значительно отличаются от данных, полученных на основе анализов предыдущих аварий. Выброс радионуклидов, наблюдавшийся во время чернобыльской аварии, представляет собой уникальный случай рассмотреть имеющиеся возможности для оценки параметров источников выбросов радионуклидов при серьезных авариях.

1. ПРЕДСТАВЛЕННАЯ СОВЕТСКИМ СОЮЗОМ ИНФОРМАЦИЯ О ВЫБРОСЕ РАДИОНУКЛИДОВ

Советские эксперты представили в рабочих документах и в ходе венского совещания по рассмотрению причин и последствий аварии информацию о радиоактивном выбросе в целом, об изменениях радионуклидного выброса в зависимости от времени и изотопного состава выброшенного вещества. Краткое изложение этой информации приводится ниже.

1.1. Общее количество радионуклидов в активной зоне и выброс радионуклидов в целом

Общее количество радионуклидов в активной зоне энергоблока №4 Чернобыльской АЭС в момент аварии составляло около 4×10^9 Бк (около 10^9 Ки). Изотопный состав радионуклидов приведен в таблице II.

На основе радиометрических измерений и различных технических анализов образцов, взятых в 30-километровой зоне вокруг Чернобыльской АЭС и по всему Советскому Союзу, эксперты из Советского Союза оценивают, что активность выброса топлива в результате чернобыльской аварии составляла порядка $1 \times 10^{18} - 2 \times 10^{18}$ Бк ($3 \times 10^7 - 5 \times 10^7$ Ки), без учета активности выброса благородных газов ксенона и криптона. Погрешности оценок $\pm 50\%$. Оценка советскими экспертами суммарного выброса отдельных радионуклидов приведена в таблице II. Полагают, что благородные газы полностью улетучились из топлива. Из топлива выделилось около 10–20% летучих радионуклидов иода, цезия и теллура. Выбросы более тугоплавких радионуклидов (бария, стронция, плутония, церия и т.д.) достигли 3–6%.

ТАБЛИЦА II. КОЛИЧЕСТВО РАДИОНУКЛИДОВ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ И ОБЩИЙ ВЫБРОС

Элемент	Период полураспада (сут.)	Количество ^а (Бк)	Доля радиоактивности, выброшенная из реактора, %
85-Kr	3930	3.3×10^{16}	~100
133-Xe	5.27	1.7×10^{18}	~100
131-I	8.05	1.3×10^{18}	20
132-Te	3.25	3.2×10^{17}	15
134-Cs	750	1.9×10^{17}	10
137-Cs	1.1×10^4	2.9×10^{17}	13
99-Mo	2.8	4.8×10^{18}	2.3
95-Zr	65.5	4.4×10^{18}	3.2
103-Ru	39.5	4.1×10^{18}	2.9
106-Ru	368	2.0×10^{18}	2.9
140-Ba	12.8	2.9×10^{18}	5.6
141-Ce	32.5	4.4×10^{18}	2.3
144-Ce	284	3.2×10^{18}	2.8
89-Sr	53	2.0×10^{18}	4.0
90-Sr	1.02×10^4	2.0×10^{17}	4.0
239-Np	2.35	1.4×10^{17}	3
238-Pu	3.15×10^4	1.0×10^{15}	3
239-Pu	8.9×10^6	8.5×10^{14}	3
240-Pu	2.4×10^6	1.2×10^{15}	3
241-Pu	4800	1.7×10^{17}	3
242-Cm	164	2.6×10^{16}	3

^а Спад радиоактивности скорректирован на 6 мая 1986 года и рассчитан по методике советских экспертов.

1.2. Мощность выброса

Выброс радионуклидов с Чернобыльской АЭС, не происходил как одиночное массированное событие. Напротив, в первый день аварии произошло лишь 25% выброса. Остальной выброс радиоактивности представлял собой растянувшийся на девять дней процесс. Все это время в Советском Союзе брались образцы воздуха и осадений на почву. На основе этих данных советские эксперты построили кривую временной зависимости мощности выброса, приведенную на рис. 2.

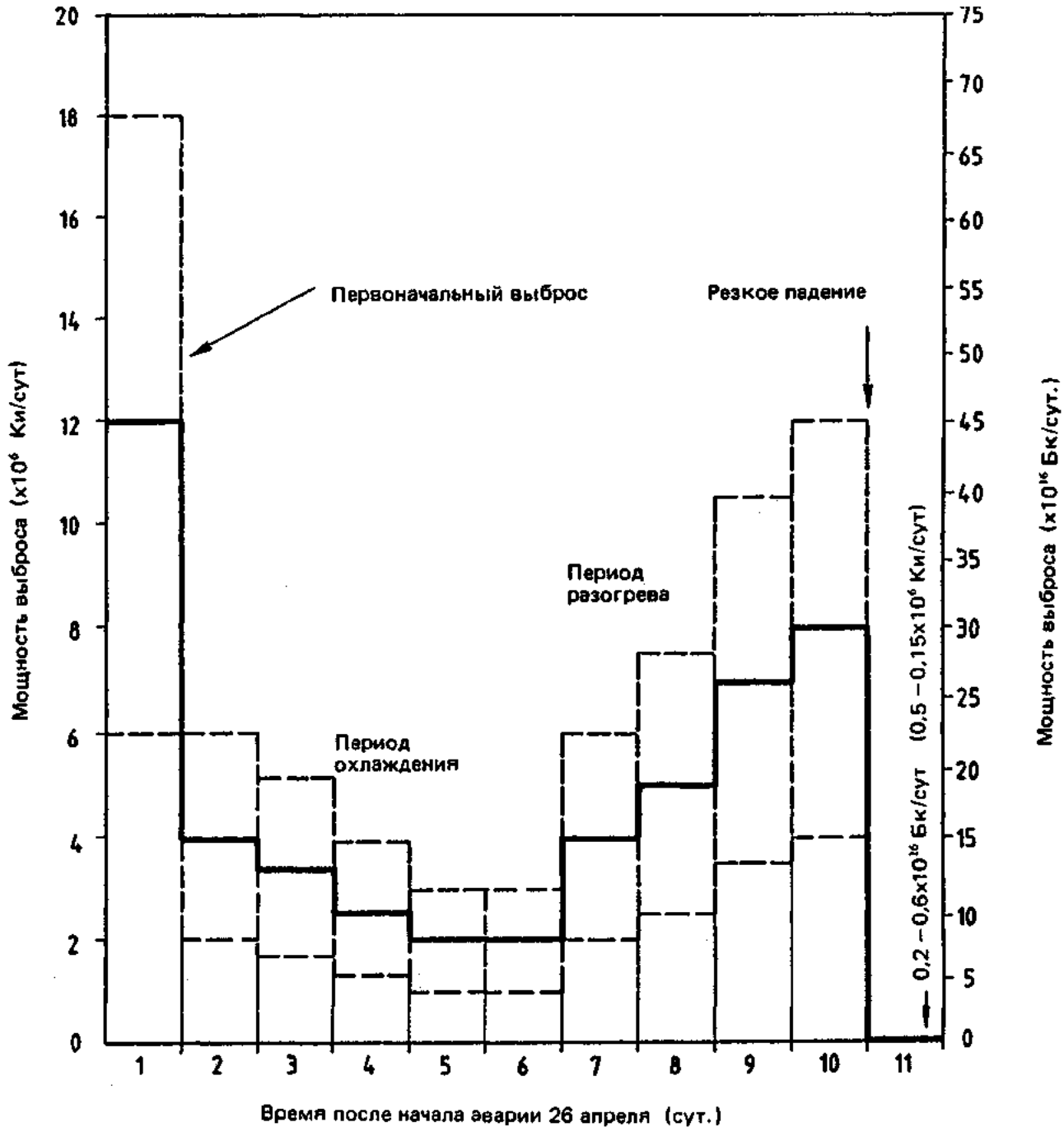


РИС. 2. Дневной выброс радиоактивных веществ в атмосферу во время Чернобыльской аварии (без учета благородных газов). Показанные величины рассчитаны на 6 мая 1986 г. с учетом радиоактивного распада, происшедшего до этой даты. Выброшенная 26 апреля 1986 г. радиоактивность составила $(70-80) \times 10^{16}$ Бк ($(20-22) \times 10^6$ Ки). Предел неопределенности для всех выбросов составляет $\pm 50\%$.

Кривую мощности выброса можно разделить на четыре отрезка:

- (1) первоначальный интенсивный выброс в первый день аварии;
- (2) пятидневный период, в течение которого мощность выброса падает до минимальной величины в шесть раз ниже первоначальной его мощности;
- (3) четырехдневный период, в течение которого мощность выброса возрастает до величины составляющей около 70% первоначальной его мощности;
- (4) резкое уменьшение выброса через девять дней после аварии до значения менее 1% первоначальной мощности и продолжающееся последующее снижение мощности выброса.

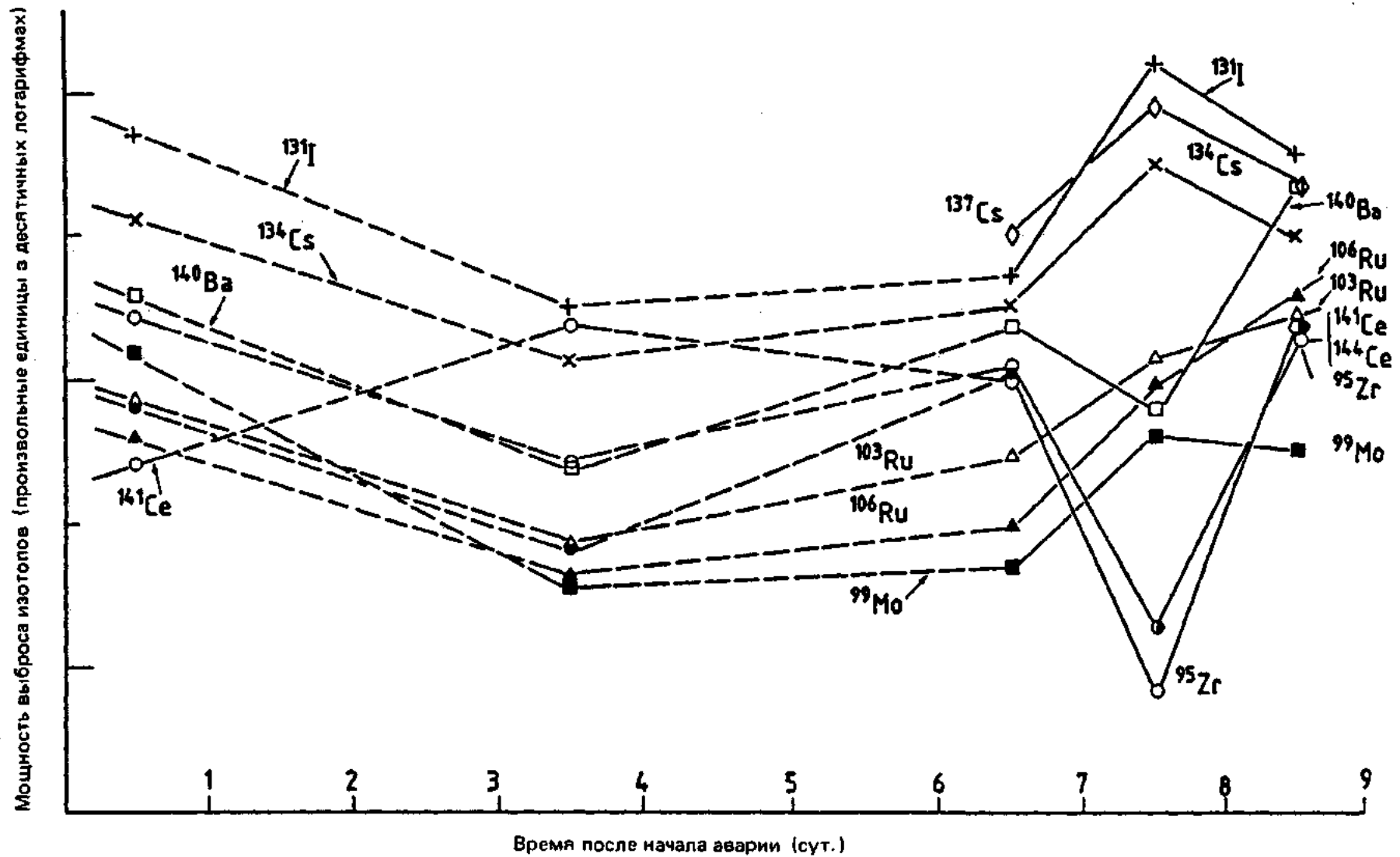


Рис. 3. Мощность выброса изотопов выведена на основании данных, представленных в советском докладе. Следует обратить внимание на то, что эти мощности выведены на основе предварительных данных, которые, возможно, не являются представительными для всех данных, собранных экспертами из СССР.

Распределение выпадения топлива вокруг Чернобыльской АЭС:

- (a) на площадке: 0,3–0,5% активной зоны;
- (b) в радиусе 0–20 км: 1,5–2% активной зоны;
- (c) в радиусе свыше 20 км: 1–1,5% активной зоны.

Было обнаружено, что образцы UO_2 имели тенденцию окисляться до U_3O_8 .

1.3. Состав выброшенного вещества

О характере выброса радиоактивных веществ можно далее судить по выбросам отдельных радионуклидов. Советские эксперты сообщили о составе нуклидов в пробах воздуха, взятых во время выброса. На основании этих данных и данных об общей мощности выброса оказалось возможным построить график гипотетической интенсивности изотопных выбросов для отдельных радионуклидов, показанный на рис.3. Было отмечено, что химические формы аэрозольных веществ совершенно различны.

Размеры частиц аэрозолей из активной зоны Чернобыльской АЭС широко варьировались в диапазоне от менее 1 мкм до десятков мкм.

2. РАССМОТРЕНИЕ ВЫБРОСА С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ЕГО МЕХАНИЗМА

2.1. Классификация механизмов выброса

Дальнейшее понимание предоставленных данных будет основываться на следующих хорошо известных характерных чертах выброса радионуклидов и генерации аэрозолей.

- (1) *Выброс в результате испарения.* При повышенных температурах радионуклиды могут переходить из конденсатной в паровую фазу и улетучиваться из топлива. Механизмы выброса в результате испарения являются основным элементом современных средств прогнозирования параметров источника радиоактивного выброса. Аэрозоли, образовавшиеся в процессе испарения, не обязательно совпадают по составу с исходным топливом. Обычно такие аэрозоли обогащены изотопами в сравнении с топливом в соответствии с их паровым давлением.
- (2) *Механический выброс.* При дроблении топлива могут образоваться частицы аэрозольных размеров ($< 10\text{ мкм}$). Образовавшиеся механическим путем частицы первоначально имеют тот же химический состав, что и топливо, из которого они образовались. Это сходство состава не обязательно сохраняется. При разлете образовавшихся механическим путем аэрозолей летучие компоненты могут быстро испариться, так как аэрозоли имеют исключительно высокие соотношения площади и поверхности к объему (около 3000 см^{-1}). Следовательно, образовавшиеся механическим путем аэрозоли могут лишиться некоторых летучих компонентов, свойственных топливу. С другой стороны, при охлаждении смеси пара и образовавшихся механическим путем аэрозолей на поверхностях последних

конденсируются пары. Следовательно, образовавшиеся механическим путем аэрозоли могут после охлаждения обогащаться некоторыми радионуклидами, особенно наиболее летучими из них. Таким образом, состав аэрозолей не может служить надежным индикатором процесса механического образования аэрозолей.

Аэрозоли, образовавшиеся как в результате механического процесса, так и процесса испарения, могут быть уловлены на АЭС. Однако эти частицы могут быть лишь временно исключены из радиоизлучения станции. Нагревание конструкций в ходе развития аварии может привести к повторному испарению летучих радионуклидов, отложившихся на поверхностях. Внезапные увеличения скоростей потоков газов могут вновь привести во взвешенное состояние отложившиеся механические частицы, образовавшиеся любым образом. Эти процессы повторного испарения и перехода во взвешенное состояние могут существенно осложнить картину взаимозависимости между выбросом радионуклидов и поведением обломков активной зоны.

Как механизмы выброса в результате испарения, так и механизмы механического выброса могут быть инициированы физическими или химическими процессами, затронувшими активную зону при аварии. Например, при движении с большой скоростью топливо в жидком виде ввиду гидродинамической неустойчивости обычно раздробляется в капли, которые могут иметь размеры аэрозолей. В то же время массовый перенос газовой фазы с поверхности движущегося с высокой скоростью топлива обычно настолько эффективен, что выброс в результате испарения с этой поверхности обычно протекает быстро.

Картина выброса радионуклидов, наблюдавшаяся при аварии в Чернобыле, должна была отражать процессы, происходившие в топливе. Одной из интересных проблем для будущего анализа будет рассмотрение собранных во время выброса данных с точки зрения механизмов, действовавших во время четырех этапов выброса.

Среди вопросов, на которые еще предстоит дать ответ в этой области, особое место занимают два. Пожалуй, наиболее необычной особенностью выброса во время аварии является возрастание мощности выброса приблизительно спустя шесть дней после начала аварии. Какого-либо конкретного объяснения этого предложено не было. Возможными объяснениями, отдельно или в совокупности, являются следующие:

- (a) как только прекратилась засыпка материалов (3 мая), отвод тепла от обломков уменьшился, температура повысилась и усилился выброс в результате испарения испарения;
- (b) несколько усилился поток газа над обломками, увеличив выделение вещества в результате испарения и ускорив химические реакции в обломках;
- (c) закончилось расплавление свинца и пиролиз доломита засыпки, произошло снижение теплоотвода от обломков, температура обломков возрасла, и вновь усилился выброс в результате испарения;
- (e) усиленное окисление под действием какого-то невыявленного механизма.

Здесь может оказаться ценным сравнение с некоторыми хорошо известными свойствами обломков активной зоны, полученными в результате анализа серьезных аварий на реакторах других типов. Повторный разогрев смеси обломков активной

зоны может оказать значительное воздействие на их свойства. При температуре свыше порядка 1500 К, сборки из циркониевого сплава и урановое топливо не образуют совместимую комбинацию материалов. Высокая растворимость кислорода в металлическом цирконии и способность двуокиси урана принимать различные стехиометрии означает возможность сильного взаимодействия между оболочкой и реакторным топливом. Лишь кинетические факторы препятствуют развитию этого взаимодействия при низких температурах. С повышением температуры кинетические барьеры теряют свое значение. При теоретически предсказанных температурах обломков активной зоны может возникнуть взаимодействие.

Пожалуй, больший интерес, чем ускорение выброса, представляет резкое его сокращение. Здесь также нет точного объяснения такого резкого сокращения. Гипотеза, которую нелегко опровергнуть, заключается в том, что нарастание выброса возникает ввиду повторного разогрева при переходе в жидкое состояние обломков активной зоны. Необходимая для перехода в жидкое состояние температура составляет 2300–2900 К в зависимости от количества неокисленного циркония в обломках. По мере перехода обломков в жидкое состояние усиливается испарение. Перешедший в жидкое состояние материал обломков может переместиться и в конечном счете упасть на расположенные внизу коллекторы трубопроводов, где они могут затвердеть. Охлаждающий газ, продолжающий поступать в коллекторы трубопроводов, не дает расплавиться охлажденным обломкам и вступить в реакцию с бетоном и стальными конструкциями в этой зоне реактора.

Логична также и вторая гипотеза. Принимаемые меры по снижению температуры поврежденной активной зоны могли просто достичь успешного результата.

3. УДЕРЖАНИЕ ВЫБРОШЕННЫХ ВЕЩЕСТВ

Выделение радионуклидов из топлива не означает, что радионуклиды покинули станцию. Выделившись из топлива, радионуклиды, прежде чем выйти за пределы разрушенных конструкций станции, должны преодолеть путь через обломки. В поврежденной Чернобыльской АЭС были некоторые возможности для улавливания выделившихся веществ. Аэрозоли могли диффундировать в графитовую поверхность над обломками активной зоны или осаждаться на нее. При условии получения удовлетворительного описания геометрии можно разработать довольно хорошую методику прогнозирования отложений на графитовых поверхностях реакторного пространства Чернобыльской АЭС.

Частицы, поступающие из каналов, могли быть уловлены слоями доломита, песка и глины, уложенными на обломки активной зоны. Эффективность этого улавливания находится в строгой зависимости от размеров аэрозольных частиц, толщины слоя и размеров частиц материалов засыпки. Цезий мог вступить в химические реакции с окислами бора, образовавшимися в B_4C , или с кремнеземом в песке и глине засыпки. Теллур мог вступить в химическую реакцию со свинцом в засыпке или с остатками

стальных конструкций над активной зоной. Как отмечено в предыдущем подразделе, эти механизмы могут вызвать лишь временное удержание высвободившихся радионуклидов.

После того как частицы аэрозолей покинули зону реакторного пространства Чернобыльской АЭС, площади поверхностей, пригодных для осаждения аэрозолей, оказались слишком незначительными, чтобы оказать существенное воздействие на последующие выбросы со станции.

4. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОАКТИВНОГО ВЫБРОСА ПРИ КРУПНЫХ АВАРИЯХ В СВЕТЕ ВЫБРОСОВ РАДИОНУКЛИДОВ В ЧЕРНОБЫЛЕ

Авария в Чернобыле продемонстрировала ряд особенностей выбросов радионуклидов, которые в прошлом были лишь предположительными и являлись предметами споров специалистов. Сейчас подтверждено, что при серьезной аварии реактора может произойти значительный выброс радиоактивных веществ. Кроме того, ясно, что продукты выброса могут переноситься на значительные расстояния от реактора. Необходимо проявлять некоторую осторожность, выходя за рамки этих качественных проявлений, подтверждающих сделанные ранее предположения и предсказания, и делая выводы относительно общего соответствия нынешних способов оценки характеристик радионуклидов при крупных авариях. Эту осторожность следует проявлять в связи с тем, что реактор РБМК и авария в Чернобыле могут иметь только им свойственные черты с недооцененными последствиями в плане выброса радионуклидов. Все же ряд выводов можно сделать:

- (1) *Моделирование выброса на станции.* Выброс радионуклидов на Чернобыльской АЭС произошел как единичное кратковременное событие. Более того, первоначальный выброс составил лишь около 25% общего обмена. Остальная часть выброса происходила в течение продолжительного периода времени, в ходе которого существенно изменились условия, определяющие образование радиоактивного следа и рассеяние радиоактивного материала вне площадки. Эта особенность — интенсивный первоначальный выброс, за которым последовал продолжительный по времени, но менее интенсивный выброс радиоактивности — часто предсказывается для аварий на установках, конструкция которых значительно отличается от РБМК.

Поэтому представляется, что рассеяние радиоактивных материалов за пределы площадки реактора и их выброс из топлива нельзя рассматривать как совершенно изолированные процессы. Моделирование рассеивания следует включать в качестве составного элемента методологии оценки параметров источников радионуклидов.

- (2) *Механические процессы выброса.* Есть основания полагать наличие существенного выброса радионуклидов в результате механического разрушения топлива. В ходе первой фазы выброса это механическое образование аэрозолей может быть результатом (а) взаимодействия расплава с водой; (б) попадания осколков активной

зоны в окислительную среду; или (с) характерных особенностей события, приводящего к реактивности. До сих пор нет адекватных моделей выбросов, связанных с этими событиями.

- (3) *Последующее повторное ускорение выброса.* Нынешний порядок оценки параметров источника радионуклидов при серьезной аварии не позволяет получить удовлетворительное объяснение ускорения выброса радионуклидов, наблюдавшегося в Чернобыле через шесть дней после начала аварии, и резкого сокращения выброса через примерно девять дней после ее начала. Увеличение доли летучих компонентов (таких как цезий, йод и теллур) может быть результатом увеличения температуры осколков активной зоны или нагревания конструкций до температур, достаточных для испарения летучих радионуклидов, осевших на этих конструкциях. Ускорение выброса более тугоплавких радионуклидов (таких как барий, стронций, церий, лантан, рутений и молибден), по всей видимости отражает очень резкое изменение состояния осколков активной зоны. Ускоренный выброс этих тугоплавких радионуклидов может объясняться расплавлением осколков активной зоны и их перемещением из реакторного пространства в коллекторы турбогенераторов. Как показало предварительное рассмотрение, имеющиеся модели могут не учитывать важный физический и химический инструментарий для количественного описания ускоренного выброса как тугоплавких оксидов (BaO , CeO_2 и т.д.), так и тугоплавких металлов (рутений, молибден и т.д.).

5. РЕКОМЕНДАЦИИ ОТНОСИТЕЛЬНО РАБОТЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СОВЕЩАНИЯ И ДЕЯТЕЛЬНОСТИ, ПРЕДПОЛАГАЮЩЕЙ МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО

В докладах, представленных Советским Союзом, содержится достаточно много информации относительно поведения радионуклидов. Для более детального понимания взаимосвязи между поведением осколков активной зоны и выбросом радионуклидов потребуются все же дополнительные данные. Неоспоримо желание рассмотреть явления связанные с аварией, в дальнейшем.

- (1) *Химические и физические формы веществ выброса.* В столь короткий срок после аварии невозможно собрать данные о химической форме радионуклидов, выделившихся на установке, или о физических видах осколков. Данные о химических формах и распределении частиц по физическому размеру указывают на характер процессов выброса. Это основные исходные данные для моделей рассеяния осколков. Данные о химической форме также полезны для прогнозирования дальнейшего поведения частиц, осевших на землю.
- (2) *Химическое состояние осколков активной зоны.* Возможные объяснения выброса радионуклидов в ходе аварии связаны с химическими взаимодействиями осколков с графитом или газами, проходящими через активную зону. Определение текущего химического состояния осколков активной зоны как в реакторном пространстве, так и в нижних коллекторах может прояснить влияние химических реакций в осколках активной зоны на наблюдаемые выбросы радионуклидов.

(3) *Оценка плана мероприятий по ликвидации последствий аварии.* Общая область методов ликвидации последствий аварии пока еще находится в стадии формирования. Советская стратегия сбрасывания материалов в активную зону представляется весьма эффективной с точки зрения сведения к минимуму выброса радионуклидов. Материалы, сброшенные в реакторное пространство, могли удержать температуру осколков активной зоны на уровне, достаточно низком для сведения к минимуму выброса, а также могли отделить пылевидные частицы от выделяющихся газов. Было бы полезно поэтому взять пробы материалов засыпки реактора и изучить, с тем чтобы выяснить, какие из возможных механизмов имеют преобладающее значение. Возникает ряд конкретных вопросов относительно этих веществ засыпки реактора:

- (a) Окислился ли B_4C до B_2O_3 и вступил ли B_2O_3 в реакцию с выделившимися радионуклидами?
- (b) Наступило ли разложение доломита?
- (c) В какой степени осколки физически зафиксировали радионуклиды?

Мероприятия по результатам совещания требуют, естественно, международного сотрудничества в ряде областей. Уже можно назвать три такие области:

- (1) *Исследования характеристик радиоактивного выброса.* Продолжительность исследования и имеющаяся методология не позволяют дать количественное объяснение выбросам радионуклидов, наблюдавшимся в ходе аварии в Чернобыле. Это в особенности относится к выбросам, проходившим в первый день, где речь может идти о выбросе, связанном с рассеянием осколков активной зоны в технологических каналах, взаимодействиях воды и осколков активной зоны, а также о рассеянии осколков в окислительных средах. По некоторым из этих вопросов сейчас ведутся исследования, в частности в Великобритании, Соединенных Штатах и Советском Союзе. В некоторых случаях в данном исследовании не рассматриваются последствия явлений с точки зрения характеристик выброса. МАГАТЭ могло бы способствовать обмену информацией между исследователями, включению в исследования работ по изучению параметров источника, что способствовало бы более детальному пониманию выбросов в Чернобыле и помогло бы решить этот вопрос.
- (2) *Взаимосвязка моделей выброса и дисперсии на близкие расстояния.* МАГАТЭ может способствовать взаимосвязке моделей выброса радионуклидов и рассеяния продуктов выброса с установки, с тем чтобы на их основе можно было делать более реалистичные оценки радиационных последствий крупных аварий. Можно было бы предусмотреть отработку "стандартных моделей" для различных вариантов моделирования. Например, такие стандартные проблемы могли бы предполагать:
 - (a) продолжительный выброс и рассеяние, исходящие от АЭС с открытой активной зоной без герметичной оболочки;
 - (b) резкий выброс и рассеяние из защитной оболочки в результате избыточного давления с эффектами быстрого заполнения бассейна-барботера и конденсации пара.

- (3) *Меры по ликвидации последствий аварии с целью сведения к минимуму выброса радионуклидов в результате аварий. МАГАТЭ может способствовать международному обмену идеями и результатами экспериментов относительно планов мероприятий, имеющих цель свести к минимуму выбросы радионуклидов в результате крупных аварий.*

МЕРОПРИЯТИЯ НА ПЛОЩАДКЕ

Мероприятия на площадке проходили в три этапа:

- (1) меры по борьбе с пожаром с целью сдерживания распространения огня и окончательной ликвидации пожара;
- (2) кратковременная стабилизация установки непосредственно после аварии;
- (3) долговременное восстановление, включающее в себя погребение в саркофаге поврежденного блока и контроль на продолжительный период за целостностью саркофага с обломками активной зоны и зданием реактора.

Меры по тушению пожара, которые были применены, оказались весьма эффективными и в значительной мере способствовали предотвращению распространения пожара блоках №№1, 2 и 3. Интенсивные радиационные поля стали наиболее серьезным фактором, осложнившим усилия по тушению пожара.

Кратковременная стабилизация и долгосрочное восстановление установки находятся в прямой связи и в сильной зависимости от физических процессов, возникших в связи с аварией, и выбросов радионуклидов (параметры источника выброса), что описывается в разделах I и II. Эти усилия по стабилизации были направлены на предотвращение разгорания графита и выброса радионуклидов. Важным мероприятием восстановительного процесса стала дезактивация самой площадки.

Меры по ликвидации последней аварии, принятые в Чернобыле, были в целом весьма успешными. Попытка в начальный момент понизить температуру обломков активной зоны путем подачи воды в активную зону аварийными и вспомогательными питательными насосами была явно безуспешной, и от нее быстро отказались. Последующие шаги, а именно забрасывание реактора материалами (карбидом бора, доломитом, песком, глиной и свинцом), подача азота для снижения температуры в пространстве активной зоны и сокращение концентрации кислорода, а также сооружение плоского теплообменника под фундаментом здания реактора, стабилизировали ситуацию на ранней стадии (около девяти дней спустя после первоначального выделения энергии) аварии.

В результате проведенной сразу после аварии радиационной оценки площадки была получена информация относительно состояния и местонахождения топливных элементов, состояния и местонахождения кусков графита, выброшенных из активной зоны взрывами, и предварительная информация о химических формах выделившихся веществ. Радиационные измерения и измерения местонахождения проводились как внутри, так и за пределами поврежденной установки. Они в значительной мере осложнялись тем фактом, что штатные системы измерения на установке были полностью выведены из строя. Выводы возможно сохранившихся датчиков были недоступны для персонала из-за радиационного поля.

Измерения обеспечили основу для выработки на длительную перспективу методов контроля за состоянием обломков активной зоны в здании реактора и основные пара-

метры для проектирования конструкции саркофага, а именно температуру и местонахождение обломков активной зоны, пределы уровней радиации, которые следует достичь после строительства (5,0 мР/ч на крыше и 1,0 мР/ч на стенах здания, соответственно), схемы принудительной вентиляции, основанные на конвекции воздушного потока, и длительная стабильность материалов (в первую очередь, бетона), используемых для строительства саркофага.

Ясно, что содержащийся в рабочем документе материал и дискуссии указывают на важность мер по ликвидации последствий аварии. Методы действий по ликвидации последствий ядерной аварии входят в сферу интересов других стран, но внимание к этому аспекту ядерной безопасности, непременно, имеет серьезную теоретическую подоплеку. Отсюда весьма успешный практический опыт ликвидации последствий аварии на чернобыльской площадке представляет большой интерес и должен быть подвергнут дальнейшему анализу и стать предметом новых документов.

1. БОРЬБА С ПОЖАРОМ

Предоставленное советскими экспертами описание борьбы с пожаром в ходе чернобыльской аварии было весьма полным. В нем содержалось много ценных наблюдений, применимых к пожарам на любых ядерных реакторах, независимо от причины.

Сразу после аварии на блоке №4 Чернобыльской АЭС прибыли три пожарных подразделения из городов Припяти и Чернобыля в целях усиления пожарных подразделений, работавших на площадке. Одно из наиболее важных требований при любом пожаре, включая и Чернобыльский: выиграть время для введения в действие различных планов тушения пожара. Было отмечено отсутствие специального оборудования (гидравлических подъемников) для доставки пожарных на крыши. Два взрыва произошли примерно в 1 ч 24 мин; огонь на крышах блоков №3 и №4 был локализован в 2 ч 10 мин и 2 ч 20 мин соответственно, к 5 часам утра пожар был ликвидирован.

Основными неотложными задачами были предотвращение распространения огня на блок №3, локализация огня на крыше общего машинного зала блоков №3 и №4, обеспечение защиты неповрежденных частей блока №4 (пультовой, внутри машинного зала, основные помещения главного циркуляционного насоса, опоры кабеля) и защиты воспламеняющихся материалов, находившихся на площадке, таких как дизельное топливо, резервуары с газом и химикаты.

Усилия пожарных были направлены на тушение выброшенных блоков и кусков горящего графита. Основным методом, который с успехом осуществлялся, состоял в изоляции и тушении водой графитовых блоков. Пожарные команды не столкнулись с какими-либо необычными проблемами с точки зрения методов пожаротушения, кроме того обстоятельства, что подавление разгорания графита заняло много времени. Радиационное поле, образовавшееся в ходе аварии, явилось, безусловно, источником многих трудностей при борьбе с пожаром. Эта проблема обсуждается далее в разделе IV.

Использовавшиеся методы пожаротушения в первую очередь включали в себя применение воды, пены и газа. Вода была использована для тушения пожаров на кры-

шах, в кабельных помещениях и на других поверхностях и для прекращения разложения графита и других материалов и обломков сооружений. Пена в основном использовалась в помещениях и местах, где находились воспламеняющиеся материалы, такие, как, например, дизельное топливо, химикаты, кабели и т.д. Для тушения пожара в пульту не был использован газ, хотя он имелся в наличии. Считается, что использование пены способствовало предотвращению вторичного подъема осевших радионуклидов.

Первоочередной задачей была непосредственная защита персонала на площадке. Для защиты от дыма и огня в соответствии с предварительным планом была проведена эвакуация в определенные защищенные от огня места.

В некоторых отношениях пожар на Чернобыльской АЭС имел черты, которые можно назвать общехарактерными для пожара на ядерных энергетических установках, а некоторые другие его черты представляются свойственными только этому пожару. Во-первых, для Чернобыля было характерно наличие пожара и высоких радиационных полей. По-видимому, в связи с этими условиями потребуются дальнейшее совершенствование пожарного оборудования, предназначенного для работы в экстремальных условиях при наличии радиоактивных материалов (топливо, горящий графит и т.д.). Существует необходимость в разработке научно-технических мероприятий, направленных на повышение эффективности при тушении пожара и предотвращении распространения и переноса радиоактивного вещества, которое может образоваться (борьба с пожаром с учетом специфических требований ядерной безопасности). Методы и оборудование могут включать в себя автоматизированные системы контроля и обнаружения, роботы-пожарные, использование менее воспламеняемых масел для турбин и т.д. Во-вторых, существует потребность в легкой одежде не только для защиты пожарных от высокой температуры, но также для обеспечения защиты от радиоактивного заражения.

2. МЕРЫ ПО ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИИ

Мероприятия по ликвидации последствий аварии на ранней стадии были направлены на предотвращение сгорания графита и процессов в районе активной зоны, которые могли бы привести к дальнейшему выбросу радионуклидов.

Разрушение всех топливных каналов, разрушение верхней трубопроводной системы, подъем и смещение верхнего защитного покрытия и разрушение нижних водных соединительных магистралей (труб), вероятно, могут объяснить безуспешность попыток, связанных с подачей воды в активную зону реактора. Вода, которая подавалась с помощью аварийных питательных насосов, пошла в другие части поврежденного первого контура. Белый пар и дым из реактора, которые наблюдались в первый день, дают основание предположить, что вода взаимодействовала с горячим материалом в шахте реактора. На второй день пара из реактора не наблюдалось. Подача воды была остановлена, когда стало ясно, что зараженная вода течет из блока №4 к блокам №1 и №2.

Подача воды, возможно, способствовала образованию в небольших количествах водорода и окиси углерода, что несколько повышало выделение тепла, но оно в значи-

тельной мере отводилось от установки. Общее влияние, вероятно, было несущественным.

Массовые мероприятия по ликвидации последствий аварии начались 28 апреля. Это включало в себя забрасывание реактора различными материалами с вертолетов. В активную зону сбрасывались следующие материалы:

- (1) карбид бора (B_4C) для предотвращения критичности;
- (2) доломит ($MgCa$) (CO_3)₂ для образования двуокси углерода, которая обеспечивает "газовое перекрытие" и может способствовать рассеянию внутреннего тепла в пространстве активной зоны (поглощает энергию горящего графита);
- (3) глина/песок для непосредственного удержания выброса радионуклидов и тушения пожара;
- (4) свинец для поглощения тепла с помощью расплавления и обеспечения жидкого слоя, который может своевременно герметизировать с целью уплотнения и защищать верхнюю часть шахты активной зоны.

По оценкам в активную зону было сброшено:

Карбид бора — 40 тонн

Доломит — 800 тонн

Глина/песок — 1800 тонн

Свинец — 2400 тонн

Система для подачи холодного азота в пространство реактора была установлена 4—5 мая. Цель — обеспечить дополнительное охлаждение продуктов выброса из активной зоны и создать "перекрытие" против кислорода. Давление азота обеспечивалось компрессором станции, а подавался азот через нижние трубопроводы под реактором.

К 6 мая температура в активной зоне упала, и образовался стабильный конвективный поток воздуха через пространство активной зоны в свободную атмосферу. Соответствующие действия, по всей видимости, привели смесь и "обломки активной зоны/материалы" в состояние полуравновесия и, вероятно, способствовали резкому сокращению выбросов (и окончательной стабилизации) путем устойчивого отвода тепла, выделяемого обломками активной зоны, и некоторой фильтрации радионуклидов.

Кроме того, началась работа по сооружению временного плоского теплообменника под фундаментом здания реактора. Решение построить его было принято на ранней стадии аварии, когда принималась во внимание возможность взаимодействия вещества активной зоны с бетоном и когда было очень мало информации относительно физического состояния разрушенной активной зоны. Эта работа была закончена к концу июня. Теплообменник обеспечивает сейчас дополнительный механизм для отвода тепла.

3. ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО ЛИКВИДАЦИИ АВАРИИ

Теоретическая работа в отношении мероприятий по ликвидации аварии первоначально сосредоточилась на использовании воды для охлаждения обломков активной зоны и, таким образом, для снижения или прекращения выброса радиоактивности из станции. Использование воды в качестве первоочередного средства для ликвидации

аварии на любом реакторе может вызвать потенциальные проблемы, связанные с образованием пара и водорода и бурными взаимодействиями топлива/теплоносителя. Эти потенциальные проблемы в прошлом помешали детальной разработке стратегии в отношении мероприятий по ликвидации аварий.

Цель мероприятий по ликвидации аварии в Чернобыле фактически состояла в том, чтобы ограничить продолжающийся выброс радионуклидов. Группа по ликвидации аварии стремилась как можно быстрее снизить мощность выброса радионуклидов до незначительного уровня, по сравнению с пиковым уровнем в течение первого этапа аварии. Когда предпринимались первые шаги, вода использовалась для охлаждения обломков активной зоны. Эти попытки оказались неэффективными и были прекращены. Тогда советские эксперты, работающие на станции, начали применять необычные и новаторские методы для снижения выброса радионуклидов. Применялись два важных метода:

- (1) сброс сухих неорганических материалов на активную зону;
- (2) газовое окутывание реакторной камеры.

Эти методы представляют большой интерес, поскольку они значительно отличаются от обычных концепций и поскольку их применение в конечном счете оказалось успешным.

Методы, использованные в Чернобыле, открыли новые возможности в области планирования мероприятий по ликвидации аварий. Однако срочность аварийной ситуации в Чернобыле привела к тому, что методы применялись в такой быстрой последовательности, что неясно, какой из них оказался наиболее эффективным. Практически невозможно отчетливо определить, можно ли было применить больше почти оптимальных материалов и методов.

Основные меры, которые последуют за обсуждениями аварии, будут основываться на успешном опыте, приобретенном в Чернобыле, путем:

- (1) организации оценки стратегий в отношении мероприятий по ликвидации аварии;
- (2) отбора оптимальных материалов для отвода тепла от обломков активной зоны и уменьшения выброса радионуклидов в результате аварии с расплавлением активной зоны.

По-видимому, во всем мире имеется значительный интерес к этим усилиям, поскольку мероприятия по ликвидации аварии являются общими для всех типов реакторов.

4. РАДИОЛОГИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОЩАДКИ

Радиологические исследования площадки после аварии преследовали две цели:

- (1) выяснение уровней загрязнения, с которыми будет иметь дело персонал, занимающийся очисткой после аварии;
- (2) определение местонахождения и стабильности обломков активной зоны в пределах четвертого блока.

В исследованиях площадки с целью определения уровней загрязнения использовались:

- (1) воздушная гамма-фотосъемка;
- (2) воздушное гамма-сканирование с помощью коллимированных детекторов;
- (3) альфа- и гамма-спектроскопия и бета-измерения образцов почвы;
- (4) гамма-спектроскопия проб аэрозолей, полученных на высоте около 3 и 200 метров над площадкой.

Важной задачей являлось установление местонахождения топлива с помощью гамма-сканирования в помещениях станции. Первоначальная оценка, из которой следовало, что около половины топлива находится в машинном зале, оказалась неверной. Ошибка была вызвана неточностью измерений методом гамма-сканирования. По мере продолжения исследования зонды были помещены в трубы в пределах верхней и нижней частей камеры активной зоны.

В районе основания реактора патрубки основных циркуляционных водяных насосов были обрезаны и термодатчики и гамма-датчики были установлены в трубах по пространству активной зоны. Измерения показали поле излучения от 10^3 до 10^5 р/ч, подтверждающее наличие топлива. Измеренная температура колебалась приблизительно от 30 до 50°C , в зависимости от того, осуществлялась циркуляция воздуха по трубам или нет.

По-прежнему имеется потребность в более подробных данных перед тем, как можно будет полностью интерпретировать данные радиационных исследований. Основными результатами радиологического исследования, которые могут быть кратко изложены на этом этапе, являются:

- (1) 0,3–0,5% топлива отложилось на площадке;
 - (2) значительная часть обломков активной зоны находится внутри реакторной камеры между биологическим щитом и остатками активной зоны, а также в трубах, расположенных ниже активной зоны;
 - (3) в пространстве над реакторной шахтой измерения температуры и гамма-излучений осуществлялись с помощью датчиков, спускаемых с вертолетов. В приблизительном центре реактора измерения показывают, что интенсивность излучения выше 10^4 р/ч, а температура около $300\text{--}350^\circ\text{C}$. Датчики, опускаемые в активную зону, имеют очень короткий срок службы при наличии поля сильного излучения и высоких температур;
 - (4) в начале августа специальные датчики были установлены в камере активной зоны для измерения гамма-излучения, теплового потока и скорости движения воздуха (по горизонтали и по вертикали). Наблюдаемые колебания температуры зависят от скорости ветра и движения воздуха, а также от других еще не установленных параметров; измеренные скорости движения воздуха по вертикали составляют около 0,8–1,0 м/с. Скорости по горизонтали составляют около 0,5–0,8 м/с.
- Вся упомянутая информация имеет чрезвычайно важное значение для проектирования схемы вентиляции саркофага. Проведение измерений усложняется расстоянием (используется стальной трос длиной приблизительно 240 м), ветром и т. д.

В настоящее время работают четыре таких датчика, однако планируется установить еще дополнительно шесть;

- (5) для измерения размера и концентрации аэрозолей рассматривается возможность использования лазеров с расстояния приблизительно в 1 км. Это также имеет важное значение для будущей системы фильтрации в погребенном блоке.

Визуальный обзор площадки подтвердил, что лишь небольшое количество графита было выброшено со станции. Большая часть графита осталась в шахте реактора. По последним данным, выгорело около 10% (250 тонн) графита.

Исследование графитных блоков и обломков показало, что выброшенный графит в основном был из незаполненных топливом областей активной зоны. Проведенные к настоящему времени анализы указывают на отсутствие какого-либо топлива в этом графите. Исследование продуктов деления в выброшенном графите может дать некоторую информацию о температурных режимах, в которых находился графит.

Химические и физические формы материалов, выброшенных из активной зоны, в настоящее время изучаются советскими экспертами. Пока может быть произведена лишь частичная качественная оценка величин аэрозольных частиц. Величина частиц на площадке, содержащих плутоний и трансурановые элементы, варьируется от менее 1 мкм до десятков мкм для плутония и некоторых трансурановых элементов. Было бы желательно получить в будущем информацию об этих химических формах.

5. ОЧИСТКА ПЛОЩАДКИ

Деятельность по очистке и дезактивации площадки началась незамедлительно после аварии, и в этой деятельности использовались различные методы, от простого мытья и очистки щеткой до робототехники. Различные химические растворы и органические аэрозоли использовались в основном для предотвращения повторного образования суспензий отложившихся веществ. В некоторых случаях бетонные плиты обеспечивали необходимую долговременную защиту. Вопрос об очистке площадки более подробно рассматривается в разделе IV.

6. РОБОТОТЕХНИКА

Использование робототехники в случае возникновения аварийных ситуаций на реакторах представляет большой интерес. Будущая информация в этой области является исключительно важной, поскольку методы, применяемые в робототехнике, могут эффективно использоваться для тушения пожаров, доставки диагностических приборов и для дезактивации.

7. ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

Визуальные и дозиметрические исследования, проведенные в различных помещениях, отсеках и системе трубопроводов, ограничивались и затруднялись мощными поля-

ми излучений и отсутствием доступа к поврежденным и сильно загрязненным блокам. Обычная штатная система измерений была полностью выведена из строя.

Вначале использовалось в основном гамма-сканирование. На более позднем этапе были установлены датчики температуры для проведения измерений в различных точках, главным образом в нижней системе трубопроводов и над шахтой реактора. Предварительный вывод сводится к тому, что большинство дозиметрических контрольно-измерительных приборов при наличии мощных полей излучений не функционирует надлежащим образом и зачастую дает ошибочные или весьма неточные данные. Очень возможно, что разработка диагностического оборудования, стойкого к излучению, может стать важным видом деятельности в будущем.

8. КОНСЕРВАЦИЯ ПОВРЕЖДЕННОГО БЛОКА

Запланирована долговременная консервация блока №4 с целью обеспечения нормального поля излучения в прилегающем районе и предотвращения утечки радиоактивных веществ. Это, без сомнения, явится значительным техническим новшеством, которое будет представлять большой интерес для экспертов по вопросам ядерной безопасности.

Основные критерии, принятые в отношении конструкции саркофага, могут быть изложены следующим образом:

8.1. Технические критерии

- (1) Соответствие захороненных обломков активной зоны и продуктов деления всем критериям и стандартам радиационной защиты. Цель состоит в достижении радиационного уровня, не превышающего 5,0 мР/ч на крыше и 1,0 мР/ч на стенах.
- (2) Проектные уровни на прочность для всех природных явлений (таких как ветер, землетрясение, экспериментальная температура), которые могут произойти на этой площадке с годовой вероятностью превышения в 10^{-4} . Этот уровень используется для других важных конструкций в Советском Союзе.

8.2. Критерии, относящиеся к методам строительства

- (1) Сведение к минимуму времени строительства.
- (2) Использование наиболее простых, надежных опробованных строительных средств.
- (3) Сведение к минимуму доз облучения строителей.

На основе критериев, содержащих в докладе выдвинутых в ходе обсуждений, не ясно, должен ли саркофаг обеспечить постоянное хранение обломков активной зоны и продуктов деления, содержащихся в четвертом блоке. Кроме того, не обсуждался контроль параметров грунтовых вод (таких, как активность, температура и т.д.).

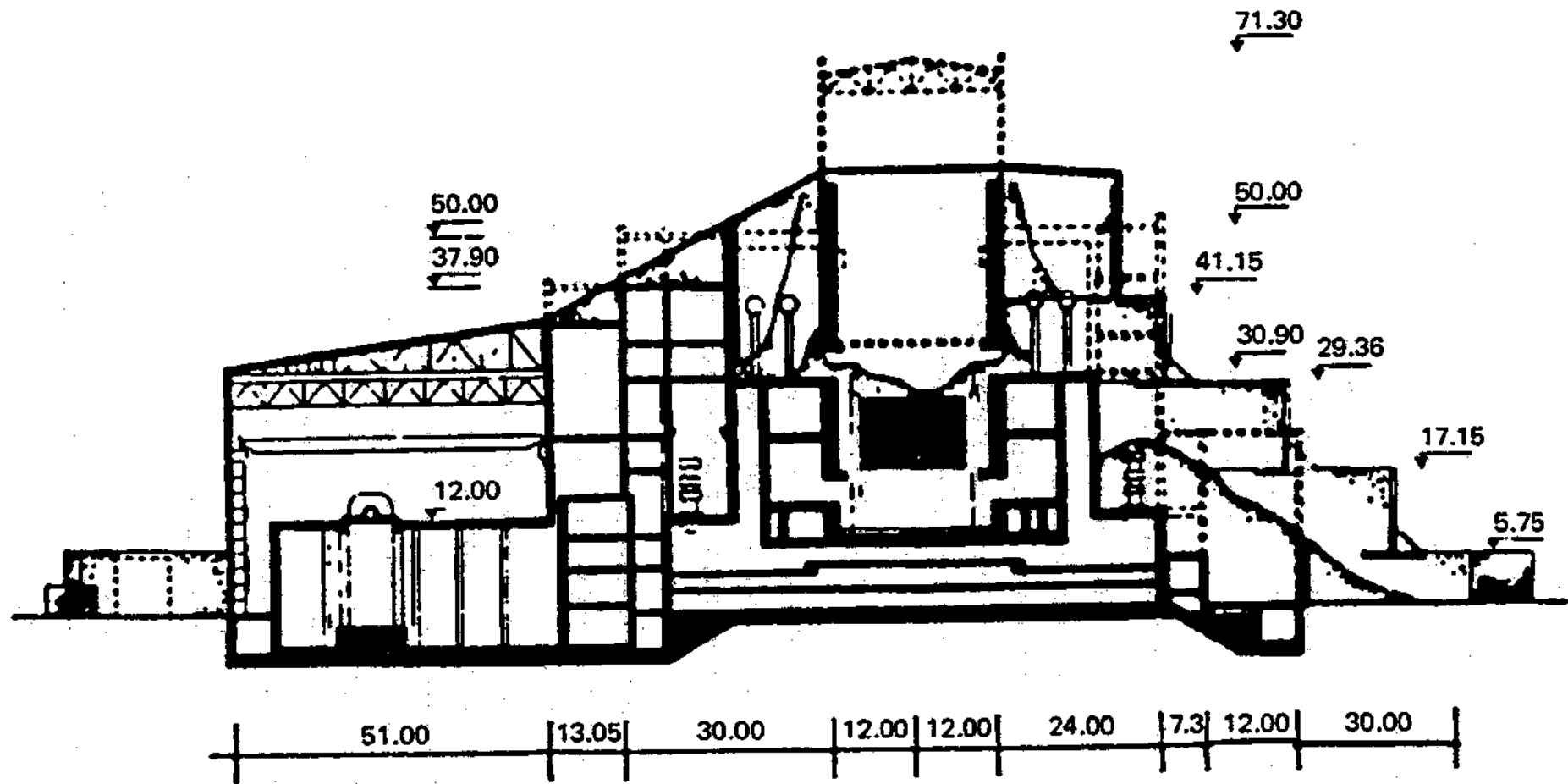


РИС. 4. Схема захоронения энергоблока №4. Поперечный разрез (размеры даны в метрах).

Схема постоянного обезвоживания зоны вокруг блока №4, а также контроль грунтовых вод являются двумя важными темами для рассмотрения.

Концепция конструкции показана на рис. 4. Строительство стен осуществляется путем сооружения террас для постепенной консервации здания реактора. Конструкционным материалом является бетон. Отвод тепла будет достигаться за счет использования систем вентиляции и фильтрации. Было изучено более десяти вариантов, относящихся к категории как разомкнутых, так и замкнутых схем.

Остались необсужденными вопросы, касающиеся пути воздушного потока в реакторном пространстве, возможных отклонений и т. д.

Открытая система была выбрана в основном из соображений простоты измерения (легче поддается мониторингу) и возможности внесения со временем изменений, модификаций и т. д.

Предусматривается, что конструкция саркофага будет включать:

- (a) внешние защитные стены по периметру;
- (b) внутренние бетонные разделительные стены в машинном зале между третьим и четвертым блоками, в блоке "В" и в деаэрационной вдоль машинного зала и со стороны завала у баллонной системы аварийного охлаждения активной зоны;
- (c) металлическую разделительную стену в машинном зале между вторым и третьим блоками;
- (d) защитное перекрытие над машинным залом.

В зависимости от защитных и конструктивных требований защитные бетонные стены должны быть толщиной в 1 м и более. Вопрос о воздействии этой новой нагрузки на основание или об утечке в грунтовые воды через фундаментную плиту не обсуждался.

Очевидно, что в ходе пояснений долговременная стойкость бетона была подробно обсуждена. В связи с теплопроводностью бетона на длительную перспективу возник вопрос о прочности бетона.

Советские эксперты дали описание экспериментов, осуществляемых при температурах от 2000°С до 2600°С. Связующим элементом в бетоне является смесь алюмината гидрата кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и гидрата CaSiO_3 , которая плавится при температуре около 2000°С. Большинство видов бетона плавится при температурах от 1100 до 1600°С. Материалы, используемые для экспериментов, являются тугоплавкими и не могут называться бетоном. Технология изготовления огнеупорных материалов находится на начальной стадии развития. Советские специалисты столкнулись с некоторыми трудностями при изготовлении таких материалов. Возник вопрос о возможности теплового взрыва бетона при взаимодействии с UO_2 , однако этот процесс рассматривается как весьма маловероятный.

Обычно считается, что срок службы АЭС (т. е. период времени, в течение которого атомные электростанции подвергаются воздействию экстремальных явлений) составляет приблизительно 50 лет. Если предусмотренный срок службы конструкции саркофага намного превышает этот период, функциональная (негодовая) надежность такой кон-

струкции будет значительно ниже, чем у ядерных электростанций. В целом можно поднять следующие вопросы:

- (1) Каков предсказуемый срок службы саркофага?
- (2) Если срок службы конструкции должен намного превышать 50 лет, предусматривается ли возможность улучшения конструкции на более позднем этапе?
- (3) Насколько снижается значение целостности конструкции со временем по мере понижения уровня радиоактивности в результате распада?

АСПЕКТЫ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В СВЯЗИ С АВАРИЕЙ

1. ВВЕДЕНИЕ

В разделе IV рассматриваются все аспекты радиационной безопасности в связи с аварией. В подразделе 2 кратко излагаются некоторые радиационные проблемы, возникшие в период принятия первоначальных противоаварийных мер в пределах площадки, и выводы, которые можно сделать из опыта, полученного советскими специалистами в ходе аварий в Чернобыле. В подразделе 3 изложены противоаварийные мероприятия за пределами площадки и выводы, которые можно сделать из этой аварии. В этом же разделе определены сферы будущей работы на международном уровне. В подразделе 4 речь идет о дезактивации оборудования и зданий на площадке и об окружающей среде в целом. Распространение радионуклидов в атмосфере и их перенос через остальную окружающую среду на человека излагаются в подразделе 5, где приведены расчеты доз облучения отдельных лиц и групп населения Советского Союза. В заключение, в подразделе 6 рассматриваются непосредственные и более отдаленные последствия аварии для здоровья. При рассмотрении непосредственных последствий излагается опыт лечения лиц, получивших высокие дозы облучения.

2. ПЕРВОНАЧАЛЬНЫЕ ПРОТИВОАВАРИЙНЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ В ПРЕДЕЛАХ ПЛОЩАДКИ

Из опыта СССР можно сделать ряд выводов о предстоящей в будущем работе по проектированию установок, эксплуатационным регламентам, оборудованию и планированию мероприятий на случай аварийных ситуаций в пределах площадки.

К некоторым из этих аспектов относят:

Проектирование оборудования, необходимого для смягчения последствий аварии в пределах площадки. Такие виды оборудования, как противопожарные системы и роботы должны входить в состав конструкции установки и быть доступны в целях достижения эффективного уменьшения последствий аварии и принятия мер контроля без излишнего облучения аварийного персонала.

Создание соответствующей защитной одежды и оборудования для использования пожарными и аварийными бригадами на установке. Наряду с ожидаемыми полями высокого облучения, которые сами по себе вызвали некоторые трудности, отмечалась высокая степень загрязнения воздуха бета-частицами, которая привела к тяжелым ожогам кожи.

Необходимы серьезные усилия по созданию дополнительной системы дозиметрического контроля для персонала, работающего на установке в ходе аварии и в период ликвидации ее последствий. Вполне очевидно, что необходимо обеспечить

персонал, в особенности персонал аварийных и пожарных бригад, интегральными личными дозиметрами с сигнальной системой повышения дозы облучения.

Объем работы в будущем предполагает обсуждение проектных критериев и эффектов вентиляции на ранних этапах после возникновения аварии, а также последствий, связанных с профессиональным облучением. Будут также обсуждаться блочные щиты управления и другие основные узлы станции с точки зрения их пригодности для нахождения в них человека; при этом будут также рассматриваться станции с несколькими блоками на одной площадке.

К другим проблемам относятся радиоактивное загрязнение и радиационные поля, зарегистрированные на первом, втором и третьем блоках. Советские эксперты сообщили о том, что вследствие уровней радиации, зарегистрированных в настоящее время, эксплуатация этих блоков будет осуществляться особым образом при частой смене операторов. Предполагается, что операторы с других АЭС будут отбираться для работы сроком в две недели на блоках №1 и №2. Такой режим эксплуатации потребует повышенного внимания к вопросам радиационной безопасности, включая также вопрос о коллективных дозах облучения и интенсификации надзора за дозами облучения. Срок ввода в эксплуатацию блока №3 в настоящее время не определен.

Вопросы профессиональной радиационной безопасности возникнут в ходе дезактивации установок и других объектов на площадке и за ее пределами. Опыт, накопленный в результате этих мероприятий по дезактивации, будет очень полезным для тех, кому, возможно, придется осуществлять дезактивацию больших серьезно загрязненных районов.

Оборудование для радиационного контроля оказалось в сложных экологических условиях. Потенциальная сложность этой проблемы была определена после аварии на АЭС "Три- майл- айленд", однако опыт Чернобыля осложнил решение этой задачи и потребовал расширения исследований в этой области.

3. ПРОТИВОАВАРИЙНЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ ЗА ПРЕДЕЛАМИ ПЛОЩАДКИ

Как только стало понятно, что на установке произошла авария и начался пожар, были приняты первые меры, к которым относятся ликвидация пожара, краткосрочные операции по стабилизации установки и передача сигнала о тревоге компетентным органам.

26 апреля компетентные органы в Москве получили сигнал тревоги в связи с аварией и на площадку была незамедлительно откомандирована группа специалистов для оказания помощи местным компетентным органам и дирекции станции в ликвидации аварийной ситуации. На начальном этапе было трудно дать в сообщении точное представление о серьезности аварийной ситуации на станции и за пределами площадки.

По прибытии группа специалистов оценила серьезность ситуации. Одно из первоочередных решений группы состояло в том, чтобы в целях предосторожности эвакуировать город Припять в кратчайшие по возможности сроки. Утром 26 апреля населению было указано плотно закрыть окна и двери и оставаться в помещении. Школы и детские сады были закрыты.

Для предотвращения скопления в щитовидной железе радиоизотопов иода (в основном иода-131) из радиоактивно загрязненной воздушной струи среди населения окружающей зоны были распространены таблетки иодистого калия. Это мероприятие было проведено добровольцами, которые выдавали иодистые таблетки непосредственно отдельным жителям, переходя от дома к дому. Эта работа началась утром 26 апреля.

Был организован сбор и сопоставление данных метеорологического и радиационного дозиметрического контроля. Началось проведение радиационного дозиметрического контроля воздушного пространства с помощью самолетов и вертолетов. Вертолеты ВВС, которые использовались в ходе противоаварийных мероприятий, были оснащены приборами для взятия образцов воздуха и приборами радиационного обнаружения. Экипажи были обеспечены личными дозиметрами и респираторами.

Поздней ночью 26 апреля уровни радиации в г. Припяти начали повышаться, достигнув 27 апреля величины порядка 10 мЗв/ч. Вскоре стало очевидно, что нижний предел уровня вмешательства с целью эвакуации (250 мЗв — доза облучения всего тела) и в конечном итоге даже верхний предел уровня вмешательства (750 мЗв — доза облучения всего тела) могут быть превышены, если население останется в своих домах и никаких других контрмер не будет принято. Требовалось выработать специальные планы эвакуации с учетом реальной ситуации, поскольку не все известные мероприятия можно было осуществить.

Эвакуация из г. Припяти началась утром 27 апреля после того, как на основании первоначальных результатов радиационного дозиметрического контроля были выработаны маршруты эвакуации, собраны все необходимые транспортные средства, оборудование и сопровождающий персонал, определены, укомплектованы и оборудованы центры переселения. По тревоге были введены в действие все медицинские средства и организованы специальные медицинские бригады оказания помощи эвакуированным.

Около 300 человек из числа работавших на площадке были госпитализированы с диагнозами: лучевая болезнь и ожоги. В течение первых нескольких недель им были предоставлены специальное лечение и уход. Ни один человек из числа населения за пределами площадки не был госпитализирован с диагнозом лучевой болезни, хотя многие тем не менее, оказались в больницах по другим причинам.

Следовало создать необходимое обеспечение для дезактивации кожи людей и в некоторых случаях — для обмена одежды.

В последующие дни стало необходимо постепенно применять такие же защитные меры в других населенных пунктах на территории в радиусе примерно 30 км от АЭС. Из этого района наряду с людьми пришлось эвакуировать десятки тысяч поголовья скота с помощью сотен грузовиков.

Эвакуация населения помогла удержать уровень облучения большинства лиц ниже дозового уровня вмешательства.

Кроме того, были приняты меры для предотвращения или уменьшения последствий от загрязнения водоемов и грунтовых вод.

В течение всего этого времени проводился широкомасштабный радиационный контроль окружающей среды (произошло загрязнение большого количества пищевых продуктов, и необходимо было установить определенные уровни вмешательства для

пищевых продуктов). В результате этого потребление молока и других пищевых продуктов было запрещено на значительной территории.

В результате загрязнения район радиусом 30 км был разделен на три зоны: особую (приблизительно 4—5 км вокруг станции), в которую в ближайшем будущем не предусматривается доступ населения и в которой не разрешена никакая-либо деятельность за исключением деятельности, необходимой на установке; 5—10-километровая зона, в которую по истечении некоторого времени может быть разрешен частичный доступ и в которой могут быть разрешены специальные виды деятельности, и 10—30-километровая зона, в которую населению в конечном счете может быть разрешено вернуться и в которой можно будет возобновить сельскохозяйственную деятельность, но при соблюдении строгой программы радиационного наблюдения.

На границах зон был установлен проходной контроль для персонала и транспорта с целью сокращения распространения радиоактивного загрязнения.

Принятие всех защитных мер, развертывание средств и использование персонала санкционировалось и координировалось специальной комиссией.

Особые усилия потребовались для дезактивации оборудования и районов за пределами площадки.

Один общий вывод, который можно сделать из принятых фактических мер по ликвидации аварии, состоит в том, что, хотя инициативу по их принятию пришлось проявить на местном уровне, мероприятия по ликвидации аварийной ситуации и принятию защитных мер в целом потребовали быстрого увеличения ресурсов. Из-за масштабов аварии невозможно было ожидать наличие таких ресурсов и компетентного органа для их выделения на местном уровне.

Необходимо признать, что для любой аварии с такими серьезными последствиями, независимо от ее местонахождения или страны, в которой она произошла, потребуется большой объем людских ресурсов и оборудования с целью установления контроля над ситуацией и сокращения последствий для населения и окружающей среды. Это в свою очередь, по-видимому, вызывает необходимость в перемещении ресурсов, расположенных на значительных расстояниях и на большой площади.

Условия для достижения этой цели необходимо принимать во внимание при организации эксплуатации станции и в планах мероприятий общественных компетентных органов на случай аварийной ситуации путем обеспечения того, чтобы более ограниченные, однако тщательно разработанные официальные мероприятия, обычно включаемые в план эксплуатирующей организации на случай аварийной ситуации, могли быть переведены на специальную основу, если появится необходимость в принятии мер в случае возникновения крупной аварии, вызывающей значительные последствия за пределами площадки.

Были обсуждены вопросы дезактивации и принятия аварийных мер. Многие поднятые на совещании вопросы в связи с принятием аварийных мер касались следующих тем: организация мероприятий по ликвидации аварии; уровни вмешательства в случае аварийной ситуации; эвакуация и размещение, а также иодная профилактика.

В отношении каждой из этих тем требовалось обсудить критерии для принятия мер, эффективность мер в свете того, что произошло, проблемы, возникающие при их

принятии, и выводы, которые могут быть сделаны на основе полученного опыта с целью повышения качества существующих планов на случай аварийных ситуаций.

Советские эксперты подчеркнули важность создания централизованного органа на случай аварийной ситуации, координирующего работу со всеми компетентными органами и правительственными учреждениями для осуществления руководства над ответственной организацией относительно всех возможных проблем, которые могут возникнуть при координации усилий по эвакуации, перемещению населения и скота, контролю, предоставлению медицинской и социальной помощи, транспортным перевозкам и материально-техническому снабжению. Установление уровней вмешательства на случай аварийной ситуации было определено в качестве одной из самых важных и наиболее трудных областей. Необходимо проводить различие между уровнями вмешательства в отношении действий на площадке и за ее пределами и уровнями в отношении действий в относительно удаленных странах, подвергшихся воздействию трансграничных выбросов. Производные уровни вмешательства в отношении действий следует разрабатывать на международном уровне на рациональной научной основе. В этом вопросе требуется международное сотрудничество.

За короткий период времени совещания не было возможности подробно обсудить многие важные темы, такие как предварительное планирование, стратегии эвакуации и размещения, меры по защите урожаев сельскохозяйственных культур, технические аспекты радиационного контроля и принятие общих мер по ликвидации аварии, критерии для ввода в эксплуатацию и возобновления хозяйственной деятельности, а также возникшие проблемы и извлеченные уроки. Эти темы следует рассмотреть на совещании в будущем.

4. ДЕЗАКТИВАЦИЯ

Авария вызвала значительное загрязнение прилегающих территорий продуктами деления и активации. Все изотопы, которые образуются в топливе, включая изотопы плутония, были обнаружены. Сильному загрязнению, для контроля и удаления которого требуются чрезвычайные усилия, подверглись площадка и внутренние и внешние поверхности блоков №1, №2 и №3, а также зона радиусом 30 км вокруг площадки. Приблизительно половина выброшенных веществ выпала в пределах этой 30-километровой зоны.

В пределах этой зоны почва, все растения, здания и водоемы подверглись заражению. Кроме того, в некоторых районах за пределами этой зоны на расстоянии приблизительно до 60 км были обнаружены значительные уровни загрязнения, требующие принятия мер для их удаления. В радиусе 30-километровой зоны все население было эвакуировано.

Кроме того, загрязнению подверглись крупные районы на территории Советского Союза и во многих других странах. Хотя за пределами Советского Союза уровни загрязнения были таковы, что не потребовалось принятия прямых мер по дезактивации, в некоторых странах были предприняты такие меры, как контроль за молоком, овощами и

другими пищевыми продуктами с целью предотвращения ненужного облучения населения.

Деактивация началась внутри первого, второго и третьего блоков. Поскольку вентиляционные системы продолжали работать в течение нескольких часов после аварии, загрязнение в других блоках оказалось намного выше, чем могло бы быть в случае отключения вентиляционных систем. Необходимо было провести незамедлительную деактивацию, поскольку уровни радиации в результате загрязнения внутри блоков были определены в диапазоне 100–600 мР/ч, и блоки необходимо было держать в безопасном отключенном состоянии. Применялись различные методы деактивации, включая струйный метод деактивации с помощью воды и различных растворов, парожетонный метод, сухие методы с использованием полимерных покрытий и обмывку поверхности вручную. Эти методы были очень успешными, так как уровень загрязнения снизился в 10–15 раз, а мощность излучения внутри зданий сократилась согласно измерениям до 2–10 мР/ч.

Поскольку необходимо будет осуществить большой объем работ по деактивации помещений и поверхностей в зданиях, опыт, полученный в Чернобыле, будет чрезвычайно ценным для ядерного сообщества. Это включает опыт по применению методов деактивации, по сведению к минимуму объема радиоактивных отходов, по контролю за облучением рабочих, а также рекомендации относительно качества поверхностей с целью облегчения деактивации.

Прежде чем приступить к деактивации территории и населенных пунктов в 30-километровой зоне, необходимо полностью законсервировать разрушенный 4-й блок, из которого по-прежнему происходит выброс нескольких кюри в аэрозолях ежедневно. Кроме того, в тех районах зоны, где загрязнение почвы является очень высоким, радионуклиды следует закреплять с помощью распыления полимерных соединений или других закрепляющих материалов, с тем чтобы предотвратить повторное образование взвесей. Для выполнения этих задач имеются методы и проводится соответствующая работа.

Задачами, которые затем должны быть выполнены, являются, например, фиксация радионуклидов в почве для предотвращения поглощения их растениями, снятие верхнего слоя грунта, подвергнувшегося сильному загрязнению, и его удаление, деактивация лесов или их защита от пожаров, с тем чтобы они могли служить долговременными поглотителями радиоактивных веществ, а также деактивация водоемов, например, отложений в водных растений. Цель состоит в скорейшем возвращении земель для сельскохозяйственного использования.

В дополнение к упомянутым выше усилиям по деактивации требуется применение специальных агротехнических методов, как, например, изменение традиционных систем обработки почв, использование специальных составов для пылеподавления и изменение способов уборки и переработки урожая. Кроме того, некоторая сельскохозяйственная продукция в зависимости от уровня ее загрязнения не будет непосредственно поступать в пищу человека, а будет складироваться и использоваться в качестве кормов для животноводства, семян или направляться на технические цели.

Проблемы, которые возникнут в деятельности по выполнению указанных выше задач и в отношении которых до настоящего времени не найдено определенных решений:

- (a) дезактивация от очень высоких уровней радиоактивного загрязнения персонала, зданий, оборудования и прилегающей территории и связанный с этим контроль за дозой облучения рабочих;
- (b) удаление в больших количествах загрязненного грунта и его соответствующее захоронение;
- (c) удаление или стабилизация загрязнения в лесах;
- (d) дезактивация водоемов;
- (e) фиксация радионуклидов в почве с помощью извести, минеральных удобрений и растворителей.

В этих областях должно осуществляться тесное международное сотрудничество, и МАГАТЭ следует предложить всем странам, которые обладают опытом или приобретут опыт и которые могут содействовать в решении имеющихся проблем, принять участие в этой работе.

5. ПЕРЕМЕЩЕНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ И ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ НАСЕЛЕНИЯ

5.1. Перемещение радионуклидов в атмосфере и выпадение на поверхность земли

Выброс радионуклидов из реактора Чернобыльской АЭС начался 26 апреля и фактически прекратился 6 мая. Самые крупные выбросы имели место в первый день, а также 4 и 5 мая. В первые несколько дней ветер дул в северном и северо-западном направлениях. К 30 апреля направление ветра изменилось, вызвав смещение блока радиоактивных веществ в южном и восточном направлениях. В период с 26 апреля по 30 мая в районе реактора или г. Киева не было сильных дождей, поскольку дождевые тучи, которые двигались в направлении этого района, рассеивались (например, путем разбрызгивания на них серебристого иодида с самолетов).

Первоначальный выброс, вызванный взрывами, состоял из всех видов продуктов деления, обогащенных такими летучими элементами, как цезий и йод, а также инертными газами. Эти вещества поднялись на высоту приблизительно 1 км до того, как началось их горизонтальное перемещение. Позднее некоторые выбросы состояли в основном из летучих радионуклидов, однако имели место другие выбросы, состоящие из всех типов продуктов деления. Эти выбросы отмечены на значительно более низкой эффективной высоте.

Сложные метеорологические условия, искусственное рассеяние дождевых туч и изменяющиеся параметры выброса привели к очень сложной схеме атмосферного перемещения и выпадения на поверхность земли, как на территории СССР, так и в других странах. Была подготовлена подробная карта уровней выпадения радионуклидов в районе площадки Чернобыльской АЭС путем измерения уровней внешних доз облучения и путем анализа проб окружающей среды (например почвы, травы). Схема выпадения в других районах Советского Союза была установлена путем измерения с самолета мощности гамма-излучения, а также путем анализа содержания радионуклидов в пробах почвы, взятых на ограниченном количестве участков местности.

Эта процедура позволила чрезвычайно быстро рассчитать общее количество радионуклидов, выпавших на территории Советского Союза, и эти расчетные данные использовались при определении общего количества выброшенных радионуклидов. В некоторых других странах также были проведены аналогичные расчеты, и в конечном счете можно будет уточнить первоначальные расчеты общего выброса.

Во время аварии в Чернобыле и сразу после нее в Советском Союзе и в других странах были проведены многочисленные измерения уровней доз и концентрации радионуклидов в воздухе и на поверхности земли. Эти измерения и дополнительная информация о метеорологических условиях могут быть использованы для создания широкомасштабной базы данных с целью утверждения и совершенствования моделей для прогнозирования атмосферного перемещения и выпадения радиоактивных веществ. На основе обсуждений в ходе совещания по рассмотрению причин и последствий аварий был сделан вывод, что такая база данных должна быть создана в международном масштабе и что государствам — членам МАГАТЭ следует сотрудничать в мероприятиях по утверждению моделей, касающихся дисперсии и выпадения на ближних, средних и дальних расстояниях.

5.2. Перенос радионуклидов в окружающей среде и облучение населения

5.2.1. Короткий период

В течение периода времени, когда шлейф радиоактивных веществ перемещался в атмосфере и происходило выпадение радионуклидов на поверхность земли, население, живущее или работающее в районах, попавших в зону движения шлейфа, получило дозы через непосредственное внешнее облучение от этого шлейфа, через вдыхание радионуклидов и через внешнее облучение от выпавших веществ. Выпавшие радионуклиды, в частности иод-131 и изотопы цезия, проникли в земные пищевые цепочки, и в большинстве зараженных районов некоторые дозы были получены за счет потребления загрязненного молока, листовых овощей и фруктов, до того как были приняты меры по ограничению потребления этих продуктов. В районах, где уровни загрязнения не были настолько высокими, чтобы потребовалось установление запретов на потребление пищи, дозы будут получены через все эти каналы.

Первоначально оценка доз была необходима для принятия решений относительно контрмер. Эти оценки были осуществлены на основе данных контроля за окружающей средой, которые дополнялись по необходимости перспективным моделированием. На более поздней стадии были проведены измерения иода-131 в щитовидной железе людей, в частности детей, и были проведены обследования всего организма на содержание цезия-137. Эти непосредственные измерения позволили лучше оценить фактически полученные дозы облучения.

Коллективная доза от внешнего облучения 135 000 человек, которые были эвакуированы, оценивалась в $1,6 \times 10^4$ чел.-Зв. Большинство доз отдельных лиц было менее 250 мЗв, хотя некоторые лица в наиболее загрязненных районах, вероятно, получили дозы от 300 до 400 мЗв или более. По имеющимся оценкам, дозы щитовидной железы

отдельных лиц, полученные в результате вдыхания (и, возможно, перорального приема) радиоактивных продуктов) радионуклидов составило в большинстве случаев ниже 300 мЗв, хотя дозы облучения щитовидной железы некоторых детей составляли до 2500 мЗв. В других районах Советского Союза дозы отдельных лиц от внешнего облучения и от поглощения иода были значительно более низкими.

5.2.2. Длительный период

Поскольку выброс радионуклидов практически прекратился, в последующие ближайшие месяцы и годы наиболее значимыми путями облучения являются внешнее облучение от выпавших радионуклидов (особенно цезия-137, который имеет период полураспада 30 лет), и внутреннее облучение от потребления загрязненных пищевых продуктов и воды. Иод-131, который имеет период полураспада восемь дней, является важным источником облучения в результате приема пищи в течение первых недель, однако в долгосрочном плане цезий-137 начинает превалировать, хотя другие долгоживущие радионуклиды (такие как стронций-90 с периодом полураспада 28 лет) могут иметь также важное значение. Увеличению дозы в результате вдыхания радиоактивных веществ также могут содействовать поднявшиеся в воздух радиоактивные вещества, которые первоначально выпали на землю.

Были проведены многочисленные измерения уровней содержания радионуклидов в окружающей среде как в радиусе 30-километровой эвакуационной зоны, так и в районах европейской части Советского Союза (т.е. на территории УССР, БССР и РСФСР). В отношении зоны эвакуации соответствующие оценки дозы использовались для определения возможности и времени возвращения населения в этот район. В отношении других регионов цель состояла в определении потребности в принятии каких-либо дополнительных контрмер, возможности прекращения принятия некоторых из них и оценки радиационного воздействия на население.

Сразу после аварии были установлены определенные уровни вмешательства в отношении концентрации иода-131 в молоке и молокопродуктах (сыр, сливки и масло) и листовых овощах. Были внедрены и получили развитие методы по обеспечению соответствия этим уровням. Эти уровни основывались на понимании того, что доза облучения щитовидной железы ребенка не должна превышать 300 мЗв в год. Были также приняты стандарты в отношении уровней содержания иода-131 в мясе, домашних птицах, яйцах и ягодах. На более поздней стадии, когда доминирующими стали цезий и другие долгоживущие изотопы, были установлены уровни вмешательства в отношении этих радионуклидов для большого ассортимента пищевых продуктов, на основании того, что эффективная доза облучения отдельного человека не должна превышать 50 мЗв в первый год.

На основании измерений концентрации актинидов (особенно изотопов плутония) в воздухе в 30-километровой зоне стало ясно, что в сухих условиях и при сильных ветрах дозы облучения отдельных лиц в результате повторного образования взвесей могут превысить пределы, установленные для лиц из числа населения в Советском Союзе. Соответственно были предприняты меры в отношении "горячих точек" для предотвращения повторного образования взвесей.

Были произведены расчеты доз облучения отдельных лиц в различных регионах европейской части Советского Союза и доз всего населения этих регионов. Оцененные индивидуальные дозы от внешнего облучения в 1986 году находились в диапазоне от 0,03 мЗв до 10 мЗв. Ожидаемые полувековые дозы облучения от поглощения цезия-137 через пищевые продукты по расчетным данным составят порядка 30 мЗв для отдельных лиц в районе Полесья на территории БССР и УССР. Однако измерения уровней цезия, полученные населением, показали, что 50% из них получают дозу приблизительно в 3 мЗв или менее, и лишь 3% из них получают дозу в 30 мЗв или более. Причина таких расхождений лежит в пессимистичных предположениях, использованных при расчетах доз, особенно предположений, касающихся перемещения цезия из почвы в растения, и предположения относительно того, что отдельное лицо потребляет лишь продукты, производимые в подсобном хозяйстве. Дозы имеют тенденцию к увеличению для населения в сельских районах, поскольку оно проводит больше времени на открытом воздухе и потребляет больше продуктов, произведенных в подсобном хозяйстве.

Коллективная доза облучения населения в европейской части Советского Союза от внешнего облучения в течение следующих 50 лет по расчетам составит около 3×10^5 чел.-Зв. Коллективная доза облучения того же населения от поглощения цезия с пищевыми продуктами за 70 лет составит 2×10^6 чел.-Зв. В ходе обсуждения многие эксперты на совещании по рассмотрению последствий аварии поставили под сомнение последнюю цифру, поскольку опыт расчетов коллективных доз от выбросов цезия в атмосферу (например, при испытании ядерного оружия) предполагает, что внешняя доза облучения приблизительно равна дозе, получаемой от потребления пищевых продуктов. Было показано, что пессимистичные предположения, упомянутые выше, были сделаны преднамеренно при расчете коллективной дозы от потребления пищевых продуктов. В соответствии с более реалистичными предположениями расчетные данные в 10 раз ниже (то есть 2×10^5 чел.-Зв).

5.2.3. Вопросы относительного переноса радионуклидов в окружающей среде

Многие вопросы, возникающие по этой теме, сводились к требованиям о предоставлении более подробных данных по контролю за окружающей средой, либо для целей расчетов дозы, либо для утверждения математических моделей для прогнозирования переноса радионуклидов через наземную среду, включая пищевые цепочки, через поверхность водных акваторий (как пресноводных, так и морских), через грунтовые воды и в городских районах. Кроме того, было ясно, что многие страны располагали большим объемом данных по контролю, которые следовало сделать общедоступными в согласованной форме. На совещании по рассмотрению было невозможно осуществить такой обмен подробной информацией, и поэтому рекомендовалось, чтобы МАГАТЭ продолжало работу по созданию механизмов для такого обмена.

5.2.4. Последствия для экосистем

Этот вопрос не обсуждался на совещании, однако он затронут в рабочих документах представленных Государственным комитетом по использованию атомной энергии

СССР. Из этих документов следует, что в непосредственной близости от Чернобыльской площадки будут наблюдаться видимые для земной и водной флоры и фауны последствия. В Советском Союзе планируется провести долговременные всесторонние радиозкологические исследования с целью получения информации о последствиях воздействия высоких и низких доз облучения на экосистемы.

6. ПОСЛЕДСТВИЯ ДЛЯ ЗДОРОВЬЯ

Вредные последствия для здоровья, которые наблюдались или которых можно ожидать в будущем как результат аварии в Чернобыле, можно разделить на две главные группы:

- (1) ранние острые эффекты, относящиеся к категории так называемых нестохастических эффектов;
- (2) отдаленные эффекты, большей частью стохастические.

6.1. Ранние острые эффекты

Эти эффекты имеют ряд особенностей, наиболее важными из которых являются:

- (a) выраженные пороговые дозы, ниже которых эти эффекты не наблюдаются;
- (b) зависимость от мощности дозы, причем эффект снижается с увеличением времени, за которое получена эта доза;
- (c) ранние проявления (в пределах часов или недель) признаков и симптомов. С увеличением дозы латентный период их проявления становится, как правило, короче;
- (d) специфичность клинической картины в зависимости от облучения конкретных органов;
- (e) резкий скачок серьезности клинических проявлений с увеличением дозы выше пороговой.

На Чернобыльской АЭС несколько групп получили такие дозы облучения всего тела, что это привело к возникновению острой лучевой болезни в различных формах. В таких случаях поглощенные дозы в глубоко расположенных органах тела, например, в костном мозге, пищеварительном тракте и т.д., составили примерно от 2 Гр до 16 Гр. К этим группам относятся эксплуатационный персонал реактора и электростанции, аварийные группы и, в самой большой степени, пожарные, осуществлявшие тушение обширных пожаров на площадке сразу после аварии.

Из данных, представленных советскими экспертами, можно сделать несколько определенных выводов. Так, больными острой лучевой болезнью различной степени клинической серьезности было признано 203 человека. Хотя все они подверглись ингаляционному воздействию радиоактивных аэрозолей, содержащих продукты распада и активированные нуклиды, уровни внутреннего заражения были гораздо ниже тех, которые могли бы существенно способствовать развитию острой лучевой болезни. Лишь

у двух пациентов с обширными тепловыми ожогами кожи были обнаружены высокие уровни (порядка от нескольких десятков до нескольких сотен миллионов беккерелей Cs-137 и I-131), но даже и такие значения не считаются имеющими реального клинического значения.

В заключение можно отметить, что острая лучевая болезнь 203 пациентов явилась главным образом результатом внешнего гамма- и бета-облучения. Роль нейтронного облучения можно было исключить на основе отрицательных результатов измерений активности всего тела пациентов от натрия-24. Этот радионуклид является главным продуктом активации человеческого тела при облучении быстрыми нейтронами.

Последствия внешнего облучения можно разделить на последствия в результате облучения проникающим гамма-излучением и сравнительно не проникающим бета-частицами.

Наблюдавшиеся признаки и симптомы острой недостаточности костного мозга и желудочно-кишечного синдрома явились результатом гамма-облучения. Оценочные дозы составляли порядка 2—16 Гр, причем обратимое угнетение функции костного мозга наблюдалось ближе к меньшему значению этих доз, а необратимые — к их высшему пределу. Острый желудочно-кишечный синдром наблюдался при дозах, превышающих 8—10 Гр.

Внешнее бета-облучение, частично в результате осаждения аэрозолей на коже и одежде, привело к развитию сильных ожогов кожи у 48 человек, охватывая в некоторых случаях до 90% поверхности тела. Эти ожоги, крайне трудно поддающиеся лечению, оказались во многих случаях одним из главных усугубляющих факторов, отрицательно сказавшихся на прогнозе и окончательном исходе болезни. В большинстве случаев острой лучевой болезни со смертельным исходом (29 случаев на конец июля 1986 года) ожоги в значительной мере способствовали смерти пострадавших. С учетом этого крайне важно предусмотреть применение (и возможную разработку) технических средств, которые могли бы предотвратить серьезные кожные ожоги в будущем в случае повторения подобной серьезной аварии.

Отбор лиц из числа получивших высокие дозы облучения, нуждающихся в госпитализации и специализированном лечении, был произведен весьма быстро (в первые 4—12 часов после аварии) и осуществлялся на основе критериев серьезности и скорости появления первых симптомов острой лучевой болезни. В основе клинико-лабораторного анализа для ранней постановки диагноза лежал подсчет числа лимфоцитов в периферической крови. Полная клиническая проверка показала затем, что это явилось весьма эффективным и адекватным путем первоначального выявления лиц с острой лучевой болезнью, требующих клинического лечения.

В отношении угнетения функции костного мозга специализированное лечение лучевой болезни основывалось главным образом на поддерживающей и заместительной терапии. Трансфузия тромбоцитов предотвратила возникновение серьезных кровотечений и осложнений, а переливание крови — развитие анемии. Для борьбы с бактериальными инфекциями и септицемией применялась химиотерапия и различные антибиотики. В сложных случаях сравнительно эффективным оказалось внутривенное применение концентрированного гамма-глобулина. При вирусных инфекционных поражениях

кожи герпетического типа применялся соответствующий противовирусный препарат (ацикловир).

Главным приемом лечения кишечного лучевого синдрома было тотальное парентеральное питание с интенсивной коррекцией обмена питательной жидкости и электролитов, а также интенсивные меры по предотвращению токсикобактериологических и токсикосептических синдромов кишечного происхождения. В обычных больничных палатах был установлен специальный антисептический режим, и советские эксперты доказали это как в смысле весьма низкого содержания микроорганизмов в воздухе палат, так и успешным, во многих случаях, лечением острой лучевой болезни. Создается общая картина эффективности применяемых методов лечения в пределах, определяемых тяжестью острой лучевой болезни, о чем можно судить по терапевтическим результатам в диапазонах доз, где в иных случаях можно было бы ожидать значительно большую смертность по сравнению с фактической.

Трансплантация костного мозга была применена в 13 случаях при дозах, превышающих 6 Гр, когда, предположительно, происходят необратимые поражения костного мозга. Выжил лишь один из этих пациентов, и советские эксперты пришли к выводу о том, что эффективное применение этой процедуры может быть показано лишь для пациентов в весьма узком диапазоне доз, однако и тогда, как это произошло в нескольких случаях, помимо возможного отсутствия положительного влияния на состояние пациента, необходимо учитывать и негативные, ухудшающие состояние эффекты.

Как уже указывалось выше, для лечения лучевых поражений кожи потребовалась особо интенсивная терапия, которая, однако, оказалась неэффективной в случаях весьма обширных поражений кожного покрова, которые и определили летальный исход.

Для обеспечения терапии поражений костного мозга и кишечного синдрома проводилась оценка дозы, полученной всем телом, с применением средств так называемой биологической дозиметрии. Данный метод сводился к анализу частоты хромосомных aberrаций (дицентриков) лимфоцитов периферической крови. В данном случае применение этого метода было особо показано вследствие довольно равномерного облучения тела. Однако необходимо помнить, что метод этот весьма трудоемок и дает результаты не ранее чем через 48–55 часов после взятия крови для лимфоцитов культуры. В связи с этим необходимо обеспечить более широкое распространение средств и мероприятий (оборудование, подготовка кадров), направленных на ускорение подсчета aberrаций (автоматизация поиска метафазы, автоматизированная оценка метафазных фигур). Если возможно, то необходимо предусмотреть и разработать для целей биологической дозиметрии другие, более быстрые и легкие методы.

Была наглядно показана прогностическая ценность определения уровней в крови (активности) некоторых энзимов.

По-видимому, следует широко распространить, после окончательной обработки и анализа огромного объема собранных данных, опыт лечения острой лучевой болезни, а также лучевых поражений кожи в результате массированного бета-облучения. Это должно способствовать разработке оптимальных терапевтических средств, доступных при нынешнем уровне медицинских знаний; кроме того, вышеупомянутый опыт,

по-видимому, свидетельствует о возможности во многих случаях успешного проведения массовых мероприятий по ликвидации последствий аварии подобного характера, если это потребуется в будущем.

Представляется важным подчеркнуть тот факт, что успех лечения пациентов с острой лучевой болезнью в огромной степени определяется наличием в г. Москве центра, специализирующегося на диагностике и лечении этого заболевания. Накопленный ранее опыт лечения отдельных случаев непреднамеренного облучения и пациентов, облученных в связи с медицинскими процедурами, показал свою огромную ценность, поскольку на его основе подготовлен специализированный персонал, средства и методы. Это, по-видимому, является одним из важнейших медицинских уроков аварии в Чернобыле.

Дозы, полученные населением, эвакуированным из 30-километровой зоны вокруг Чернобыльской АЭС, не превысили пороговых уровней для клинических проявлений острой лучевой болезни. Необходимо подчеркнуть, что ни одному из 135 000 эвакуированных не был поставлен такой диагноз. Они были оперативно осмотрены после аварии с привлечением мобилизованных групп врачей, фельдшеров, студентов медицинских факультетов и медсестер, оснащенных надлежащим медико-аналитическим оборудованием. Из представленных советскими экспертами докладов явствует, что эффективная централизованная организация медицинских послеаварийных мероприятий явилась необходимым условием успешного их проведения.

Для предотвращения накопления у населения радионуклидов йода в щитовидной железе были розданы таблетки иодистого калия. Представленные данные не дают оснований ставить под сомнение эффективность этой профилактической меры. Тысячи измерений активности йода-131 в щитовидной железе облученного населения показывают, что наблюдаемые уровни были ниже ожидавшихся без применения профилактических мер.

Важно отметить, что не отмечалось каких-либо серьезных немедленных побочных последствий приема иодистого калия и не было ни одного случая показания для госпитализации в связи с их приемом. Период наблюдений оказался слишком коротким, для того чтобы дать какие-либо данные относительно частоты возможного возникновения тиреотоксикоза в результате этой профилактической процедуры.

6.2. Отдаленные последствия

В отличие от ранних нестохастических эффектов отдаленные стохастические эффекты не показывают зависимости тяжести своего проявления от полученной дозы облучения — с ростом дозы наблюдается лишь увеличение вероятности их проявления. Для большинства стохастических эффектов (раковые заболевания, генетические мутации), как правило, исходят из отсутствия пороговой зависимости от дозы. Поэтому любое увеличение дозы несет в себе повышение вероятности индуцирования рака и мутаций. Вероятность проявления этих эффектов зависит от многих факторов, заметное место среди которых занимает возраст в момент облучения. Для раковых заболеваний вероятность их проявления возрастает с увеличением продолжительности остав-

шейся жизни, а для проявлений генетических последствий непосредственное значение имеет возможное число рождений.

Следует подчеркнуть, что эти эффекты не являются специфическими в своих клинических и гистологических проявлениях и в каждом отдельном случае их невозможно отличить от спонтанных заболеваний. Индукцию стохастических эффектов можно наглядно проследить лишь с применением эпидемиологических методов.

В настоящее время невозможно дать достаточно достоверную полную оценку отрицательных последствий для здоровья вследствие раковых заболеваний в результате облучения населения в связи с чернобыльской аварией. Оценки доз (индивидуальных, средних и коллективных) для населения Советского Союза носят предварительный, в определенной степени не полный характер и могут измениться в будущем как результат более подробной и тщательной оценки.

Невозможно предпринять попытку оценки рисков (вероятности возникновения) конкретных форм рака ввиду отсутствия информации по средним дозам на отдельные органы.

Для групп населения вне пределов СССР данные также в настоящее время собираются и оцениваются, и потребуется довольно большое время для подсчета оценочных коллективных доз по многим странам, которые позволили бы провести оценку последствий для здоровья в глобальном масштабе.

Однако можно сделать достаточно достоверную предварительную оценку числа летальных раковых заболеваний на основе собранных в настоящее время и представленных на совещании оценок коллективных доз для части территории Советского Союза. Поэтому рассчитанное, исходя из концепции линейной непороговой зависимости, оценочное значение будет являться произведением коэффициента риска (10^{-2}Зв^{-1}) и коллективной дозы. Общепринятый коэффициент риска порядка 10^{-2}Зв^{-1} считается применимым при определении радиационной защиты с учетом возрастной структуры работников. Тем не менее считается, что возможные неопределенности не оправдывают применение другого коэффициента, который учитывал бы особенности общей возрастной структуры населения.

Упомянутые выше соображения неопределенности, а также тот факт, что коэффициент получен на основе эпидемиологических наблюдений для более высоких доз специально для целей планирования радиационной защиты, наглядно показывают, что применение того же коэффициента для оценки последствия данной радиационной обстановки является в определенной степени теоретическим.

Значение коллективной дозы в результате внешнего облучения 135 000 эвакуированных оценивается в $1,6 \times 10^4$ чел.-Зв, и, следовательно, число всех радиационно индуцированных раковых заболеваний для данной группы должно составить порядка 160. Учет дозы, получаемой щитовидной железой от иода-131 (с соответствующим весовым коэффициентом) в конечной коллективной эффективной эквивалентной дозе, увеличит этот оценочный показатель. Например, если средняя доза на железу составляет 300 мЗв, то коллективная доза на щитовидную железу составит порядка 4×10^5 чел.-Зв, и ее доля в эффективной эквивалентной дозе составит $1,2 \times 10^3$ чел.-Зв, соответствуя примерно 10 случаям смерти от рака щитовидной железы (плюс значительно большее

число нелетальных сходов). В этой группе относительная доля дозы от цезия-137 (через кишечный тракт) будет незначительной.

Для получения представления о значимости этих приблизительных оценок необходимо помнить, что за 70 лет смертность от рака эвакуированных составит порядка 20%, то есть около 27 000 случаев. Прогнозируемые дополнительно 170 случаев рака составит порядка 0,6% от уровня смертности от спонтанного рака. Для той группы населения европейской части Советского Союза, для которой подсчитана оценочная коллективная доза (75 млн. чел.), подобный подсчет дает относительный рост числа случаев смертности от рака в результате внешнего и внутреннего облучения от цезия-137 порядка 0,03—0,15% естественной величины. Согласно таким же расчетам возможное увеличение спонтанной смертности в результате рака щитовидной железы оценивается примерно в 1%.

Поскольку эти величины составляют лишь крайне малую долю спонтанных заболеваний (и смертности), возможности эпидемиологического обнаружения этих последствий ничтожно малы. Некоторые последствия, возможно, будут обнаружены лишь в группе, средняя доза для которой существенно превышает 0,1 Гр (лейкемии, доброкачественные и злокачественные новообразования в щитовидной железе).

Масштабы генетических последствий, выраженные в числе индуцированных мутаций, можно примерно оценить на основе информации, собранной к настоящему времени НКДАР ООН и МКРЗ. Представляется крайне маловероятным, что в первых двух поколениях отклонения могут превысить минимальные значения (20—40%) от ожидаемого вследствие возможной индукции рака.

Внутриутробное облучение в период от 8 до примерно 15 недель после зачатия несет в себе риск серьезной умственной отсталости, а также снижение умственных способностей у детей, затронутых в меньшей степени. Риск серьезной умственной отсталости оценивается значением примерно $40\% \text{ Зв}^{-1}$ после мощного кратковременного облучения с вероятной непороговой зависимостью между дозой и результатом линейного типа. Для оценки возможных последствий такого вида потребуется информация о количестве женщин на этих сроках беременности, полученных ими дозах, а также о доли беременностей, закончившихся рождением живых детей. Такой информации в настоящее время нет. Другим источником неопределенности в оценках такого рода является отсутствие какой-либо информации о возможном влиянии мощности дозы на масштабы последствий (облучение населения в 30-километровой зоне было гораздо меньшей мощности, нежели та, на основе которой были получены первоначальные данные об умственной отсталости).

ПРОБЛЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ, ТРЕБУЮЩИЕ ДАЛЬНЕЙШЕГО ОБСУЖДЕНИЯ

Специалисты в области ядерной энергии стремятся извлечь из аварии в Чернобыле все возможные уроки, касающиеся безопасности. Хотя в ходе совещания по рассмотрению причин и последствий аварии был получен большой объем информации, некоторые проблемы требуют дополнительного обсуждения с целью оценки значимости ряда проблем с точки зрения безопасности. Нижеизложенный перечень тем носит предварительный характер, поскольку международный анализ этого события только начинается. Следовательно, этот перечень потребует периодического обновления с учетом дальнейшего обмена информацией между Советским Союзом и другими странами, новых проблем, возникающих в результате проводимых в настоящее время и перспективных теоретических и экспериментальных исследований, а также уже решенных проблем.

Проблема №1. ОЦЕНКА РЕГЛАМЕНТОВ БЕЗОПАСНОСТИ

Поскольку непосредственной причиной аварии стало нарушение целого ряда правил эксплуатации, отключение систем безопасности, необходимо осознать, каким образом такие нарушения были практически возможны. Это требует понимания действующих регламентов станции, ее организации и распределения ответственности, а также средств, использовавшихся для нарушения правил, в особенности для обхода систем безопасности. В связи с обсуждением этой проблемы мог бы возникнуть обмен информацией о различных применяемых методах:

- (а) для разработки и проверки регламентов;
- (б) для обеспечения сознательного соблюдения регламентов оператором.

Опыт, полученный в результате таких обсуждений, поможет всем нам понять потребность человека в положительных стимулах, закрепляющих высокие показатели работы наряду с бесспорной необходимостью установления строгой дисциплины. В рамках каждой национальной культуры наиболее успешные методы могут совершенно отличаться от общих норм.

Проблема №2. РАБОЧИЙ АНАЛИЗ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ СОБЫТИЙ ПРИ АВАРИИ

Советские эксперты представляли результаты воссоздания хода аварии на математической модели, учитывающей фактическое состояние блока и соответствующих величин соответствующих физических параметров. Такое моделирование показывает, что действия оператора привели к резкому скачку реактивности. Проигрывание большого

числа сходных моделей с различными исходными данными о параметрах блока и различными по времени или по характеру действиям операторов поможет сделать более глубокие выводы о том, например, что могло произойти, если бы команда остановки реактора была дана, как только операторы поняли, что реактор находится в опасном состоянии. Такие модели помогли бы понять относительное влияние на безопасность различных действий оператора и поведение реактора в результате таких действий. торов и поведение реактора в результате таких действий.

Обсуждение этой проблемы могло бы привести к обмену эквивалентными моделями для всех эксплуатируемых и будущих АЭС. Подготовка таких моделей может осуществляться компетентными национальными органами, а их распространение через МАГАТЭ или по другим каналам.

Проблема №3. РЕАЛЬНОСТЬ СОЗДАНИЯ ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКИ, СПОСОБНОЙ ВЫДЕРЖАТЬ ТАКУЮ АВАРИЮ

Принцип эшелонированной системы безопасности предполагает, что следует учитывать возможный отказ систем, предназначенных для предотвращения аварии, и полагаться на один или несколько конечных барьеров, которые гарантируют минимальный выброс радиоактивного вещества за пределы защитной оболочки. Проведенная МКГЯБ краткая оценка механической энергии, высвободившейся в ходе аварии в Чернобыле, и наше понимание различных связанных с этим последствий слишком ограничены для того, чтобы определить, реально ли создать сооружение, способное выдержать такое событие, для всех действующих и будущих АЭС. Возможно, как считают советские эксперты, ни одно защитное сооружение не смогло бы выдержать механического воздействия такой аварии.

Для оценки этой проблемы, возможно, необходимы экспериментальные исследования, позволяющие лучше описать физические явления, происходившие в первые две-три секунды аварии, например, разрушение топлива, взаимодействие топлива и теплоносителя и паровой взрыв. Необходимо также объяснить второй взрыв. Однако группа экспертов, используя данные, уже представленные в соответствующей литературе, может провести предварительный анализ. Можно было бы обменяться и результатами подобного анализа по другим типам реакторов.

Проблема №4. ЗНАЧЕНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ "ЧЕЛОВЕК-МАШИНА" ДЛЯ ТОЧНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАЧАЛА АВАРИЙ

Основной урок, который можно извлечь из анализа на АЭС "Три-майл-айленд", состоит в том, что информация о серьезной опасности для станции должна незамедлительно поступить к операторам в ясной и понятной форме. Лучшим примером такой информации является табло, отражающее запас до кипения, которое сообщает оператору уже готовую для принятия решения информацию о состоянии теплоносителя активной зоны.

Для предотвращения аварий, вызванных изменениями реактивности, жизненно важным, как показала авария в Чернобыле, является наличие у операторов данных о рабочем запасе реактивности, выраженных в понятных им величинах. Для анализа этой ситуации было бы полезно дать более подробное описание существующих систем, включая способ расчета этого параметра и его представление оператору.

Этот анализ можно расширить включением и таких важных параметров, как запас до кипения на входе активной зоны, и он мог бы стать основой более общей оценки требований, предъявляемых к дисплею пульта управления, на котором должен воспроизводиться оговоренный минимум параметров безопасности. Может оказаться, что такой анализ события в Чернобыле станет проверкой выводов, полученных по результатам изучения аварии на реакторе "Три-майл-айленд". Этот вопрос имеет достаточно важное значение с точки зрения безопасной эксплуатации, и поэтому заинтересованные стороны должны обсудить его под руководством опытных старших сотрудников-эксплуатационников. Прежде всего можно было бы обменяться имеющейся информацией, а затем определить задачи, требующие решения.

Проблема №5. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ЗНАНИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ "ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОАКТИВНОГО ВЫБРОСА"

Авария в Чернобыле представляет собой важнейший источник данных о механизмах радиоактивного выброса. Хотя механизмы, обусловившие выброс в Чернобыле, могут быть не пригодны в полной мере для оценки потенциального выброса из реакторов других типов, очевидно, что извлечение максимально возможного объема информации из того, что произошло на Чернобыльской АЭС в период с 26 апреля до 6 мая, принесет общую пользу в решении проблем безопасности.

В ходе совещания по рассмотрению причин и последствий аварии многие его участники интересовались подробной информацией о физической и химической формах радионуклидов, предлагали провести определенные измерения для получения дополнительных ценных данных, выдвигали свои предположения относительно возможных механизмов выброса и т.д. Когда советские специалисты сообщат об имеющихся у них данных и получат данные от других специалистов, можно будет организовать совещание специалистов с целью отбора этих данных и разработки международной исследовательской программы, если таковая потребуется. Результаты этого обсуждения можно использовать для оказания помощи МКГЯБ в исследовании "характеристик радиоактивного выброса".

Проблема №6. МЕРЫ ПО ЛИКВИДАЦИИ АВАРИИ НА ПЛОЩАДКЕ

Эксплуатация и управление такими многоблочными станциями, как Чернобыльская АЭС (четыре эксплуатируемых блока и два строящихся), создают многочисленные важные проблемы, такие как связи между блоками, порядок эксплуатации неповрежденных блоков, степень участия операторов неповрежденных блоков в оказании

помощи операторам, проводившим испытание, или в осуществлении комплекса мер по ликвидации аварии и т.д. и т.п. Например, эксплуатация блока №3, возможно, могла бы продолжаться до тех пор, пока пожар не был ликвидирован на блоке №4, для удовлетворения общих или частных потребностей в электроэнергии, воде или других услугах, необходимых для помощи пожарным, работавшим на четвертом блоке.

После обсуждения проблемы было бы полезно созвать совещание специалистов, работающих на площадках с несколькими блоками, и обсудить на нем, в частности, информацию относительно общих принципов и регламентов.

Проблема №7. ОПЫТ В ОБЛАСТИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Во время совещания советские эксперты заявили, что в течение 100 реакторо-лет эксплуатация реакторов типа РБМК не произошло ни одного аномального события, которое можно было бы рассматривать в качестве "предвестника" аварии 26 апреля. Однако Советский Союз может толковать термин "предвестник" иначе, чем это делают в других странах. Хотя в прошлом не возникало совокупности событий, подобной той, которая привела к аварии, события на Курской АЭС, описанные в разделе 2.12.2 Приложения 2 к докладу Советского Союза, представляют чрезвычайно большой интерес для изучения некоторых важных характеристик переходных режимов Чернобыльской АЭС.

Наиболее эффективным средством решения этой проблемы может стать расширение и продолжение деятельности существующей информационной системы МАГАТЭ по инцидентам на АЭС.

Используя опыт Чернобыля в качестве примера для других, было бы полезно знать об ошибках оператора, подобных тем, которые привели к падению мощности до 30 МВт (тепл.) или, в более общих чертах, о неожиданных переходных режимах, при которых определенную роль сыграли величины коэффициентов реактивности. Если проведенный Советским Союзом повторный анализ опыта эксплуатации реакторов РБМК определит значимые события, то такая информация будет полезной при анализе аварии в Чернобыле, а информация о наблюдаемой частоте различных типов отклонений оказала бы помощь в оценке их значения с точки зрения безопасности.

Проблема №8. ДЕЗАКТИВАЦИЯ ПЛОЩАДКИ

Безусловно, технические специалисты проявляют большой интерес к получению какой бы то ни было информации, предоставляемой советскими экспертами, о методах по снижению радиоактивности на площадке как в помещениях, так и за их пределами. Такая информация может составить основу для разработки и выпуска руководства для операторов, которые могут оказаться в ситуации радиоактивного загрязнения.

Проблема №9. МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАССЕЙВАНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ

Из этой аварии можно сделать однозначный вывод о том, что мы должны обеспечить такие условия, чтобы руководство АЭС могло правильно рассчитать рассеивание

радионуклидов в окружающей среде при различных условиях аварии. Безусловно, что события в Чернобыле представляют собой уникальный источник информации по рассеиванию радионуклидов. Несмотря на неопределенность величины выбросов и на отсутствие подробных данных, что может затруднить метеорологическую оценку, компетентные органы Советского Союза при содействии (если в этом возникает необходимость) экспертов из других стран могли бы выработать методику всестороннего анализа и неукоснительно ей следовать. Программы обмена информацией должны проводиться под эгидой МАГАТЭ.

Проблема №10. РАДИАЦИОННАЯ ЗАЩИТА

Важно оценить последствия радиоактивного выброса для окружающей среды, эффективность контрмер и медицинской помощи лицам, получившим высокую дозу облучения, а также долгосрочные последствия для населения окружающих районов, поскольку результаты таких оценок будут иметь очень большое значение для принятия мер по ликвидации последствий аварии.

ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ВЫВОДЫ

На совещании по рассмотрению причин и последствий аварии советские ученые и инженеры представили доклад в двух частях, содержащий основную техническую информацию о Чернобыльской АЭС, описание последовательности операций, приведших к аварии, ее возможных причин, оценку аварии, радиоактивных выбросов, последствий аварии и контрмер, предпринятых как на площадке, так и вне ее. Советские эксперты сообщили также о проводимых ими исследованиях технических, медицинских и экологических вопросов, связанных с аварией.

Представленный советскими специалистами доклад составлен тщательно и на высоком профессиональном уровне. Откровенные и открытые выступления советских участников на совещании были с удовлетворением восприняты другими участниками, которые в ответ выступили с сотнями представленных в письменной форме вопросов. Большинство этих вопросов касалось предоставления дальнейших подробных сведений и количественных данных по техническим вопросам, что требует проведения дальнейших исследований. Ожидается, что в ближайшие месяцы и годы, несомненно, поступят дополнительные и уточненные подробные сведения.

МКГЯБ рассмотрела доклад, представленный советскими экспертами на совещание по рассмотрению причин и последствий аварии, и члены МКГЯБ провели дополнительные обсуждения с советскими экспертами. По мнению МКГЯБ, описание хода реальных событий представляется полностью правдоподобным и соответствует представлениям о том, каким образом подобные системы могли бы вести себя в описанных фактически имевших место условиях. Это не означает, что не осталось открытых вопросов, и в первую очередь советские эксперты согласны с таким выводом.

Участники совещания пришли к общему мнению о необходимости укрепления международного сотрудничества в области ядерной и радиационной безопасности. Проведенные обсуждения, как представляется, могут оказаться полезными для советских экспертов при планировании необходимой программы научно-исследовательских работ.

Хотя было бы неправильным заявить, что в настоящее время можно сделать заключительные всеобъемлющие выводы относительно причин, последствий и значения аварии, на совещании по рассмотрению причин и последствий аварии была выяснена общая картина, и можно сделать целый ряд выводов.

Советские эксперты, например, признали полезность модификации реакторов типа РБМК и сообщили, что они уже приняли меры по увеличению числа стержней аварийной защиты и установили требования относительно минимальной глубины ввода для всех стержней управления.

Эти модификации, наряду с совершенствованием административных процедур, направлены на то, чтобы значительно затруднить создание таких эксплуатационных условий, в результате которых мог бы наблюдаться быстрый рост реактивности по каким-либо причинам, включая серьезное нарушение штатного регламента эксплуатации.

Несмотря на то, что в настоящее время нет возможности подтвердить, что эти модификации сами по себе могут обеспечить достижение цели безопасности, МКГЯБ решительно поддерживает этот подход, который был принят советскими компетентными органами для реакторов РБМК.

Материалы данного совещания и новые данные, обнаруженные членами МКГЯБ, экспертами МАГАТЭ и другими участниками, позволили сделать следующие предварительные выводы, которые сгруппированы по разделам "Ядерная безопасность", "Радиационная защита" и "Итоговое заключение".

Кроме этих, другие более конкретные выводы, могут быть обнаружены в полном тексте доклада. Здесь они повторно не приводятся.

A. ЯДЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

1. НЕ ВЫЯВЛЕНО НИКАКИХ НОВЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

Не оказалось возможным выявить какие-либо физические явления, которые ранее уже не являлись бы предметом изучения в рамках анализа безопасности, либо теоретических и (или) экспериментальных исследований.

Тем не менее, всем операторам АЭС следует уяснить важность регулярного возвращения к анализу безопасности с целью проведения исследований конкретных рисков, проверки того, чтобы вопросы безопасности, которые были выявлены в прошлом, по-прежнему должным образом принимались во внимание.

2. НЕОБХОДИМО СОЗДАТЬ "КУЛЬТУРУ БЕЗОПАСНОСТИ" НА ВСЕХ ДЕЙСТВУЮЩИХ АЭС

Был сделан вывод о том, что коренные причины аварии в Чернобыле следует искать в так называемом "человеческом факторе". Извлеченные уроки предполагают осуществление трех видов деятельности:

- (1) подготовка кадров при уделении особого внимания необходимости приобретения надлежащих знаний о реакторе и его работе, а также с использованием тренажеров, обеспечивающих реалистическую модель хода событий при серьезных авариях;
- (2) проведение ревизий как силами энергокомпаний, так и со стороны, в частности, с целью предотвращения проявления самоуспокоенности в процессе нормальной эксплуатации;
- (3) понимание всем персоналом потенциального значения всех отклонений от штатного регламента с точки зрения безопасности.

Эти уроки, полученные в связи с аварией в Чернобыле, имеют значение для всех типов реакторов.

Важнейшим выводом, который был сделан, является вывод о важности возложения всех полномочий и полной ответственности в отношении безопасности станции

на старшего сотрудника из числа эксплуатационного персонала станции. Наряду с надлежащим образом проанализированным и утвержденным штатным регламентом, необходимо создать и поддерживать "культуру ядерной безопасности". Этот процесс повышения безопасности следует осуществлять в сочетании с необходимыми мерами по укреплению дисциплины.

3. ПРОЕКТЫ РЕАКТОРОВ ДОЛЖНЫ ДЕЙСТВИТЕЛЬНО ВОПЛОЩАТЬ КОНЦЕПЦИЮ ЭШЕЛОНИРОВАННОЙ ЗАЩИТЫ

Схематично можно выделить три уровня.

На первом уровне следует обратить внимание на инherentную стабильность. При равномерном облучении топлива реакторы типа РБМК имеют положительный паровой коэффициент реактивности. Вместе с тем, температурный коэффициент топлива является отрицательным, и чистый эффект изменения мощности зависит от уровня мощности. При нормальных условиях эксплуатации чистый эффект (мощностной коэффициент) является отрицательным на полной мощности и становится положительным на уровне, ниже приблизительно 20% от полной мощности. Эксплуатация реактора на уровне ниже 700 МВт (тепл.) ограничивается правилами эксплуатации регламентом ввиду проблем, связанных с поддержанием термо-гидравлических параметров в нормальном рабочем диапазоне.

На втором уровне в момент, когда безопасность станции подвергается серьезной угрозе, должны включаться автоматические системы безопасности. Это требование относится ко всем типам реакторов. В том, что касается системы остановки реактора на Чернобыльской АЭС, в момент аварии этого не произошло.

Наконец, последний уровень относится к конечному пассивному барьеру, который должен быть в состоянии сдерживать большую часть радионуклидов, в случае если не срабатывают первые две линии защиты. Имеется должное понимание функции здания защитной оболочки для тех реакторов, которые имеют такой тип защиты.

Вместе с тем, необходимо также признать, что создание "полной" защиты не всегда технически осуществимо, и в настоящее время нет уверенности в том, что подобная защитная оболочка могла бы обеспечить защиту от последствий аварийного роста реактивности, который произошел на Чернобыльской АЭС. Тем не менее, необходимо поставить вопрос об этом, и если не имеется технически обоснованного решения, особое внимание следует уделять обеспечению малой вероятности возникновения аналогичной аварии вновь.

4. ВНОВЬ ПОДЧЕРКНУТО ЗНАЧЕНИЕ УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЧЕЛОВЕКА И МАШИНЫ

Невозможно будет гарантировать, что не произойдет ошибка оператора и что проект при любых обстоятельствах обеспечивает безопасность на 100%. Поэтому следует признать, что могут возникать события, при которых оператору необходимо

будет предпринять соответствующие меры для предотвращения серьезной аварии. Опыт прошлого показал, что вмешательство человека может дать весьма эффективные результаты, если имеется надлежащее понимание сложившейся на станции обстановки. Именно поэтому важное значение с точки зрения безопасности имеет соответствующее взаимодействие человека и машины не только для предотвращения ошибок оператора, но также для принятия мер в условиях непредвиденных аварий, которые могут должным образом не учитываться в проекте.

С учетом уроков аварий на Чернобыльской АЭС и на АЭС "Три-майл-айленд" представляется возможным определить два вида деятельности:

- (1) возможность визуального представления оператору важнейших с точки зрения безопасности данных следует обеспечить таким образом, чтобы гарантировать их оптимальное использование. Для столь сложной системы, какой является АЭС, важное значение имеет представление и интерпретация данных в реальном режиме времени. Следует использовать встроенные средства диагностики;
- (2) хотя в конечном итоге все зависит от надежности эксплуатационного персонала и понимания им вопросов безопасности системы, сложность конструкции АЭС требует создания надежного резервного механизма безопасности путем установки автоматических устройств, обеспечивающих постоянную безопасность эксплуатации станции во всех отношениях. Этот резервный механизм должен быть скоростным по своей логической структуре и эффективным в том, что касается скорости срабатывания. Он должен быть спроектирован таким образом, чтобы его было трудно обойти и чтобы при нормальном или запланированном режиме эксплуатации не возникало желания его обойти.

В. РАДИАЦИОННАЯ ЗАЩИТА

1. ОПЕРАТИВНОЕ ПРИНЯТИЕ МЕР

- (1) Сразу же после того, как сигнал тревоги поступил в Москву, на площадку была направлена группа специалистов для оказания помощи местным органам и руководству станции. Был создан централизованный штаб аварии, наделенный всеми полномочиями и властью для руководства организацией по ликвидации последствий аварии. Основной вывод, который следует в связи с этим сделать, состоит в том, что быстрая централизация противоаварийных операций, представляет собой весьма эффективную меру по организации и координации всех необходимых действий. Это, возможно, является залогом успеха в любой подобной аварийной ситуации.
- (2) Что касается работы по дезактивации и восстановлению после аварии, проведенной сразу после аварии на Чернобыльской АЭС, то объем и масштаб деятельности далеко превосходят все, с чем до сих пор сталкивались на площадках АЭС. Представляется, что всем другим, ответственным за проведение этой работы, следует изучить данный случай и сделать соответствующие выводы.

- (3) Борьба с пожаром на АЭС в условиях острой радиационной опасности явилась совершенно новой областью. Процедуры, оборудование и защитная одежда, применявшиеся во время этой аварии, должны быть тщательно изучены всеми лицами, в чьи обязанности входят противоаварийные меры такого рода.
- (4) Лечение острой лучевой болезни оказалось эффективным в пределах, определяемых величиной полученных доз. Обширные ожоги кожи в результате бета-облучения существенно осложнили поддерживающую и заместительную терапию болезни, а также в значительной степени способствовали летальному исходу болезни у 29 пострадавших. Необходимо разработать технические средства для предотвращения обширных ожогов кожи в случае повторения в будущем аварий подобного рода. Проведенная в отдельных случаях пересадка костного мозга, как оказалось, не показала реальных терапевтических преимуществ в данной группе пострадавших. Внутреннее облучение не оказало какого-либо влияния на возникновение острой лучевой болезни. Этот опыт должен быть всесторонне рассмотрен медицинским сообществом.
- (5) Большие проблемы возникли в связи с эвакуацией, а именно: проблемы перемещения населения и домашнего скота, осуществления контроля за предоставлением медицинской помощи и помощи в социальной сфере, проблемы транспорта и материально-технического обеспечения. Как уже упоминалось, централизация полномочий и власти имела первостепенное значение в том, что касается организации и координации всех необходимых мер. Всего 135 000 человек было эвакуировано из зоны в радиусе приблизительно 30 км вокруг станции. Ни один человек из числа эвакуированных не был госпитализирован по причине лучевого поражения.

2. ВЫБРОС РАДИОНУКЛИДОВ

По оценкам советских экспертов, со станции было выброшено 100% радионуклидов благородных газов. Выброс остальных, конденсируемых, радионуклидов составил приблизительно от 1×10^6 до 2×10^6 ТБк (от 3×10^7 до 5×10^7 Ки)⁶ или приблизительно 3–4% общего количества радионуклидов активной зоны. Советские эксперты проводят дальнейшее изучение физической и химической природы выброса радионуклидов. Определяются химические формы вещества и дисперсный состав аэрозолей.

Постоянное взаимодействие с советскими экспертами по мере осуществления этой работы будет представлять ценность для всех программ в области реакторной безопасности.

⁶ Данные о радиоактивных выбросах и соответствующих контрмерах приводятся по состоянию на 6 мая 1986 г.

3. ПЕРЕНОС РАДИОНУКЛИДОВ И ОБЛУЧЕНИЕ НАСЕЛЕНИЯ

Данная авария отличается от тех, которые обычно рассматривались при радиационных оценках гипотетических аварийных выбросов с АЭС тем, что этот выброс был продолжительным, изменялся во времени по мощности и составу радионуклидов, и метеорологические условия были сложными. Эти характеристики привели к весьма сложному характеру атмосферного оседания на поверхность земли как в пределах Советского Союза, так и в других странах. Характер оседания был установлен очень быстро посредством мониторинга окружающей среды. Осажденные радионуклиды, в особенности йод-131 и изотопы цезия, проникли в земные пищевые цепочки. Были введены и соблюдались запреты на потребление различных продуктов питания, и в СССР были приняты меры, там, где это требовалось, для обеспечения незараженной питьевой водой.

Радионуклидом, который сыграет наибольшую роль для коллективной дозы (то есть общей дозы для населения СССР) и для дозы для всего тела отдельных лиц, является цезий-137. Коллективная доза для населения европейской части СССР на протяжении последующих 50–70 лет оценивается равной порядка 2×10^6 чел.-Зв, причем большая часть отдельных лиц на протяжении всей жизни получит дозу меньшую, чем доза от естественного фона радиации. Йод-131 привел к относительно высоким дозам для щитовидной железы некоторых отдельных лиц за короткий срок, однако он не представляет важности на длительный период ни для отдельных лиц, ни для всего населения.

4. ПОЗДНИЕ СТОХАСТИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ДЛЯ ЗДОРОВЬЯ

Масштабы воздействия на здоровье поздних стохастических эффектов, главным образом опухолевого и генетического характера, возможно оценить лишь после оценки полученных коллективных доз. Информация по этому вопросу из Советского Союза носит предварительный и приблизительный характер. На основе полученной информации представляется, что в течение последующих 70 лет число спонтанных заболеваний всеми раковыми болезнями в группе эвакуированных 135 000 человек вряд ли увеличится более чем на 0,6%. Соответствующий показатель для остальной группы населения большинства регионов европейской части Советского Союза, как ожидается, не превысит 0,15% и, вероятно, будет ниже порядка 0,03%. Относительное увеличение смертности в результате рака щитовидной железы может составить 1%.

По оценкам, число случаев ухудшения здоровья в результате генетических эффектов не должно превысить 20–40% от дополнительного числа случаев заболеваний раком. В настоящее время отсутствует информация, на основе которой можно было бы оценить последствия внутриутробного облучения плода у беременных женщин в пределах 30-километровой зоны.

Данные о коллективных дозах в других странах продолжают оцениваться, а оценку возможных стохастических последствий следует отложить до появления такой информации.

были проведены предварительные оценки доз, полученных отдельными лицами из числа населения Советского Союза, и доз, полученных населением в целом. Эти оценки будут уточнены после поступления дополнительных данных, и НКДАР в сотрудничестве с МАГАТЭ и ВОЗ будет проведена оценка общих радиационных последствий на основе данных, полученных от государств-членов. Следует провести обсуждение на международном уровне методологии проведения эпидемиологических исследований персонала и отдельных групп населения в районе станции.

5. ДЕЗАКТИВАЦИЯ

Необходимо принять долгосрочные защитные меры на станции и вокруг нее. Проблемы, с которыми придется столкнуться при попытке провести дезактивацию этих районов, будут состоять в безопасном захоронении больших количеств загрязненного грунта, снятии слоя грунта и контроле за облучением персонала, фиксации радионуклидов в почве, а также в изыскании методов дезактивации лесов и водоемов. Накопленный опыт имеет важнейшее значение, и крайне желателен обмен опытом на международном уровне.

С. ИТОГОВОЕ ЗАКЛЮЧЕНИЕ

МКГЯБ пришла к заключению, что в Чернобыле произошло крупное событие класса событий, именуемых авариями с разрушением активной зоны или СДА. Эксперты в области безопасности всего мира теперь могут извлечь уроки из этого трагического события, с тем чтобы значительно углубить наше понимание вопросов ядерной безопасности. Эта авария является "худшим вариантом" в том, что касается рисков, связанных с ядерной энергией. Необходимо подчеркнуть, что даже в этих условиях не пришлось госпитализировать никого из представителей населения в связи с ущербом для здоровья, вызванным облучением. Пострадали 300 человек из числа персонала станции и пожарных, которые были госпитализированы, причем по состоянию на сегодняшний день 31 человек умер.

МКГЯБ изучила причины и последствия аварии в Чернобыле в той степени, в которой это возможно было сделать на данном этапе. МКГЯБ по-прежнему убеждена, что при четком соблюдении существующих принципов безопасности и учете имеющихся знаний ядерная энергетика на нынешнем этапе ее развития является приемлемым и полезным источником энергии. Несмотря на то, что произошедшая авария стала трагическим событием и имела широкие последствия, ее масштабы не превышали масштабов аварий другого типа, природных и вызванных деятельностью человека, которые продолжают возникать. Вместе с тем, имеются возможности для совершенствования проектов и режима эксплуатации АЭС.

В ходе данного совещания советские эксперты рассказали о различных модификациях реакторов типа РБМК. Они направлены на то, чтобы в сочетании с совершенство-

ванием административного регламента значительно затруднить возможность создания таких эксплуатационных условий, которые могут привести к быстрому скачку реактивности вследствие любой причины, включая грубое нарушение регламентов эксплуатации. Краткое исследование, приводимое здесь, не может дать полной гарантии того, что эти доработки достигли намеченной цели. Однако МКГЯБ решительно поддерживает тот факт, что советские компетентные органы поставили перед собой такую цель в отношении реакторов РБМК.

Поддержание регулярных международных связей в вопросах безопасности могло бы значительно упростить проведение совещаний, подобных этому. Подобное понимание, если бы к нему пришли ранее, повысило бы ценность совещания по рассмотрению причин и последствий аварии для тех, кто присутствовал на совещании, и для всех государств-членов. Не обязательно извлекать уроки только из серьезных аварий; предпочтительнее учиться на незначительных нарушениях нормального режима работы. Ключевой же задачей является их предотвращение.

РЕКОМЕНДАЦИИ

А. ЯДЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

1. ПРОВЕДЕНИЕ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ С УЧЕТОМ ПРИНЯТЫХ РЕШЕНИЙ

Оценка и анализ сложных физических и химических явлений, связанных с развитием аварии в Чернобыле и ее последствиями, находятся на начальных этапах. Необходимо продолжать работу, для того чтобы более точно оценить воссозданную картину аварии. МАГАТЭ следует содействовать развитию международного сотрудничества для достижения этой цели. Следует организовать проведение необходимых мероприятий в этой области. Следует распространять соответствующую техническую информацию и содействовать взаимному обмену опытом в области аналитических методик и результатов исследований. МКГЯБ хотела бы, чтобы ее постоянно информировали о программе этой деятельности.

2. ДАЛЬНЕЙШАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ МАГАТЭ И ДРУГИЕ МЕЖДУНАРОДНЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ

- (1) МАГАТЭ следует развивать и при необходимости координировать проведение анализа серьезных аварий на всех типах реакторов и содействовать обмену необходимой информацией.
- (2) МАГАТЭ следует укреплять свою деятельность по развитию использования метода вероятностной оценки безопасности (ВОБ) и содействия его применению путем анализа методов, разработанных в государствах-членах для использования в рамках ВОБ, оказанию помощи в разработке рекомендаций по его использованию и содействию государствам-членам в применении этих рекомендаций в целях повышения безопасности всех режимов эксплуатации АЭС.
- (3) МАГАТЭ следует направить свои усилия на содействие обмену опытом, разработку дополнительных рекомендаций — в частности, относящихся к предотвращению серьезных аварий — и на предоставление помощи на местах в вопросах аттестации операторов, обучения и подготовки, с тем чтобы создать "культуру безопасности" при эксплуатации АЭС. Следует рассмотреть вопрос о возможности добровольного международного финансирования программ подготовки операторов.
- (4) МАГАТЭ следует расширить свои усилия в деле содействия обмену опытом в области взаимодействия человека и машины при уделении особого внимания

балансу между автоматикой и прямыми действиями человека, а также необходимости создания дополнительных средств в помощь оператору на пульте управления АЭС. Следует обеспечить, в частности, обмен опытом между операторами АЭС, и МАГАТЭ следует сотрудничать с международными организациями, представляющими таких операторов.

- (5) МАГАТЭ следует организовать программу деятельности, включая международное тематическое совещание по теме "Деятельность по обеспечению качества в ходе эксплуатации АЭС" при уделении особого внимания процедурам на пульте управления. Эта тема включает подробное предписание процедур, необходимую проверку, передачу смен, контроль за выполнением принятых решений, а также вопросы уведомления надлежащих компетентных органов.
- (6) Секретариату следует предоставить МКГЯБ необходимую помощь по формулированию в отдельном документе основных принципов безопасности для существующих и будущих типов реакторов с уделением особого внимания тем принципам, которые вырисовываются в результате рассмотрения причин и последствий аварии. Эти принципы должны быть общими для всех типов реакторов, даже если необходима некоторая корректировка конкретных проектных концепций.
- (7) Существующие международные нормы (ПРНБ) требуют пересмотра, который обеспечивал бы учет уроков аварий в том, что касается таких важных вопросов, как аварии, вызванные ростом реактивности, предотвращение пожаров и их тушение.
- (8) Государства-члены могут рассмотреть вопрос об укреплении их сотрудничества с МАГАТЭ путем добровольного приглашения группы ОСАРТ и предоставления экспертов для подобных групп. МАГАТЭ следует расширить свои возможности в области предоставления услуг ОСАРТ.
- (9) Следует обновить и расширить информационную систему МАГАТЭ по инцидентам на АЭС (ИСИ), с тем чтобы расширить круг источников базы данных, а предоставляемую ИСИ информацию следует анализировать более широко с точки зрения учета опыта, информация о котором могла бы быть предоставлена государствам-членам.
- (10) МАГАТЭ следует организовать конференцию по теме "Взаимосвязь между проектами реакторов и функциями оператора" и уделить особое внимание элементам проектов, которые могут оказать помощь оператору при осуществлении им своих обязанностей в области безопасности и которые обеспечивают автоматическое принятие защитных мер в случае, если действия оператора приводят к возникновению потенциальной угрозы для безопасной эксплуатации станции.
- (11) Государствам-членам в рамках деятельности регулирующих органов следует организовать повторный анализ процедур, обеспечивающих безопасную эксплуатацию АЭС в ходе проведения не предусмотренных обычным регламентом испытаний. Эту процедуру также следует включить в программу ПРНБ.
- (12) МАГАТЭ следует организовать симпозиум по вопросу противопожарной защиты, на котором должны быть рассмотрены следующие вопросы:

- (а) разработка научно-технической основы предотвращения и тушения пожаров с учетом наличия таких опасных условий, как высокие температуры и наличие ядерных материалов;
- (б) совершенствование оборудования по предотвращению и тушению пожаров на АЭС.

Предполагается, что результаты симпозиума послужат основой для разработки возможных новых норм в области предотвращения и тушения пожаров (см. п. 7).

В. РАДИАЦИОННАЯ ЗАЩИТА

1. МЕРЫ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ПРИНЯТЫХ РЕШЕНИЙ

- (1) МАГАТЭ следует возглавить работу по оценке значительного опыта, накопленного в ходе ликвидации причин и последствий аварий, а именно в оценке, прогнозировании и лечении нестохастических последствий у лиц, получивших значительные дозы облучения — в особенности острой лучевой болезни и вызванного облучением поражения кожи. Следует также разработать рекомендации по разработке основных терапевтических методов правильных прогнозов.
- (2) МАГАТЭ следует в сотрудничестве с другими международными организациями организовать обмен опытом проведенных в прошлом эпидемиологических исследований с целью определения полезности их результатов для разработки методических принципов (включая процедуры создания баз данных и регистров учета лиц из числа населения) для эпидемиологических исследований отдаленных последствий у отдельных групп населения, подвергнувшихся облучению в связи с аварией в Чернобыле.
- (3) МАГАТЭ следует совместно с другими международными организациями принять участие в запланированном НКДАР проведении оценки индивидуальных и коллективных доз, полученных в результате аварии, в рамках проводимой им на постоянной основе оценки воздействия всех источников излучения.
- (4) МАГАТЭ следует изучить опыт, накопленный в области создания укрытий и эвакуации населения после аварии в Чернобыле с целью определения эффективности подобных защитных мер, выявления проблем, связанных с их введением, и их целесообразности с учетом факторов времени и уровней загрязнения окружающей среды.

2. ДАЛЬНЕЙШАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ МАГАТЭ И ДРУГИЕ МЕЖДУНАРОДНЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ

- (1) В условиях, когда отсутствие рекомендованных в международном порядке значений доз на единицу поступления радионуклидов (ингаляционного или перорального) в зависимости от возраста данного лица и физико-химической формы радио-

нуклидов, обнаруженных в окружающей среде, представляет проблему, с которой столкнулись во многих странах при оценке последствий аварии в Чернобыле, МАГАТЭ следует содействовать установлению согласованных значений — в первую очередь для наиболее важных дозоформирующих радионуклидов.

- (2) На основе опыта, полученного в связи с аварией в Чернобыле, МАГАТЭ следует в сотрудничестве с такими организациями, как ВОЗ и ФАО разработать дополнительные рекомендации по дозовым уровням вмешательства и производным уровням вмешательства в целях сокращения стохастических рисков и ожидаемой коллективной эквивалентной дозы, в особенности на территории, выходящей за пределы района, непосредственно подвергающегося воздействию аварии.
- (3) МАГАТЭ следует разработать технические рекомендации по критериям и процедурам взятия радиологических проб и дозиметрического контроля в чрезвычайных обстоятельствах, когда требования в отношении времени и точности измерений радиоактивности окружающей среды и потребности в области принятия решений отличаются от тех, которые существуют при взятии радиологических проб и дозиметрическом контроле в нормальных условиях.
- (4) МАГАТЭ следует разработать технические рекомендации по оперативному направлению больших количеств данных, их сбору и сопоставлению вслед за ядерной аварией (включая данные по загрязнению окружающей среды и метеорологические данные) для использования в качестве информационного источника при оценках радиационной ситуации.
- (5) МАГАТЭ следует разработать критерии по доступу на установки, попавшие под воздействие ядерных аварий, и в районы вне их площадок, а также рекомендации по проведению восстановительных работ.
- (6) В свете аварии в Чернобыле МАГАТЭ следует разработать технические рекомендации (критерии и спецификации) в отношении защитной одежды, способной противостоять высоким уровням бета-излучения.
- (7) МАГАТЭ следует разработать технические рекомендации в отношении оценок крупномасштабного облучения (внешнего и внутреннего) населения, оборудования, технических средств, помещений, почвы, воды и воздуха в результате ядерной аварии с целью определения необходимых масштабов операций по дезактивации и радиационной защите персонала, участвующего в проведении таких оценок.
- (8) МАГАТЭ следует разработать технические рекомендации по вопросам радиационной безопасности, связанным с загрязнением АЭС и большой площади земли вокруг станции вслед за ядерной аварией.
- (9) МАГАТЭ следует разработать практические рекомендации по принятию мер в отношении выбросов радиоактивных веществ в окружающую среду данного государства в тех случаях, когда источник выброса находится за пределами национальных границ данного государства, но тем не менее требуется принятие мер для защиты населения.
- (10) МАГАТЭ следует разработать технические рекомендации по использованию моделей в реальном режиме времени, которые позволят включить в них реальные данные системы метеорологического и дозиметрического контроля при прогнозировании

- среды и определению необходимых защитных мер.
- (11) В целях совершенствования прогнозирования последствий аварийных выбросов радиоактивности МАГАТЭ следует, в сотрудничестве с ВМО, проанализировать модели атмосферного переноса радионуклидов на малые и большие расстояния и отложения радионуклидов на земной поверхности (почва, растительность, здания и т.д.) и провести их взаимное сравнение, а также создать базу данных для определения подтверждения пригодности таких моделей. Кроме того, МАГАТЭ следует осуществить аналогичные мероприятия в отношении моделей переноса радионуклидов в земной окружающей среде и пищевых цепочках, переноса радионуклидов через поверхностную водную массу (свежая вода и морская вода), а также их переноса в окружающей среде в условиях городов.
 - (12) МАГАТЭ следует содействовать обмену информацией в области существующих или разрабатываемых машинных программ по вероятностной оценке последствий аварий.
 - (13) Весьма важно дать возможность медицинским работникам различных специальностей и практикующим врачам проконсультировать население по вопросу о воздействии случайного облучения различными дозами и в различных условиях. Представляется, что одинаково полезным является требование о том, чтобы медицинские работники, которые могут принимать участие в оказании первой медицинской помощи и первоначальном лечении облученных лиц, обладали соответствующим уровнем знаний и подготовки. В связи с этим МАГАТЭ в сотрудничестве с ВОЗ следует приступить к исследованию вопроса о том, какие темы и в каком объеме следует включить в программу повышения квалификации медицинских работников, с тем чтобы обеспечить выполнение этих задач и требований.

С. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

В рамках расширенной программы МАГАТЭ в области ядерной безопасности предусмотрены меры, направленные на содействие операторам АЭС в деле поддержания максимально высокого уровня безопасности, при уделении особого внимания предотвращению аварий.

Эти мероприятия уже проводятся в рамках программы МАГАТЭ, однако могут быть значительно расширены в рамках международного сообщества с несомненной пользой дальнейшего обеспечения безопасности.

В частности, следует предусмотреть предоставление со стороны МАГАТЭ специальной помощи по запросу, в особенности в целях оказания помощи странам с ограниченными ресурсами.

РЕАКТОРЫ РБМК 3-ГО И 4-ГО БЛОКОВ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

В этом приложении описываются лишь те моменты, которые необходимы для понимания того, как функционируют реакторы РБМК-1000, и как произошла авария на блоке №4 Чернобыльской атомной электростанции. В подразделе 1 речь идет об истории эксплуатации реакторов РБМК-1000, в подразделе 2 — о конструкции реактора и в подразделе 3 — о системах безопасности.

1. ИСТОРИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕАКТОРОВ РБМК-1000

Реакторы типа РБМК весьма успешно эксплуатировались в Советском Союзе. После начальной разработки системы Советский Союз непосредственно приступил к созданию полномасштабных блоков мощностью 100 МВт(эл.). Первый РБМК-1000 был введен в эксплуатацию в Ленинграде в 1974 году. Атомные электростанции в Ленинграде, Курске и Чернобыле имеют по четыре блока, построенных попарно, каждый блок приводит в действие два турбогенератора мощностью 500 МВт(эл.). Первые два (из четырех) блока действуют в Смоленске, а еще два строятся в Чернобыле.

Первый из двух более мощных, на 1500 МВт(эл.), реакторов такого типа был введен в эксплуатацию в Игналино в 1984 году. По своему физическому размеру он аналогичен РБМК-1000, но его плотность энерговыделения в топливе на 50% превышает аналогичный показатель последнего. Основные технические параметры для обеих модификаций реактора приводятся в таблице III.

С точки зрения безопасности конструкция позволяет преодолевать серьезные ошибки. Тому есть наглядные свидетельства. Например, на Курской установке в январе 1980 года имело место полное падение внутренней нагрузки станции, но это не вызвало серьезных последствий, а также имел место ряд случаев неисправности системы подачи воды. Ни одно из представленных выше явлений не породило серьезных проблем в области безопасности станций.

В табл. IV отражены некоторые показатели работы АЭС с этими реакторами.

2. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ ПЛОЩАДКИ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ СТАНЦИИ И ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ РЕАКТОРОВ РБМК-1000

2.1. Описание площадки чернобыльского реактора и района расположения станции

Чернобыльская АЭС (рис. 5) расположена в восточной части большого региона, именуемого Белорусско-Украинским полесьем, на берегу реки Припять, впадающей в Днепр.

ТАБЛИЦА III. ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ С РЕАКТОРАМИ ТИПА РБМК

Характеристики	РБМК-1000	РБМК-1500
Электрическая мощность (МВт)	1000	1500
Тепловая мощность (МВт)	3200	4800
Паропроизводительность (т/ч)	5800	8800
Параметры пара перед турбинами:		
давление (кг/см ²)	65	65
температура (°С)	280	280

ТАБЛИЦА IV. ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ РЕАКТОРОВ ТИПА РБМК

Показатели	Ленинградская АЭС	Курская АЭС	Чернобыльская АЭС	Смоленская АЭС
Установленная мощность на 1.01.86 г. (МВт)	4000	4000	4000	4000
Выработка электроэнергии за 1981–1985 годы (млрд. квт·ч)	140,4	82,4	106,6	23,4
Коэффициент использования установленной мощности за 1985 год (%)	84	79	83	76
Коэффициент использования установленной мощности для определенного блока	91 (U4) 87 (U1)		90 (U2)	

Строительство Чернобыльской АЭС осуществляется в три очереди, каждая из которых включает в себя два блока РБМК-1000. Первая очередь (1-й и 2-й блоки) была построена в период 1970 и 1977 годов, строительство второй очереди (блоки 3-й и 4-й) было завершено к концу 1983 года. В 1,5 км к юго-востоку от этой площадки в 1981 году было начато строительство еще двух энергоблоков с такими же реакторами.

Каждая очередь из двух блоков имеет общую специальную систему очистки воды и вспомогательное оборудование.

К юго-востоку от площадки, непосредственно в долине реки Припяти, построен наливной пруд-охладитель площадью 22 кв. км, который обеспечивает охлаждение конденсаторов турбин и других теплообменников первых четырех энергоблоков.

Вертикальный разрез по основному зданию реактора чернобыльского типа показан на рис. 6.

Схема очереди из двух блоков приводится на рис. 7. Каждый блок реактора вырабатывает пар для двух турбин мощностью 500 МВт (эл.).

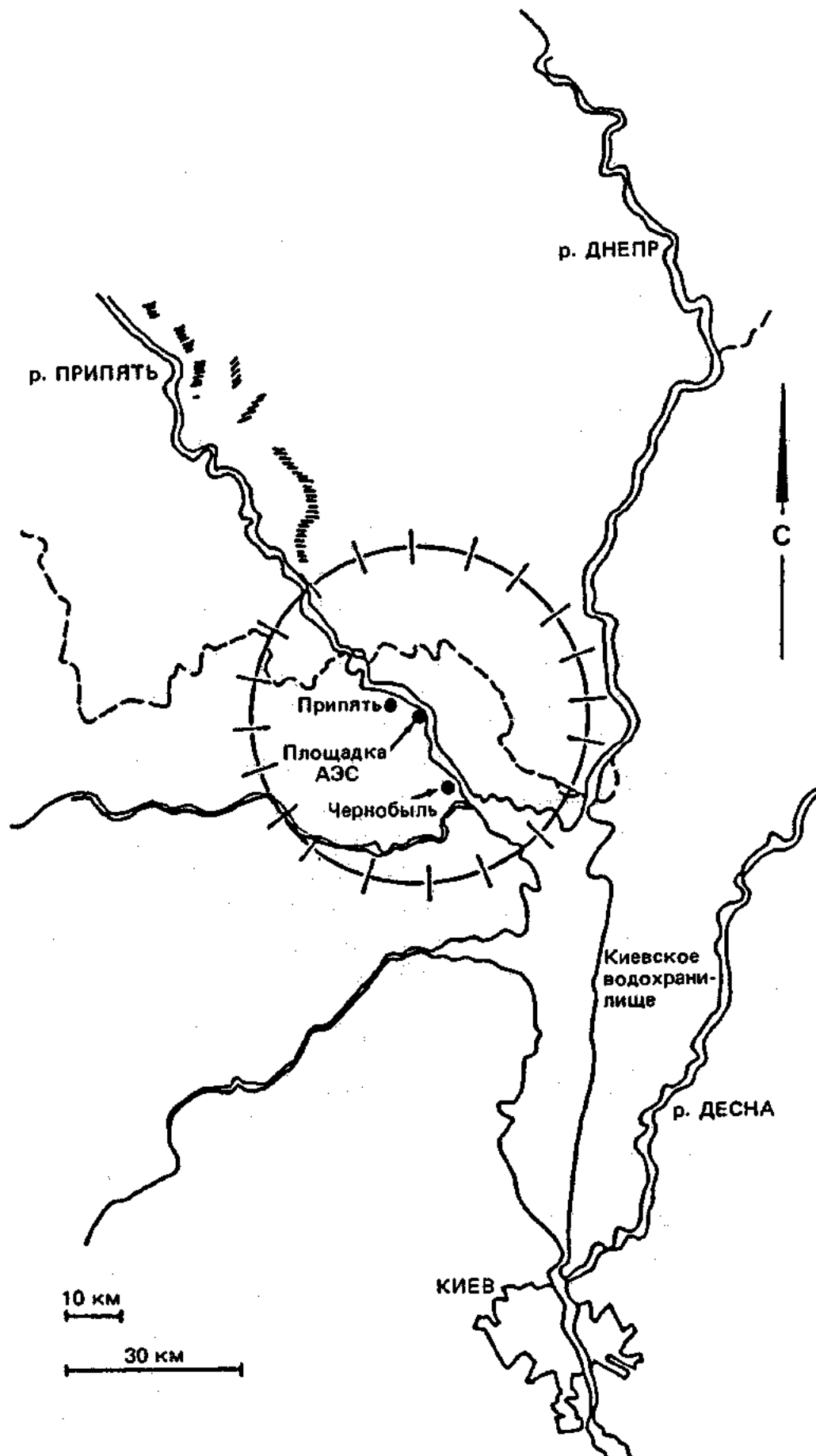


РИС. 5. Площадка Чернобыльской АЭС.

- 1 — графитовая кладка
- 2 — металлоконструкции системы "С"
- 3 — металлоконструкции системы "ОР"
- 4 — металлоконструкции системы "Е"
- 5 — металлоконструкции системы "КЖ"
- 6 — металлоконструкции системы "А"
- 7 — металлоконструкции системы "Д"
- 8 — барабан-сепаратор
- 9 — главный циркуляционный насос ЦВН-8
- 10 — электродвигатель ГЦН
- 11 — главная запорная задвижка ДУ-800
- 12 — всасывающий коллектор
- 13 — напорный коллектор
- 14 — раздаточный групповой коллектор
- 15 — нижние водяные коммуникации (НВК)
- 16 — пароводяные коммуникации (ПВК)
- 17 — опускные трубопроводы ДУ-300
- 17а — трубопроводы ДУ-800 контура МГЦ
- 18 — разгрузочно-загрузочная машина (РЗМ)
- 19 — мостовой кран центрального зала Q50/10t

- 20 — мостовой кран помещения ГЦН Q50/10t
- 21 — приточный вентилятор типа ВДМ на отм. +43,0
- 22 — вытяжной вентилятор на отм. +35,0
- 23 — бак организованных протечек
- 24 — теплообменник организованных протечек
- 25 — баки плано-предупредительных ремонтных работ
- 26 — металлоконструкции и трубопроводы зоны локализации аварий
- 27 — обратные клапаны помещения НВК
- 28 — перепускной клапан системы локализации аварий
- 29 — конденсаторы системы локализации аварий
- 30 — турбоагрегат К-500-65/3000
- 31 — сепаратор пароперегревателя СПП-500
- 32 — мостовой кран машинного зала Q125t
- 33 — трубопроводы из углеродистой стали
- 33 — трубопроводы из нержавеющей стали
- 33 — деаэратор

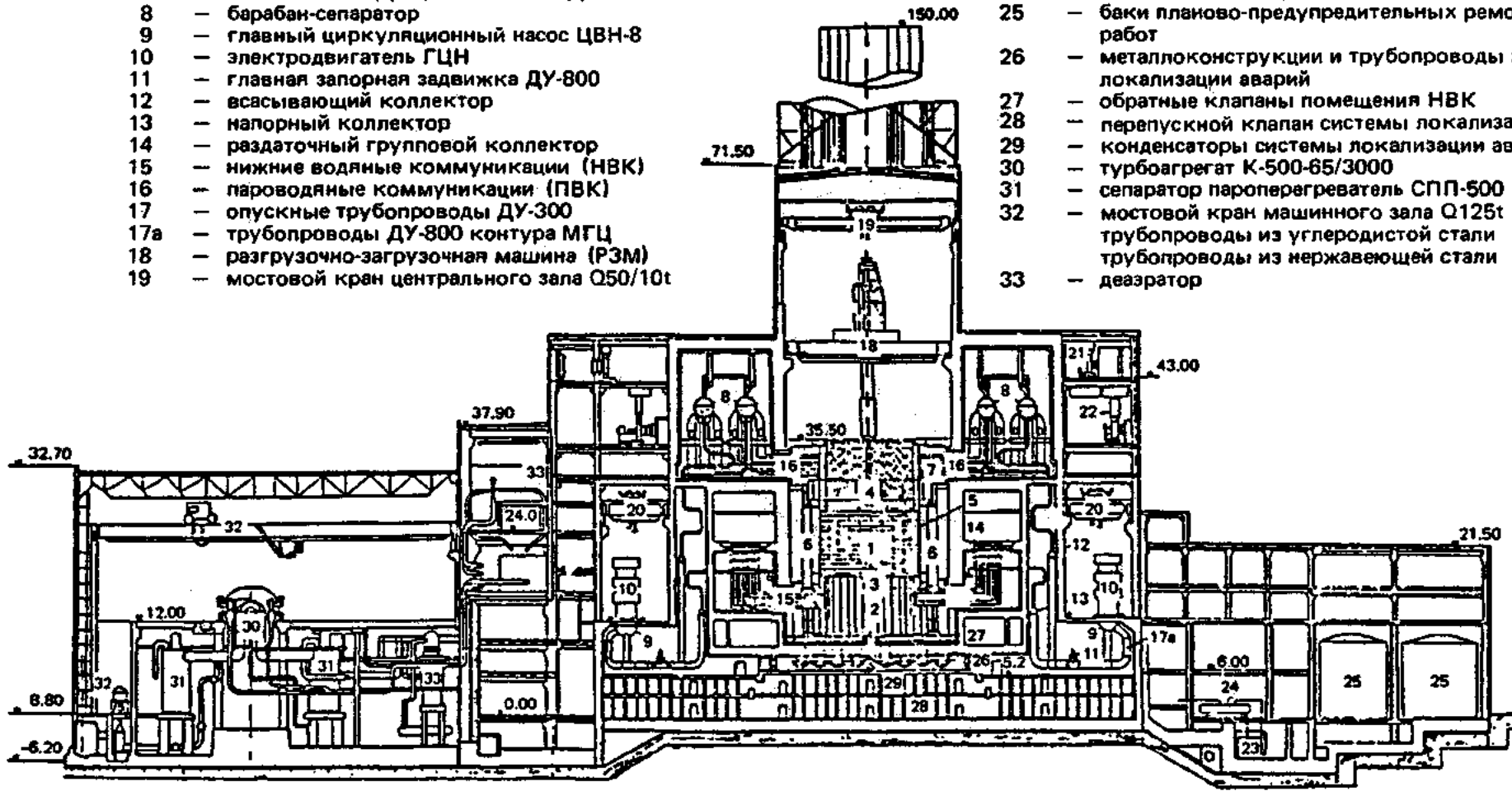


РИС.6. Вертикальный разрез по основному зданию реактора Чернобыльской АЭС (размеры даны в метрах).

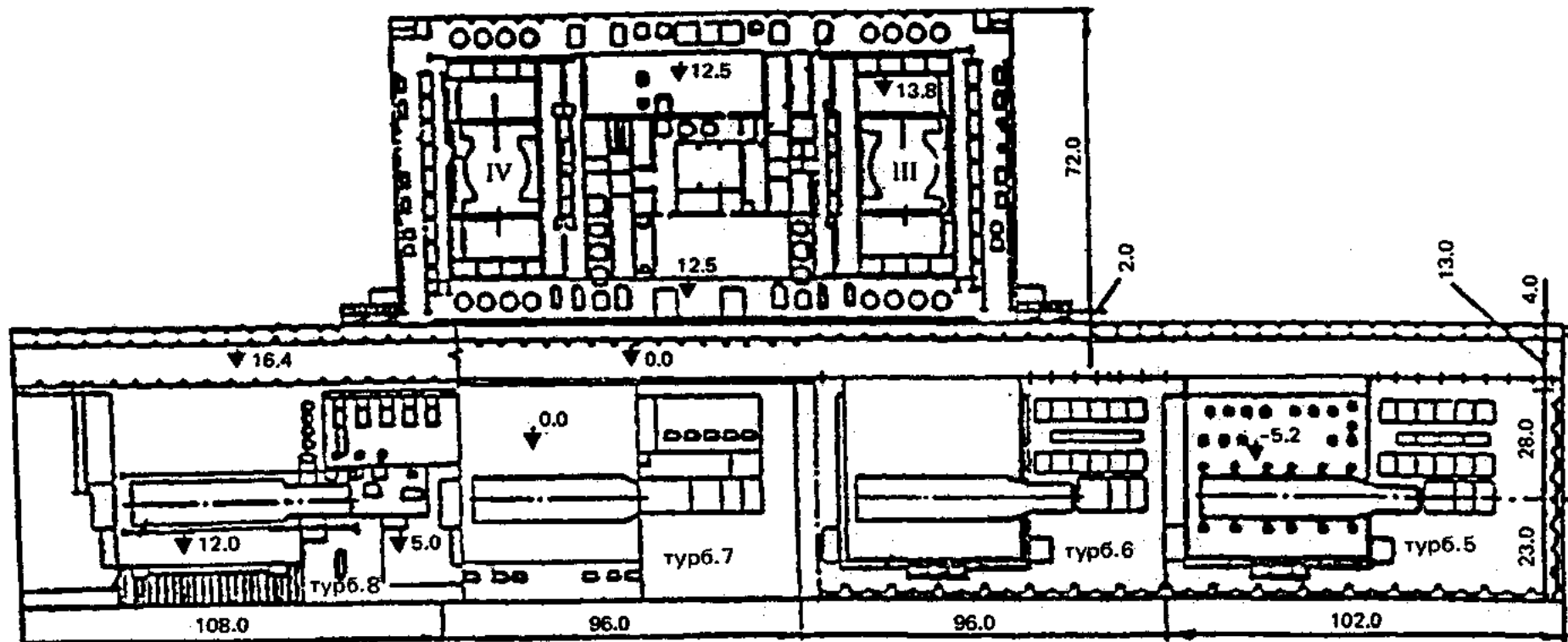


РИС. 7. Горизонтальный разрез Чернобыльской АЭС, энергоблоки №3 и №4 (размеры даны в метрах).

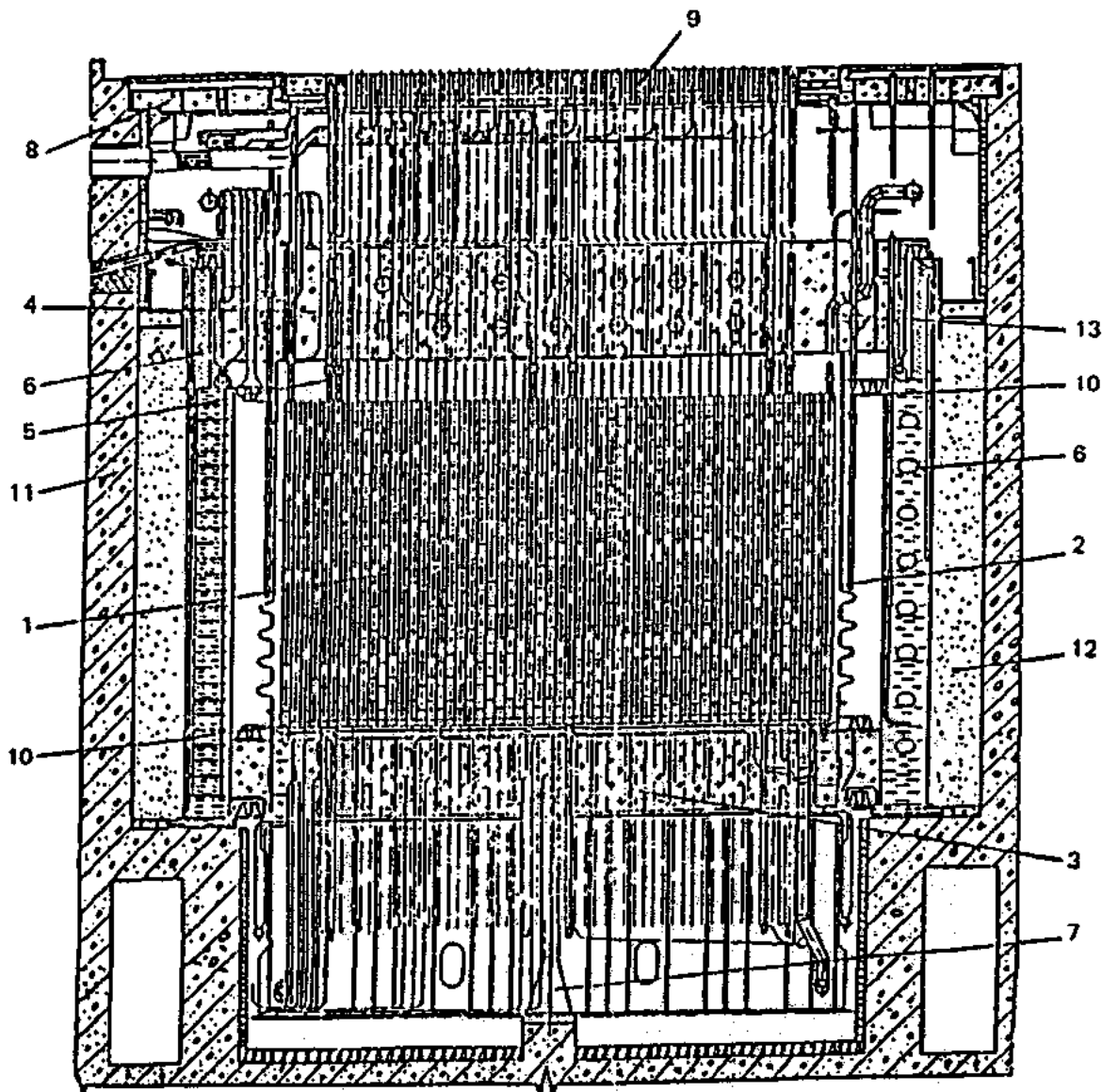


РИС. 8. Вертикальный разрез активной зоны Чернобыльской АЭС: 1 – активная зона (графитовые блоки); 2 – цилиндрический кожух активной зоны; 3 – опорная плита нижних металлоконструкций; 4 – верхняя плита металлоконструкций и биологической защиты; 5 – тракты топливных технологических каналов; 6 – кольцевой бак с водой; 7 – опорная металлоконструкция; 8,9 – блоки перекрытия пола реакторного зала; 10 – стальная плита основания (активной зоны); 11 – шахта реактора; 12 – засыпка песком.

Каждый реактор с оборудованием контура многократной принудительной циркуляции расположен в отдельных блоках, между которыми установлены вспомогательные системы.

Зал турбогенераторов (ТГ) является общим для двух блоков реактора. К нему относятся четыре турбогенератора и связанные с ними системы.

2.2. Описание характеристик реакторов РБМК-1000

Чернобыльский реактор представляет собой систему, в которой в качестве замедлителя используется графит, в качестве теплоносителя – легкая вода, в качестве топлива – UO_2 в 1661 отдельном вертикальном канале. Геометрическое расположение актив-

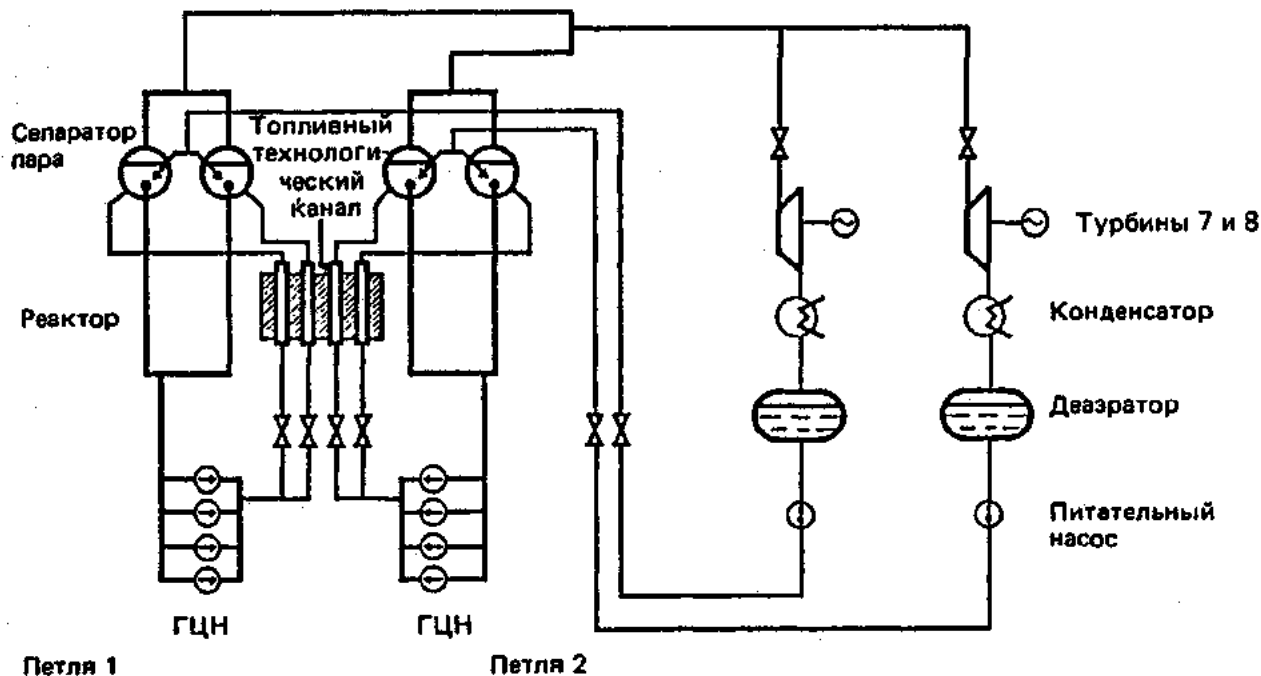


РИС. 9. Принципиальная схема системы охлаждения 4-го блока Чернобыльской АЭС.

ной зоны можно увидеть на рис. 8. Она состоит из графитовых блоков (250 X 250 мм, 600 мм высота), образующих вместе цилиндр диаметром 12 м и высотой 7 м.

Она расположена в герметичной полости, образованной цилиндрическим кожухом и плитами нижней и верхней металлоконструкций. Помимо графитовых блоков, образующих радиальный отражатель, каждый блок имеет центральное отверстие, которое обеспечивает пространство для топливных каналов и одного из каналов стержней поглотителей, образуя таким образом решетку с шагом 250 мм.

Топливные каналы и каналы регулирующих стержней проходят через нижние и верхние металлоконструкции и соединяют две отдельные системы охлаждения под активной зоной и над ней. Приводы регулирующих стержней расположены над активной зоной под верхней защитной конструкцией реакторного зала.

Топливо в виде таблеток UO_2 помещено в оболочку из сплава циркония и ниобия. Восемнадцать тепловых стержней длиной приблизительно 3,5 м располагаются в виде пучка цилиндрической формы, причем два из них находятся наверху других стержней в каждом топливном канале. Перегрузка топлива осуществляется на мощности с помощью разгрузочно-загрузочной машины, расположенной над активной зоной. Ежедневно могут перегружаться один—два топливных канала.

Как схематично указано на рис. 9, система охлаждения состоит из двух петель. Теплоноситель поступает в топливные каналы снизу при температуре $270^{\circ}C$, при движении вверх его температура увеличивается, и он частично испаряется. Содержание массы пара на выходе из активной зоны составляет приблизительно 14,5% при эксплуатации на полную мощность. Давление на выходе и соответствующая температура — 7 МПа (70 бар) и $284^{\circ}C$. Влажный пар из канала поступает в барабаны-сепараторы. Для каждой петли охлаждения предусмотрено два барабана-сепаратора. Отделенный сухой пар (влажность менее 0,1%) поступает по двум паропроводам в две турбины мощностью по 500 МВт (эл.) каждая, а вода после смешения с конденсатором пара по

12 опускающим трубам подается в коллекторы главных циркуляционных насосов. Конденсат из турбин поступает в сепараторы в качестве питательной воды, тем самым создавая недогрев воды на входе главного циркуляционного насоса.

Через циркуляционные насосы теплоноситель попадает в коллекторы, которые распределяют его по индивидуальным топливным каналам активной зоны.

Поток теплоносителя каждого топливного канала может регулироваться независимо индивидуальным клапаном, с тем чтобы компенсировать колебания в распределении энергии. Мощность потока через активную зону контролируется с помощью циркуляционных насосов. Каждая петля имеет четыре насоса, из которых один обычно является резервным при эксплуатации на полной мощности.

Приблизительно 95% энергии, выделяющейся в результате реакции деления, прямо передается теплоносителю, 5% поглощается в графитовом замедлителе и в основном передается теплоносителю. Последняя порция энергии деления передается в каналы теплоносителя с такой проводимостью, которая ведет к максимальной температуре в графите приблизительно 700°C . Смесь гелия и азота усиливает проводимость зазора между графитовыми блоками и обеспечивает химический контроль графитовых труб и труб под давлением.

2.2.1. Система управления и защиты (СУЗ)

Система управления и защиты в реакторах РБМК имеет следующие основные функции:

- (a) регулирование мощности реактора и периода ее увеличения в режиме работы от 8×10^{-12} до 1,2 полной мощности;
- (b) ручное регулирование распределения энерговыделения для компенсации изменений в реактивности, связанных с выгоранием и другими эффектами;
- (c) автоматическая стабилизация радиально-азимутального распределения энерговыделения;
- (d) управляемое снижение мощности до безопасных уровней, когда некоторые параметры установки превышают установленные пределы;
- (e) аварийная защита в условиях аварии.

Система включает в себя следующие измерительные приборы:

- (a) двадцать четыре ионизационные камеры, помещенные в зону отражателя, которые используются для приведения в действие трех комплектов стержней автоматического регулирования;
- (b) двадцать четыре камеры деления, которые представляют собой датчики внутри активной зоны, расположенные в центральных отверстиях топливных сборок, используемых для приведения в действие локальных автоматических датчиков.

2.2.2. Устройства контроля реактивности

Как показано на рис. 10, существует 211 стержней-поглотителей, расположенных в активной зоне, по функциям их можно подразделить на следующие группы:



Основные подсистемы

- (a) *Контроль нейтронного потока.* Камера деления контролирует нейтронный поток в режиме разгона и на промежуточных уровнях мощности вплоть до номинальной мощности. Их сигналы обрабатываются, используются в системе защиты и воспроизводятся на экране на пульте оператора.
- (b) *Автоматическое регулирование мощности реактора.* Система включает в себя три идентичных комплекта автоматических регуляторов средней мощности реактора. Сигнал автоматического регулирования формируется путем суммирования относительных отклонений мощности от заданной в трех из четырех измерительных каналов ионизационной камеры. Система работает в диапазоне малой мощности (0,5%–10% полной мощности) (один комплект) и диапазоне большой мощности (два комплекта).

Стабилизация распределения энерговыделения достигается с помощью систем локального автоматического регулирования и локальной аварийной защиты (ЛАР). Система ЛАР построена по принципу независимого регулирования мощности в 12 локальных зонах реактора с помощью 12 стержней регулирования.

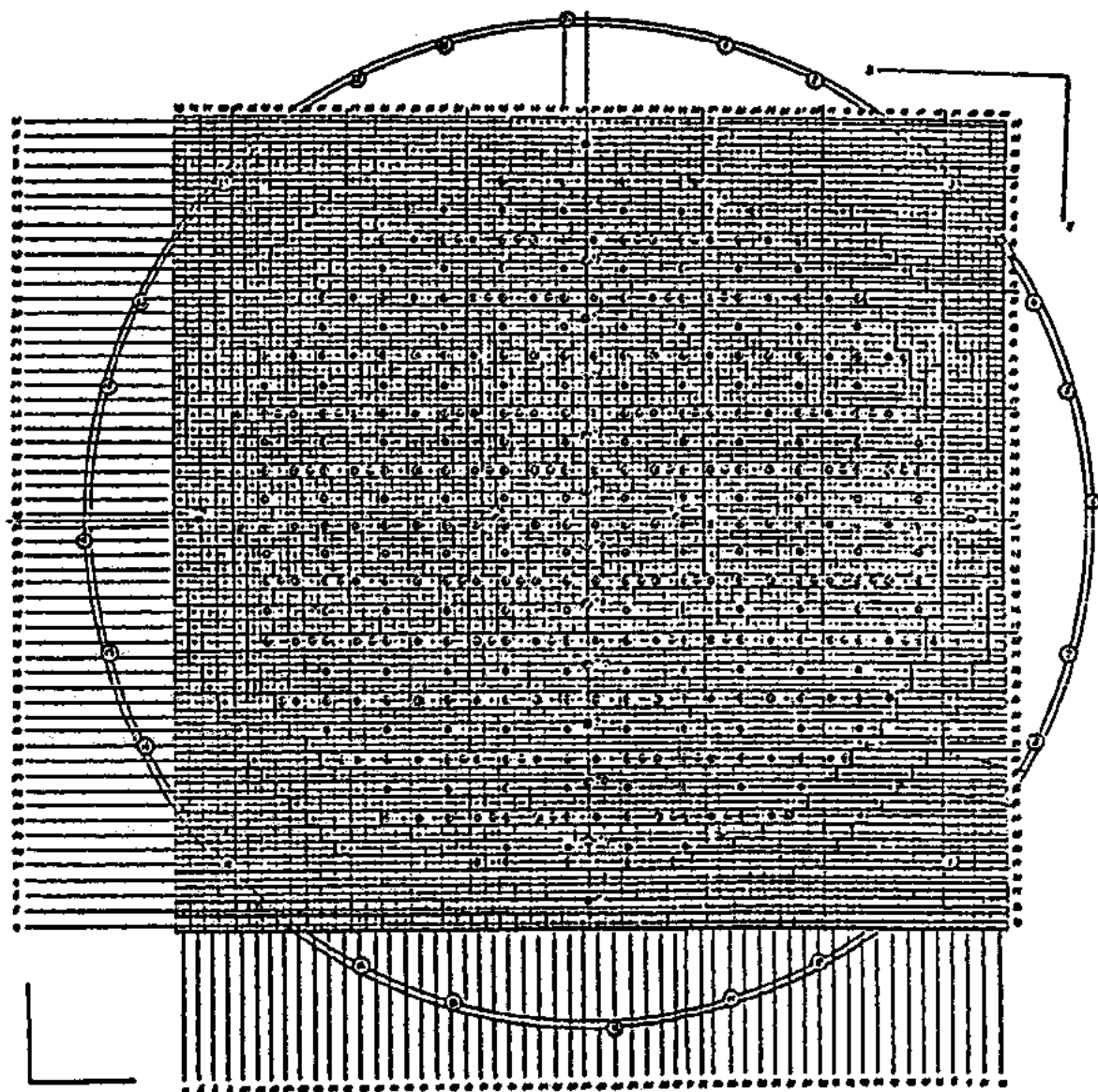


РИС. 10. Поперечный разрез активной зоны и размещение стержней управления.

Система автоматического регулирования средней мощности используется как резервная в диапазоне мощности от 20–100% и автоматически включается при отключении ЛАР по неисправности.

Пространственное распределение энерговыделения регулируется путем перемещения стержней ручного регулирования и стержней автоматического регулирования вверх, а укороченных стержней регулирования — вниз.

Автоматические регуляторы обеспечивают точность в поддержании энерговыделения реактора не менее $\pm 1\%$ по отношению к заданному уровню в пределах 20–100% полной мощности и в пределах $\pm 3\%$ в диапазоне 3,5–20% полной мощности.

- (с) *Аварийная защита реактора.* Защита реактора при чрезвычайных обстоятельствах достигается путем автоматического введения всех стержней поглотителей (за исключением укороченных стержней).

Двадцать четыре стержня, равномерно распределенные по реактору, набираются в режим аварийной защиты из общего числа стержней с помощью специаль-

на верхние концевики первыми.

Скорость стержней регулирования составляет 0,4 м/с. Когда регулирующий стержень отсоединяется от своего привода, что необходимо в случае потери энергии, скорость составляет около 0,4 м/с за счет свободного падения. Сопротивление потока не дает возможности развить большую скорость.

Наивысшим уровнем аварийности является уровень 5, когда вводятся все стержни (за исключением укороченных стержней-поглотителей) в активную зону до нижних концевиков. Параметры, используемые для обозначения падения мощности на уровне 5, включает в себя показатели нейтронного потока, такие как большая мощность и малый период реактора, а также ряд показателей, связанных с процессом, таких как высокий и низкий уровень в барабанах-сепараторах, высокое давление в барабане-сепараторе, остановка двух турбогенераторов и т.д. Уровень, на котором осуществляется остановка при избыточной мощности, установлен в размере нынешней мощности плюс 10% номинальной мощности.

2.2.3. Система контроля процесса в реакторе

Система контроля за процессом в реакторе дает оператору информацию в визуальной и документальной форме относительно значений параметров, определяющих эксплуатационный режим реактора и условия его конструктивных элементов: топливных каналов, каналов управления, охлаждения отражателя, графитовой кладки, металлоконструкций и т.д.

Система предполагает следующие измерения и подсистемы:

- Расход теплоносителя во всех топливных каналах и каналах управления (1661 + 223 точки).
- Температура графитовой кладки и металлоконструкций (46 + 381 точка).
- Система контроля основных компонентов системы принудительной циркуляции, таких как барабаны-сепараторы, главные циркуляционные насосы, всасывающие и напорные коллекторы.
- Система для контроля распределения энерговыделения (130 (по радиусу) + 84 (по оси)).

Автоматизированная система централизованного контроля "Скала" предназначена для осуществления контроля за процессами в основном оборудовании блоков атомных электростанций с РБМК-1000, а также для выполнения расчетов и логического анализа режимов на энергоблоках с выдачей результатов эксплуатационному персоналу.

3. СИСТЕМА БЕЗОПАСНОСТИ

3.1. Системы аварийного охлаждения реактора (САОР)

Назначение этой системы, схема которой приводится на рис. 11, заключается в обеспечении эффективного быстрого и длительного гашения и отвода накопленной

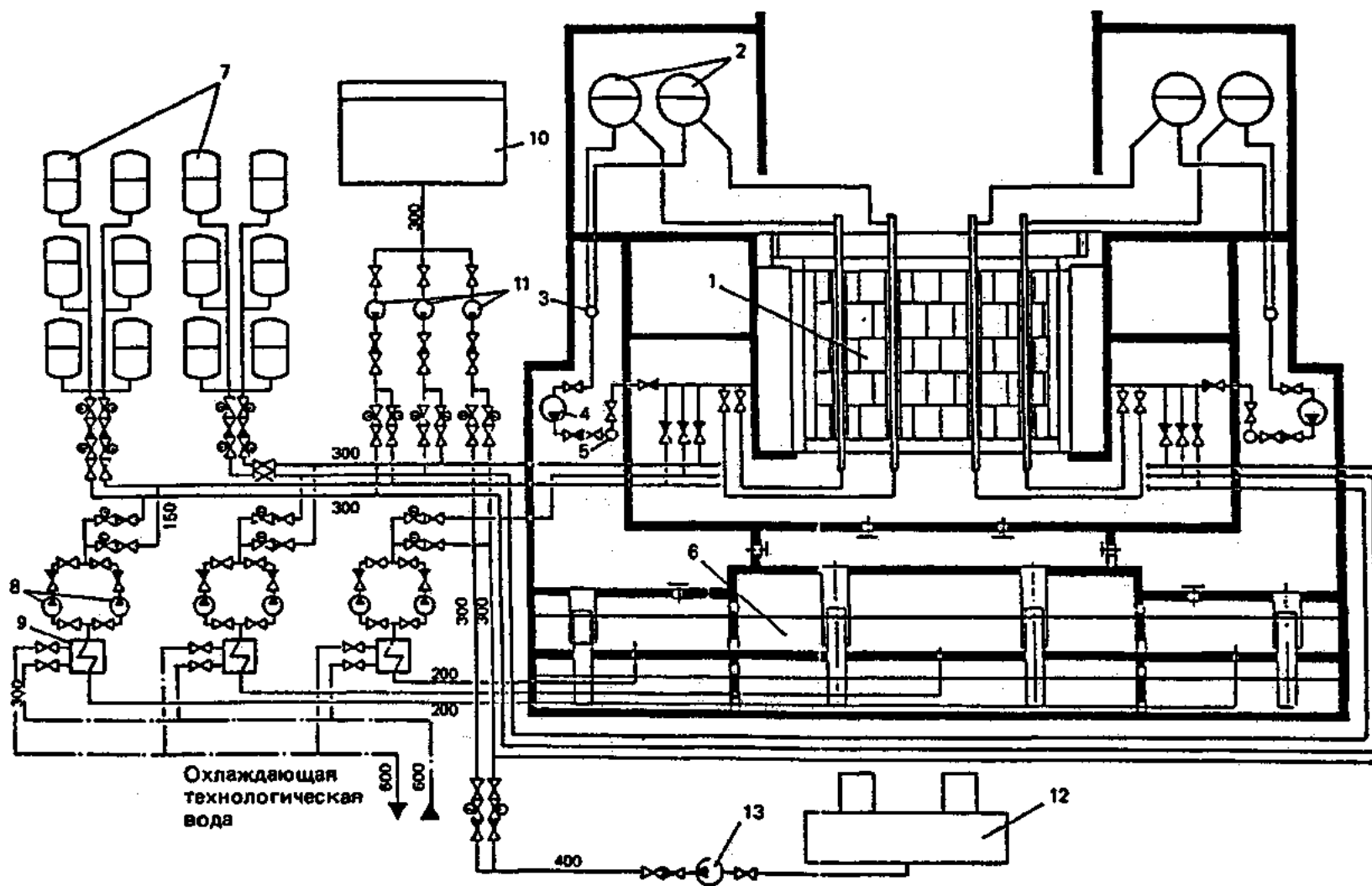


Рис. 11. Принципиальная схема системы аварийного охлаждения реактора: 1 – реактор; 2 – сепараторы пара; 3 – всасывающий коллектор; 4 – главный циркуляционный насос; 5 – напорный коллектор; 6 – бассейн-барботер; 7 – сосуды САОР; 8 – насосы САОР для охлаждения поврежденной половины реактора; 9 – теплообменники; 10 – бак чистого конденсата; 11 – насосы САОР для охлаждения неповрежденной половины реактора; 12 – деаэрактор; 13 – питательный насос.

энергии, сопровождающих нарушение нормального охлаждения. Основными характеристиками являются:

- (1) Поскольку разрыв может случиться лишь в одном из двух главных контуров, система защиты обладает способностью сравнивать аварийные и неаварийные контуры.
- (2) Для обеспечения быстрой подачи воды в аварийный контур герметичные сосуды с водой соединены с этим контуром (см. рис. 11) с помощью быстродействующей задвижки. Давление в этих сосудах доведено до 10 МПа (100 бар). Среднесрочная и длительная подача воды осуществляется из бассейна барботера в аварийный контур с помощью насосов с электрическим приводом.

Система насосов состоит из трех групп насосов, каждый из которых обеспечивает 50% потребного расхода воды и состоит из насоса с высоким давлением и насоса с низким давлением. Для длительного функционирования вода в бассейне-барботере должна охлаждаться с помощью теплообменников.

- (3) Подача воды в неаварийный контур обеспечивается с помощью трех параллельных насосов с электрическим приводом, осуществляющим забор воды из сосуда, который содержит чистый конденсат. Каждый насос обеспечивает не менее 50% потребного расхода.

3.2. Защитная оболочка

Реакторы РБМК-1000 второй очереди (т.е. блоки №№3 и 4 Чернобыльской АЭС) имеют защитную оболочку с бассейном-барботером под реактором. Основная часть оболочки схематически показана на рис. 12. В советских рабочих документах она называется "система локализации аварии".

Защитная оболочка имеет различные отсеки с разными допустимыми по проекту значениями превышения давления. Для всех отсеков с трубопроводами и коллекторами от первого контура предусмотрено несущественное превышение давления.

Основными характеристиками являются:

- (1) В случае разрыва в пространстве реактора (1) (на рис. 12) пар, вода, азот, гелий и, возможно, водород отводятся через два трубопровода в бассейн-барботер, где пар конденсируется. Допустимое по проекту значение превышения давления в реакторном пространстве составляет 0,08 МПа (0,8 бара).
- (2) В отсеках (2) на рис. 12 находятся опускные трубопроводы, насосы и напорные коллекторы главного циркуляционного насоса (средний диаметр 900 мм) и рассчитаны на превышение давления на 0,45 МПа (4,5 бара).
- (3) В отсеках (3) на рис. 12 находятся раздаточные групповые коллекторы и трубопроводы нижних водяных коммуникаций, эти отсеки рассчитаны на превышение давления на 0,08 МПа (0,8 бара).

Реакторное пространство и отсеки (2) и (3) на рис. 12 являются герметичными и служат также для обнаружения утечки.

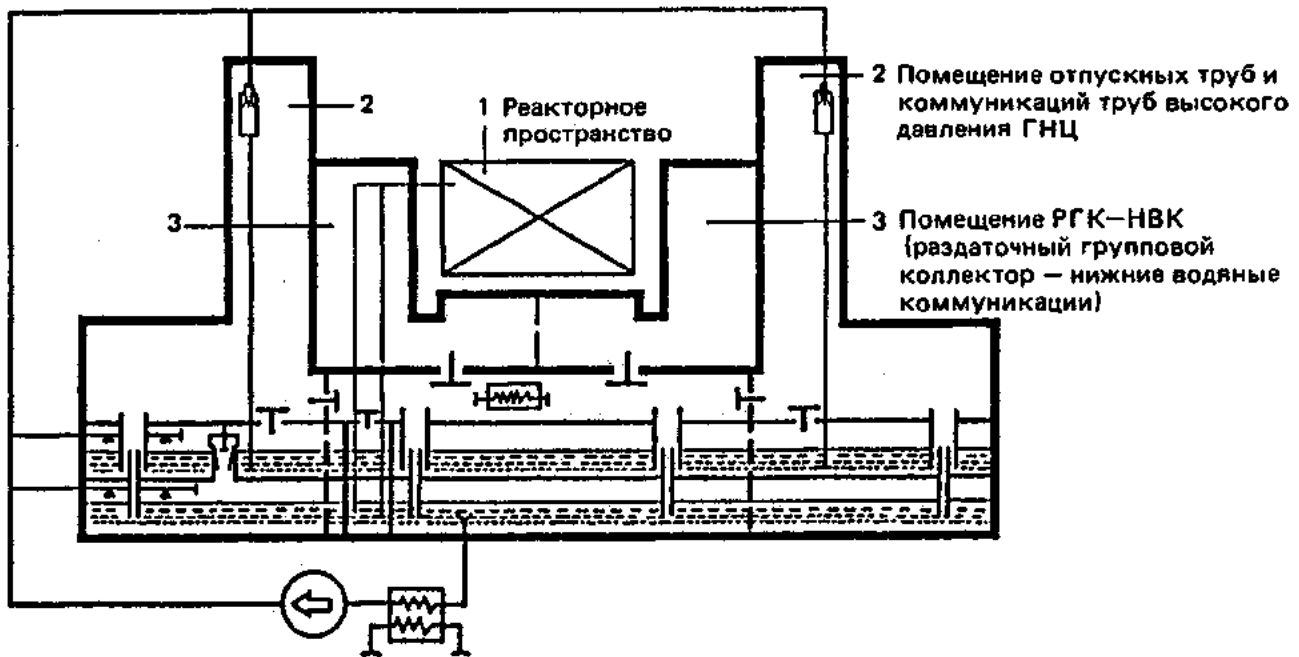


РИС.12. Принципиальная схема части системы локализации.

Отсеки соединены с парораспределительным коридором, а также водным и газовым пространством бассейна-барботера с помощью обратных, или перепускных, клапанов, которые открываются при превышении давления на 0,002 МПа (0,02 бара).

Все трубы первого контура, проходящие через границу отсека или реакторного пространства, имеют изоляционный клапан, за исключением труб первого контура, расположенного между выходом из активной зоны и входом в паросепараторы. В случае разрыва на этом участке может быть обеспечен сбор выделившегося пара и частичная конденсация с помощью установленных вентиляционных систем.

3.3. Системы защиты от превышения давления в основном контуре теплоносителя

Реакторы РБМК-1000 имеют систему защиты от превышения давления с целью избежания превышения допустимого значения давления в первичном контуре. Эта система оснащена главными предохранительными клапанами с общей пропускной способностью до 100% предусмотренного проектом паропотока. Пар конденсируется в бассейне-барботере. Предохранительные клапаны открываются при различных уровнях давления.

3.4. Другие штатные системы безопасности

Реактор оснащен также:

- контуром охлаждения каналов системы управления;
- газовыми контурами для регулирования газовой смеси в реакторном пространстве в целях изменения соотношения азота и гелия, конденсации вышедшего

- пара и очистки кислорода, водорода, аммиака, пара, оксида углерода, двуокиси углерода, метана и примесей азота;
- дополнительной системой охлаждения и очистки вод бассейнов выдержки отработавшего топлива;
 - системой охлаждения баков биологической защиты.

СПИСОК УЧАСТНИКОВ

Международная консультативная группа по ядерной безопасности (МКГЯБ)

Birkhofer, A.	Meneley, D.
Chung, K.T.	Nozawa, M.
Dai, C.	Rabold, H.
Edmondson, B.	Tanguy, P.
Kouts, H.J.C.	Veeraraghavan, N.
Lepecki, W.	Vuorinen, A.P., председатель

Abagyan A.A., эксперт-консультант
Beninson, D., эксперт-консультант

Эксперты из СССР

Демин В.Ф.	Рошин В.Д.
Ильин Л.А.	Рыжов М.Н.
Калугин А.К.	Слесарев И.С.
Лазуткин Е.С.	Загоруйко В.М.
Павловский О.А.	

Эксперты МАГАТЭ

Boeri, G.C.	Comitato Nazionale per la Ricerca e per lo Sviluppo dell'Energia Nucleare e delle Energie Alternative (ENEA), Italy
Brown, A.	Ontario Hydro, Canada
Frescura, G.M.	Ontario Hydro, Canada
Hicken, E.F.	Gesellschaft für Reaktorsicherheit, Federal Republic of Germany
Hill, M.	National Radiological Protection Board, United Kingdom
Jeschki, W.	Nuclear Safety Division (ASK), Switzerland
Kress, T.	Oak Ridge National Laboratory, United States of America
L'Homme, A.	Institut de protection et de sûreté nucléaire (CEA), France
Liniecki, J.	Akademii Medycznej w. Lodzi, Poland
Powers, D.	Sandia National Laboratories, United States of America
Young, J.D.	Central Electricity Generating Board, Berkeley Nuclear Laboratory, United Kingdom

Сотрудники МАГАТЭ

Salo, A.
Aleinikov, V.
Bianco, A.
Collins, H.
Emmerson, B.W.
Flakus, F.N.
Inaba, J.
Levin, I.
Utting, R.

Yaremy, E.
Amano, F.
Byszewski, W.
Fischer, J.
Giuliani, P.
Gürpınar, A.
Jankowski, M.
Joosten, J.
Karbassioun, A.
Kenneke, A.
Tolstykh, V.D.

Lederman, L.

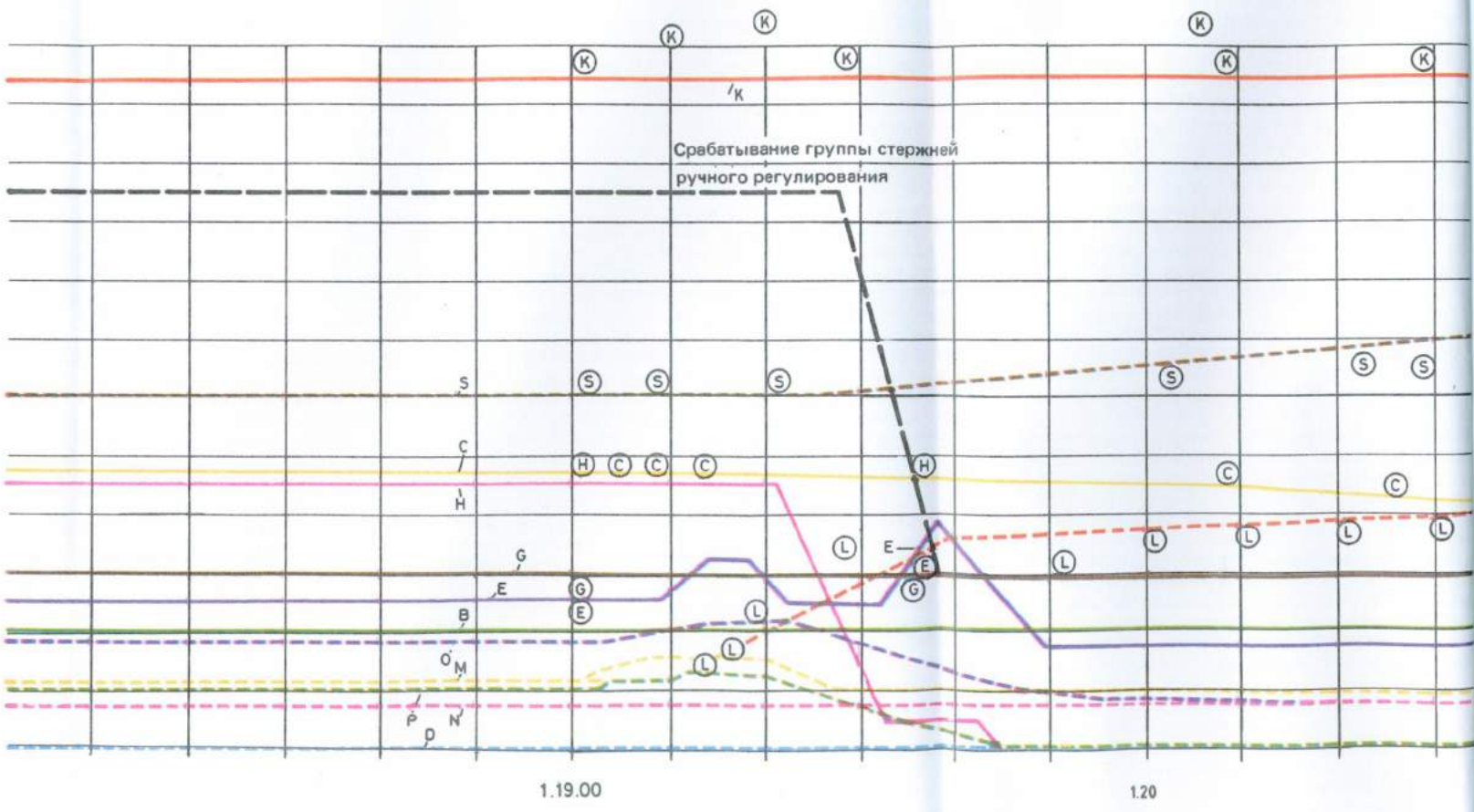
Delves, D., редактор
Iansiti, E., ученый секретарь МКГЯБ

Секретариат МАГАТЭ

Следующие сотрудники Секретариата МАГАТЭ участвовали в некоторых или всех пленарных заседаниях совещания МКГЯБ:

Бликс Х.	Генеральный директор
Константинов Л. В.	заместитель Генерального директора по вопросам ядерной энергии и ядерной безопасности
Розен М.	помощник заместителя Генерального директора по вопросам ядерной безопасности
Войчик Т.	специальный помощник Генерального директора

A	100.0	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	100.0	110.0	120.0
B	-10.0	-5.0	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0	45.0	50.0
C	34.0	57.0	60.0	63.0	66.0	69.0	72.0	75.0	78.0	81.0	84.0	87.0
D	0.0	4000.0	-8000.0	12000.0	16000.0	20000.0	24000.0	28000.0	32000.0	36000.0	40000.0	44000.0
E	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
F	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
G	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
H	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
I	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
J	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
K	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5
L	0.0	50.0	100.0	150.0	200.0	250.0	300.0	350.0	400.0	450.0	500.0	550.0
M	0.0	50.0	100.0	150.0	200.0	250.0	300.0	350.0	400.0	450.0	500.0	550.0
N	200.0	350.0	500.0	650.0	800.0	950.0	1100.0	1250.0	1400.0	1550.0	1700.0	1850.0
O	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5
P	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
S	-1200.0	-1100.0	-1000.0	-900.0	-800.0	-700.0	-600.0	-500.0	-400.0	-300.0	-200.0	-100.0



РАСШИФРОВКА ОБОЗНАЧЕНИЙ КРИВЫХ НА РИС. 1

ОБОЗНАЧЕНИЕ	МИН	МАКС	ОБОЗНАЧЕНИЕ
— A Тепловая мощность (%)	0	120	— K Расход ГЦН (м³/с)
— B Реактивность, суммарная (%)	-1	+5	- - L Расход питательной воды (кг/с)
— C Давление, барабан-сепаратор (бар)	54	90	— M Расход пара (кг/с)
- - - D Тепловая мощность (%)	0	48 000	— N Температура топлива
— E Группа стержней AP-1 (введенная часть)	0	1,2	- - - O Массовое паросодержание (на выходе активной зоны, %)
— G Группа стержней AP-2 (введенная часть)	0	1,2	- - - P Обменное паросодержание (усредненное по активной зоне, паровой коэф. реактивности)
— H Группа стержней AP-3 (введенная часть)	0	1,2	- - - S Уровень (барабан-сепаратор, мм)

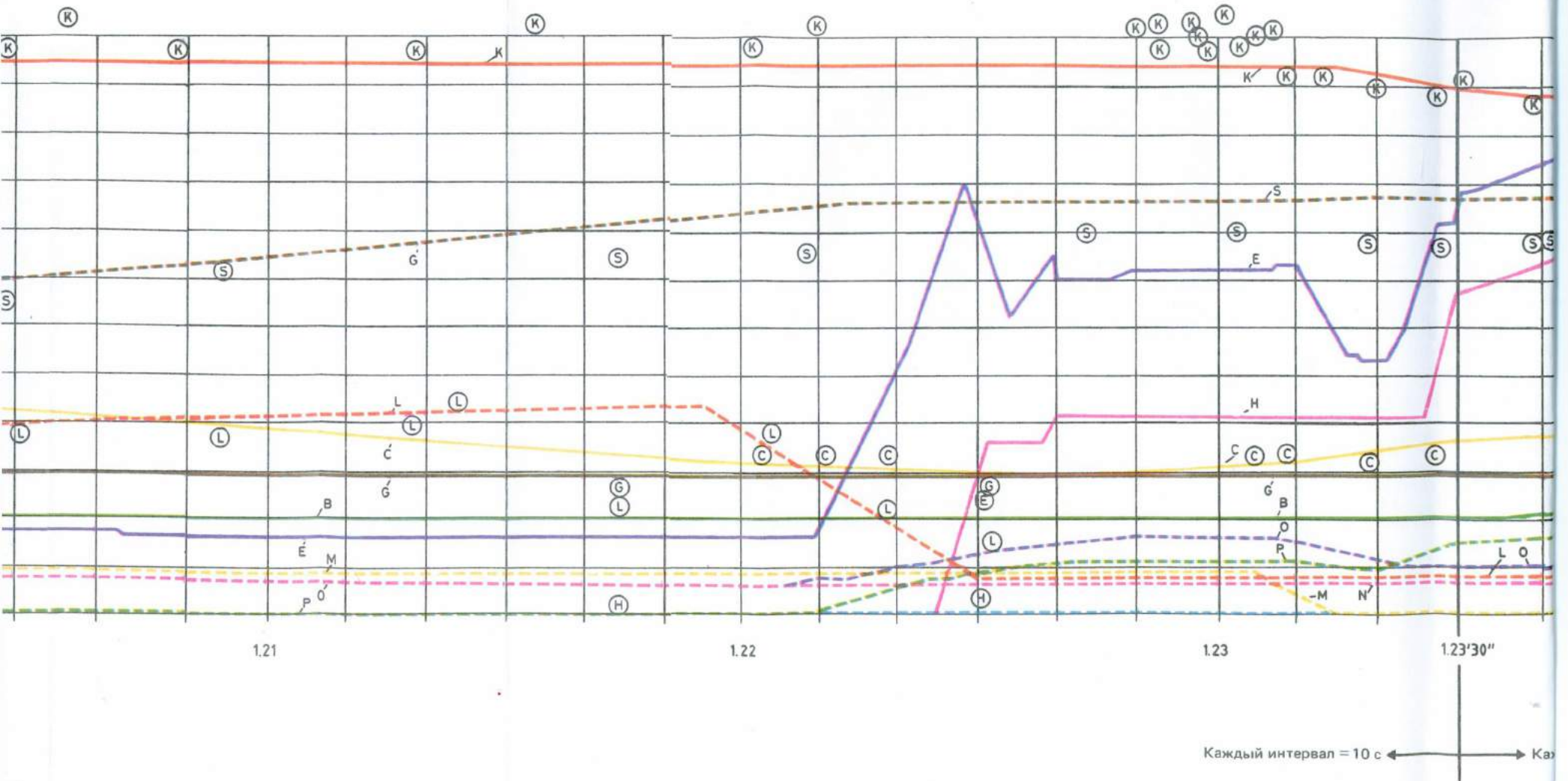


РИС. 1. Изменение во времени параметров реактора при моделировании чернобыльской аварии (Источник: советские рабочие документы, часть 1, рис. 4).

МИН МАКС

2 8

0 600

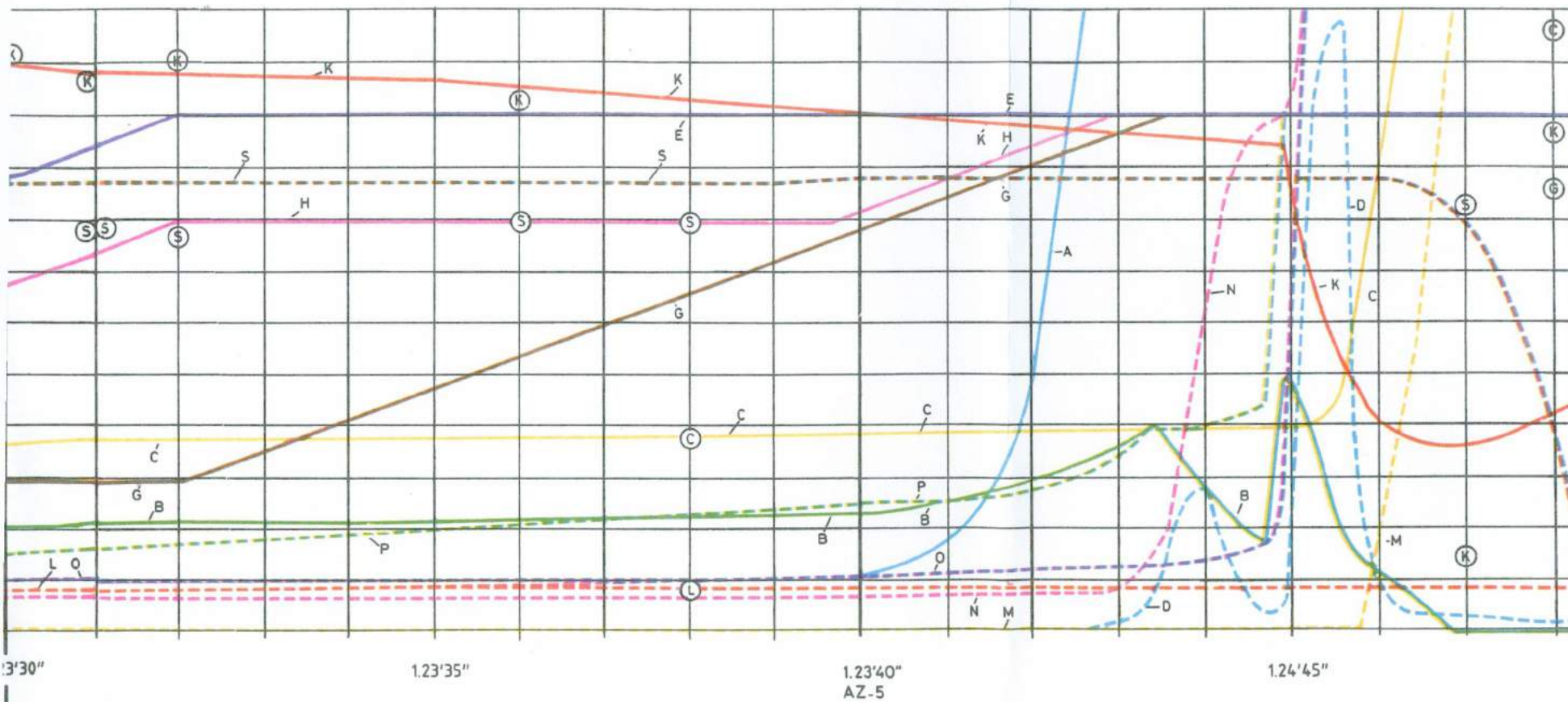
0 600

200 2000

0 6

активности) 0 1,2

-1200 0



○ Данные из пультовой (рис. 4, часть 1 советских рабочих документов)

→ Каждый интервал = 1 с