

Чернобыльская авария: причины и последствия

Спустя 40 лет после аварии на Чернобыльской АЭС история великой трагедии постепенно трансформируется в историю человеческого преодоления, а память служит главным гарантом безопасности. В нашей рубрике «Чернобыль: 40 лет осмысления» мы попытаемся рассмотреть все грани одной из крупнейших техногенных катастроф в истории человечества, чтобы осознать, какой путь пройден, заново проследить его - от первопричин, заложенных в эпоху технологического оптимизма, до долгосрочных последствий, которые изменили экологию, медицину и само отношение к ядерной энергетике во всем мире.

На электростанции работали реакторные установки РБМК электрической мощностью 1000 МВт. Пуск первого блока был осуществлен 26 сентября 1977 г., второго - 17 ноября 1978 г., третьего и четвертого - в декабре 1981 г. и декабре 1983 г. ЧАЭС была третьей станцией с реакторами такого типа после Ленинградской и Курской АЭС, запущенных в 1973 и 1976 гг. соответственно.

В водоохлаждаемых РБМК вода доходит до кипения, как в реакторах BWR (англ. boiling water reactor), однако в качестве замедлителя нейтронов используется графит. Активная зона высотой 7 м и диаметром 11,8 м набрана из 1888 графитовых колонн. В центральных полостях каждой из них установлены каналы: 1661 - технологические с тепловыделяющими кассетами (две последовательно соединенные тепловыделяющие сборки (ТВС) длиной по 3,5 м, содержащие 18 тепловыделяющих элементов (ТВЭлов) из двуоксида урана в оболочке из циркониевого сплава); остальные - каналы СУЗ (с 211 поглощающими нейтроны стержнями и 16 датчиками контроля), равномерно распределенные по активной зоне в

радиальном и азимутальном направлениях.

Графитовая кладка размещена в бетонной шахте площадью 21х21 м и глубиной 25 м. Она окружена цилиндрическим кожухом и плитами верхней и нижней металлоконструкций, образующими реакторное пространство. Реактор имеет биологическую защиту, которая снижает интенсивность излучения при работе на всех уровнях мощности до значений, соответствующих санитарным нормам.

Каналы соединены снизу несколькими коллекторами с водозабором, а в верхней части - с множеством труб, по которым пар (двухфазная смесь) поступает в барабаны-сепараторы, откуда при температуре 284 °С возвращается в турбину, в то время как вода возвращается в подводящие трубопроводы в нижней части каналов. В барабаны-сепараторы подается свежая питательная вода.

Такая схема, типичная для ядерных установок с кипящим теплоносителем, называется одноконтурной. Подвод воды и отвод пароводяной смеси осуществляется в них отдельно для каждого канала, которые в РБМК-1000 сгруппированы в два независимых друг от друга контура, каждый из которых охватывает его половину.

Существенный момент: принципиальной особенностью канальной конструкции было отсутствие специального прочного корпуса, свойственного реакторам типа ВВЭР.

Серийное изготовление уникальных высокопрочных корпусов больших размеров сдерживалось в те годы отсутствием необходимых производственных мощностей. В этих условиях строительство канальных реакторов позволяло обеспечить быстрое развитие атомной энергетики, поскольку для их сооружения не требовались реакторные корпуса. Кроме того, такие энергоустановки давали возможность достижения большой единичной мощности одного блока - 1000, а затем и 1500 МВт. Последнее обстоятельство важно, так как

максимальная мощность реакторов типа ВВЭР определялась в первую очередь именно размерами корпуса, способного выдерживать большие давления и в то же время допускавшего его перевозку по железной дороге. Подготовленные к реализации в тот период проекты реакторов ВВЭР были ограничены мощностями энергоблоков 440 МВт (эл.), и только к 1980 г. эта величина была доведена до 1000 МВт (эл.).

В отличие от корпусных реакторов активная зона канального представляет собой набор идентичных элементов (каналов), увеличением количества которых может быть достигнута практически любая необходимая мощность. Такой принцип конструкции перспективен со многих точек зрения. Он обеспечивает возможность получения весьма значительных единичных мощностей и повышения параметров теплоносителя (а значит - КПД), большую маневренность в эксплуатации и, что очень важно, гибкий топливный цикл. Технологический канал - один из основных узлов, определяющих экономичность и надежность эксплуатации. Для уменьшения паразитного поглощения нейтронов в активной зоне средняя часть канала, размещаемая в графитовой кладке, изготовлена из сплава циркония.

Кроме того, на РБМК можно применять режим непрерывной поканальной перегрузки ядерного топлива на работающем реакторе, что позволяет достигать большей глубины выгорания топлива при низком его обогащении. Это происходит потому, что данный режим дает возможность уменьшить непроизводительный захват нейтронов; органах регулирования, избежав значительных изменений реактивности в процессе работы атомной установки. Достоинством канальных реакторов является также доступность их выпуска на общемашиностроительных заводах.

Предпосылки аварии

Проект 4-го блока ЧАЭС с РУ РБМК-1000 имел существенные отступления от норм и правил по безопасности в атомной энергетике, действовавших на момент согласования и утверждения технического проекта второй очереди станции.

Указанные недочеты его разработчиками не были обоснованы и согласованы в установленном порядке. Соответственно, не были предусмотрены организационные и технические мероприятия, компенсирующие эти недостатки. Проект не был приведен в соответствие с Общими положениями обеспечения безопасности АЭС (ОПБ-82), которые вступили в силу в 1982 г., то есть за два года до начала работы энергоустановки.

Однако эти проектные недоработки дали о себе знать задолго до аварии в Чернобыле - уже после пуска 1-го блока Ленинградской АЭС в декабре 1973 г., впоследствии явившись коренными причинами ряда аварий на атомных электростанциях.

30 ноября 1975 г. на 1-м блоке Ленинградской АЭС имело место первое серьезное ЧП на РБМК. При подъеме мощности после полной остановки (20% от номинальной, в условиях «отравленного» реактора) возник большой локальный перекося этого показателя в активной зоне с разрывом одного технологического канала. В ходе этой аварии впервые проявил себя в действии большой паровой коэффициент реактивности при локальном обезвоживании активной зоны. Возникновению чрезвычайной ситуации способствовали недостатки проекта в части организации контроля мощности установки. Вина за аварию была возложена на персонал; вместе с тем выводы, сделанные расследовавшей ее комиссией, однозначно свидетельствуют о понимании того, что случившееся - следствие принципиальных особенностей конструкции реактора, а не человеческого фактора;

9 сентября 1982 г. произошел серьезный инцидент с выбросом радиоактивности в окружающую среду на 1-м блоке Чернобыльской АЭС. Перво-причина - ошибочное действие оператора, выполнявшего поканальное регулирование расхода запорно-регулирующими клапанами (прикрытие клапана вместо его открытия). Расход теплоносителя в канале снизился, автоматическая аварийная защита не сработала, реактор был остановлен со значительным опозданием, результатом чего стали разрыв технологического канала

и разрушение топливной сборки с выбросом продуктов деления в окружающую среду [4]. Коренные причины, однако, крылись в незащищенности реакторной установки от ошибок персонала и недостаточном быстродействии аварийной защиты; **в марте 1992 г. на 3-м блоке Ленинградской АЭС случилась подобная авария с разрушением технологического канала.** В этом случае причиной стал отказ запорно-регулирующего клапана ТК, обусловленный его конструктивной недоработкой. Указанное происшествие стало причиной массовой замены ЗРК на всех блоках АЭС с реакторами РБМК, в том числе и на энергоблоках Чернобыльской АЭС.

В 1981 и 1983 гг. при физических пусках 3-го и 4-го блоков ЧАЭС и в 1985 г. - 1-го блока Игналинской АЭС с аппаратом РБМК-1500 вскрылись следующие недостатки его активных зон: малые запасы до границ устойчивости и кризиса теплоотдачи, недопустимо высокая температура топлива. При выполнении необходимых при физических пусках экспериментов на очень малом уровне мощности при погружении стержней СУЗ в активную зону обнаружилось неадекватное «поведение» реактивности. Так, на 4-м блоке ЧАЭС при таком пуске в ноябре 1983 г. результатом стала положительная реактивность вместо отрицательной в течение 5 с. В процессе функционирования атомных станций с РБМК многократно срабатывали сигналы аварийной защиты по мощности (АЗМ) и по скорости ее нарастания (АЗС). Это не только означает слабую эффективность данной системы, но и указывает на то, что при срабатывании аварийной защиты (АЗ) вводится как отрицательная, так и положительная реактивность (эффект вытеснителей). Комиссиями по физпуску для устранения этих негативных эффектов было намечено принятие определенных мер, но ни одна из них (включая ограничение на извлечение стержней РР до верхних концевиков, доработку последних, совершенствование конструкции стержней СУЗ с исключением нижнего водяного столба или внедрением пленочного охлаждения каналов) так и не была реализована на практике.

Хронология аварии

Уместно привести выдержку из книги непосредственного участника событий - заместителя главного инженера ЧАЭС Анатолия Степановича Дятлова [6].

«26 апреля 1986 г. в один час двадцать три минуты сорок секунд начальник смены блока №4 ЧАЭС Александр Акимов приказал заглушить реактор по окончании работ, проводимых перед остановом (прекращением работы - прим, ред.) энергоблока на запланированный ремонт. Команда отдана в спокойной рабочей обстановке, система централизованного контроля не фиксирует ни одного аварийного или предупредительного сигнала об отклонении параметров реактора или обслуживаемых систем. Оператор реактора Леонид Топтунов снял с кнопки АЗ колпачок, предохраняющий от случайного ошибочного нажатия, и нажал кнопку. По этому сигналу 187 стержней СУЗ реактора начали движение вниз, в активную зону. На мнемотабло загорелись лампочки подсветки, и пришли в движение стрелки указателей положения стержней. Александр Акимов, стоя вполборота к пульту управления реактором, наблюдал это, увидел также, что «зайчики» индикаторов разбаланса АР «метнулись влево» (его выражение), как это и должно быть, что означало снижение мощности реактора, повернулся к панели безопасности, за которой наблюдал по проводимому эксперименту.

Но дальше произошло то, чего не могла предсказать и самая безудержная фантазия. После небольшого снижения мощность реактора вдруг стала увеличиваться со все возрастающей скоростью, появились аварийные сигналы. Л. Топтунов крикнул об аварийном увеличении мощности. Но сделать что-либо было не в его силах. Все, что он мог, сделал - удерживал кнопку АЗ, стержни СУЗ шли в активную зону. Никаких других средств в его распоряжении нет. Да и у всех других тоже. А. Акимов резко крикнул: «Глуши реактор!». Подскочил к пульту и обесточил электромагнитные муфты приводов стержней СУЗ. Действие верное, но бесполезное. Ведь логика СУЗ, то есть все ее элементы логических схем, сработала правильно, стержни шли в зону.

Теперь ясно - после нажатия кнопки АЗ верных действий не было, средств спасения не было. Другая логика отказала!

С коротким промежутком последовало два мощных взрыва. Стержни АЗ прекратили движение, не пройдя и половины пути. Идти им было больше некуда.

В один час двадцать три минуты сорок семь секунд реактор разрушился в результате теплового взрыва, вызванного разгоном мощности на мгновенных нейтронах. Это крах, предельная катастрофа, которая может быть на энергетическом реакторе. Ее не осмысливали, к ней не готовились, никаких технических мероприятий по локализации на блоке и станции не предусмотрено. Нет и организационных мер».

Удивительно, как считанные секунды разделили не только судьбы непосредственных участников, но и историю всего человечества на два отрезка: до и после Чернобыля.

Следует отметить, что авария на ЧАЭС была связана с введением реактивности, а не с деградацией теплоотвода, как это было на американской Три-Майл-Айленд-2.

Таким образом, ночь на 26 апреля 1986 г. стала роковой, оставив после себя многочисленные последствия.

Эксперимент по повышению безопасности породил катастрофу

Не зря говорится, что благими намерениями вымощена дорога в ад. Ирония заключается в том, что самая страшная ядерная катастрофа в мире началась с эксперимента по повышению безопасности. Его целью было выяснить, как долго вращающаяся турбина сможет обеспечивать электроэнергией определенные системы. Это может показаться немного странным - остаться без электроэнергии на электростанции, но в случае аварии реактор немедленно останавливается и не может напрямую вырабатывать собственную энергию. Обычно он получает таковую от электросети станции или от других реакторов на той же площадке. Для обеспечения дополнительной защиты принято иметь в виду, что существует вероятность отказа и этих источников.

Обычно резервным вариантом является наличие дизельных двигателей на площадке для привода аварийных генераторов; 30 с, за которые они обычно запускаются, достаточно, чтобы поддерживать работу важных систем. В случае с Чернобыльской АЭС, посчитали советские власти, этого промежутка мало: здесь требовалось практически бесперебойное электроснабжение. Даже при остановке реактора вращающаяся турбина настолько тяжела, что ей необходимо некоторое время для замедления, поэтому было решено использовать ее энергию для выработки электричества в течение нескольких секунд до запуска дизельных двигателей. Эксперимент был направлен на то, чтобы выяснить, как долго эта электроэнергия будет питать основные насосы, которые обеспечивают циркуляцию охлаждающей воды.

Подобный опыт уже проводился на энергоблоке №3, и это не оказало существенного негативного воздействия на ядерную энергоустановку. Однако напряжение на электростанции упало слишком быстро, поэтому эксперимент планировалось повторить на энергоблоке №4 с улучшенным электрооборудованием. Идея заключалась в том, чтобы снизить мощность реактора до менее чем половины нормы, чтобы весь пар можно было направить в одну турбину; оставшуюся турбину затем следовало отключить, а ее энергию вращения использовать для работы основных насосов в течение короткого времени. Испытание было запланировано непосредственно перед остановкой реактора для планового технического обслуживания. Если его не удалось бы провести успешно на этот раз, то пришлось бы ждать еще год. Таким образом, персонал был настроен провести эксперимент во что бы то ни стало.

Авария на самом деле началась за 24 часа до известного всем ее апогея, поскольку допущенные тогда ошибки постепенно подготовили почву для сцены, завершившейся взрывом 26 апреля.

25 апреля реактор работал на полной мощности, в обычном режиме, пар подавался к обоим турбинам. Было дано разрешение начать ее снижение для

проведения испытаний, и это делалось постепенно; реактор достиг 50% мощности 12 часов спустя, в 13:05 дня. На этом этапе для забора пара из установки требовалась только одна из двух турбин, вторая была отключена.

Как правило, после этого испытания продолжают - следующим шагом было бы дальнейшее уменьшение мощности примерно до 30%. Однако ответственные за распределение электроэнергии в СССР отказались это разрешить, поскольку, по-видимому, была необходимость в энергии; по этой причине реактор оставался на 50% мощности в течение еще 9 часов.

В 23:10 25 апреля сотрудники Чернобыльской АЭС получили разрешение на продолжение снижения мощности. К сожалению, оператор допустил ошибку - забыл перезагрузить контроллер; в результате вместо поддержания на уровне около 30% мощность упала примерно до 1% - реактор был практически остановлен. Для проведения испытаний этого было недостаточно.

Во всех реакторах внезапное падение мощности приводит к быстрому накоплению в урановом топливе ксенона. Это радиоактивный газ, но, что более важно, он впитывает нейтроны, как губка, и способствует ускорению процесса полной остановки реактора. Кроме того, мощность активной зоны была настолько низкой, что вода в трубах высокого давления не кипела, как обычно, а находилась в жидком состоянии - а в нем она обладает таким же поглощающим эффектом, как и ксенон. Чтобы попытаться компенсировать эти два эффекта, оператор вытащил почти все регулирующие стержни и сумел с трудом восстановить мощность примерно до 7% - все еще значительно ниже уровня, на котором должен был проводиться опыт, но максимально возможный благодаря ксенону и воде.

Действительно, очень серьезный недостаток в конструкции этого типа реактора - возможность функционирования после извлечения всех регулирующих стержней. Некоторые из этих стержней используются для аварийной заглушки, и если их все вытащить значительно выше активной зоны, то им потребуется слишком много времени, чтобы в аварийной ситуации попасть в

высокопроизводительную часть реактора, то есть остановка работы будет очень медленной.

Тем не менее на момент аварии в активной зоне, вероятно, находилось всего от 6 до 8 стержней. Оператор с трудом достигал 7% мощности к 01:00 26 апреля, нарушая процедуру управления ими. У него были и другие проблемы, связанные с тем, что станция никогда не предназначалась для функционирования на такой низкой мощности. Пришлось взять на себя ручное управление потоком воды, возвращающейся из турбины, поскольку автоматические контроллеры плохо работали в такой ситуации. Это сложная задача для выполнения вручную, и ему так и не удалось добиться правильного потока. Реактор оказался настолько нестабилен, что был близок к остановке аварийными стержнями. Но поскольку это прервало бы испытание, оператор отключил ряд сигналов аварийной остановки.

Примерно через полчаса попыток стабилизировать ядерную установку, к 01:22 ночи, сотрудники станции решили, что им это удалось настолько, насколько это возможно, и решили начать испытание. Но сначала они деактивировали еще один сигнал автоматического отключения, и это предрешило исход событий. Обычно реактор автоматически прекращал работу, если отключалась оставшаяся турбина, как это должно было произойти во время эксперимента, но, поскольку персонал хотел иметь возможность повторить испытание они деактивировали и эту систему остановки. Оставшийся сигнал срабатывал при аномальных уровнях мощности, но не реагировал немедленно. Специалисты оказались в наихудшей из возможных ситуаций, когда повышение мощности не могло быть вовремя предотвращено аварийными устройствами. И именно это и произошло.

Начало испытания

В 01:23:04 турбина была отключена, и ее энергия была подана на 4 из 8 основных насосов. По мере замедления работы последних вода в активной зоне, теперь медленнее двигавшаяся над горячим топливом, начала кипеть. Через 20 секунд мощность стала медленно расти, затем быстрее, и в 01:23:40 оператор нажал

кнопку, чтобы задвинуть аварийные стержни и остановить реактор. Мы точно не знаем, почему он это сделал - этот человек был одним из первых пострадавших, но, вероятно, он увидел либо начало роста мощности, либо то, что регулирующие стержни начали двигаться слишком медленно, чтобы компенсировать этот скачок. Но было уже слишком поздно. Аварийные стержни находились так далеко от активной зоны, что только для начала остановки реактора потребовалось бы 6 секунд. На самом деле введение графитовой области регулирующих стержней в активную зону первоначально увеличивало реактивность, поскольку вытесняло воду в канале. В течение 4 с мощность рванула вверх - по некоторым оценкам, в 100 раз по сравнению с номинальной, - что спровоцировало повреждение ядерной установки. Степень разрушения всего реактора с выбросом радиоактивных веществ в окружающую среду усугубилась общим недостатком в конструкции: с большим увеличением мощности разрушилась оболочка ТВЭЛов, топливо смешалось с водой с очень быстрым (взрывным) образованием пара, сокрушившего ряд технологических каналов, что, в свою очередь, подняло бетонную крышку, приведя в негодность все остальные. Создаваемого давления и энергии было достаточно, чтобы сбросить бетонное покрытие, превратить в руины энергоблок и образовать облако пара и продуктов деления, которое поднялось на высоту, достаточную для переноса ветром радиоактивных продуктов на большие расстояния. Характер осадения определялся погодными условиями над соседними странами: большая его часть произошла на территории Украины, Беларуси и России; однако радиоактивные частицы были обнаружены не только во многих соседних европейских странах, но даже в находящихся за десятки тысяч километров от Чернобыля, например в Японии.

Сильное загрязнение почвенного покрова, которое сохраняется до сих пор, произошло на территории Украины и Беларуси.

Авария была завершена путем засыпки активной зоны почти 5 тыс. т песка, глины и борсодержащего материала с

помощью вертолетов. Неясно, было ли это оптимальным решением, поскольку графит действовал как теплозащитный экран: внутри он горел не менее 7 дней, в течение которых расплавились все оставшиеся топливные сборки, высвобождая в окружающую среду летучие продукты расщепления; их жидкие остатки распространились по пространству под реактором и стекали в подвал. Вода в бассейне была слита, чтобы предотвратить взрыв пара, ценой жизни двух добровольцев из числа персонала АЭС. На разрушенном реакторе в срочном порядке (в спешке) был построен саркофаг.

В соответствии с первой официальной версией, «первопричиной аварии явилось крайне маловероятное сочетание нарушений порядка и режима эксплуатации, допущенных персоналом энергоблока. Катастрофические размеры авария приобрела в связи с тем, что реактор был приведен персоналом в такое нерегламентное состояние, в котором существенно усилилось влияние положительного эффекта реактивности на рост мощности». Специалистам станции вменялся в вину ряд «наиболее опасных нарушений», вследствие чего реактор был «приведен в нерегламентное состояние». Вместе с тем в решении Научно-технического Совета Государственного комитета по надзору за безопасным ведением работ в атомной энергетике, промышленности и за ядерной и радиационной безопасностью (ГПАН) СССР от 15.02.1990 г. №8 по рассмотрению причин чернобыльской аварии сделан однозначный вывод о том, что «инкриминированные персоналу нарушения не являлись причиной аварии, не влияли на ход ее развития и масштабы последствий». Сотрудники АЭС действовали в соответствии с эксплуатационной документацией, так или иначе санкционировавшей эти действия. Отклонения параметров реактора от регламентных значений, которые могли происходить при этом, невозможно было своевременно отслеживать в силу недостатков системы контроля реактора. В распоряжении работников не было ни одного параметра, по значению которого они могли бы сделать вывод о том, что реакторная установка пребывает в

нерегламентном состоянии: «И проект, и технологический регламент допускали режимы, подобные тому, который имел место 26 апреля 1986 г. на 4-м блоке Чернобыльской АЭС, и реализоваться они могли без какого-либо вмешательства персонала».

Среди причин аварии также назывались следующие:

- *принципиально неверная конструкция стержней СУЗ;*
- *положительные паровой и быстрый мощный коэффициенты реактивности;*
- *большой расход теплоносителя при малом расходе питательной воды;*
- *нарушение персоналом регламентного оперативного запаса реактивности, малый уровень мощности;*
- *недостаточность в проекте средств защиты и оперативной информации для персонала;*
- *отсутствие указаний в проекте и технологическом регламенте об опасности нарушения оперативного запаса реактивности [8].*

Чем бы непосредственно ни был вызван неконтролируемый рост мощности и последовавший взрыв 4-го энергоблока Чернобыльской АЭС, обобщающей причиной представляется выход за пределы безопасной эксплуатации, обусловленный недостатками как проекта, так и технологических регламентов работы.

Это подтверждается мерами, принятыми для недопущения в будущем подобных аварий.

Первый перечень организационных мероприятий, обязательных для выполнения на действующих АЭС с реакторами РБМК, включал в себя:

- *запрещение проведения каких-либо экспериментов, отключения аварийных защит реактора, установки каких-либо непроектных органов управления реакторным оборудованием;*
- *строгое выполнение регламентных ограничений по оперативному запасу реактивности, выдерживания соотношения расхода теплоносителя и питательной воды;*
- *установление новых ограничений по времени простоя реактора после его заглушения до нового пуска;*

• *обязательное согласование с разработчиками проекта любых возможных отклонений от регламентных ограничений.*

Также были разработаны меры по повышению безопасности установок РБМК, которые предусматривали работы по следующим направлениям:

- *снижение парового эффекта реактивности;*
- *повышение эффективности исполнительных органов СУЗ;*
- *контроль металла;*
- *наращивание пропускной способности паросбросов;*
- *совершенствование эксплуатационной документации.*

Катастрофа на ЧАЭС стала самым серьезным ударом по атомной энергетике. Доверие общественности к ней, и без того подорванное аварией на Три-Майл-Айленд, существенно упало. Это падение усугубили действия многочисленных так называемых ученых, которые значительно преувеличивали долгосрочные последствия радиации для здоровья и генетики.

События в Чернобыле нанесли огромный экономический, социальный, психологический и политический ущерб Советскому Союзу и атомным державам по всему миру, приведя к прекращению - где на долгие годы, а где и навсегда - работы многих программ в данной отрасли.

Алексей ЛУКАШЕВИЧ