

Проблемы безопасности атомных электростанций *

В. А. СИДОРЕНКО

УДК 621.039.51

Среди основных вопросов, обсуждавшихся на IV Женевской конференции, были проблемы обеспечения безопасности АЭС.

Из 505 докладов, представленных на конференцию, различным аспектам проблемы безопасности АЭС было посвящено 78 докладов. Эти доклады по тематике можно условно разделить на пять групп:

1. Обсуждение научных и технических проблем, включая обсуждение принципиальных путей подхода к обеспечению безопасности АЭС (так называемая «философия безопасности»), — 24 доклада.

2. Обсуждение законодательства по вопросам безопасности, а также норм, стандартов, юридических вопросов разделения ответственности и т. п. — 9 докладов.

3. Воздействие ядерной энергетики на окружающую среду, включая обсуждение реальных условий вокруг АЭС, — 23 доклада.

4. Научно-технические проблемы, связанные с удалением радиоактивных отходов и их долговременным захоронением, — 8 докладов.

5. Вопросы воздействия излучения на организм, радиационной безопасности, защиты от излучения — 14 докладов.

Был проявлен примерно равный интерес к двум сторонам проблемы безопасности: воздействию на окружающую среду и обращение с отходами ядерной энергетики (3-я и 4-я группы — 31 доклад) и научно-технические основы безопасности АЭС и нормирование способов ее обеспечения (1-я и 2-я группы — 33 доклада).

Материалы, представленные на конференцию, отражают значительные успехи в области обеспечения безопасности АЭС: улучшилось понимание проблемы, совершенствуются технические и организационные меры обеспечения бе-

зопасности, закладываются надежные основы безопасности с учетом ожидаемого расширения масштабов ядерной энергетики в будущем.

Перспектива расширения ядерной энергетики привлекла внимание к вопросам воздействия на окружающую среду как самой энергетики, так и конкретных АЭС, эксплуатация которых доказывает достаточность применяемых мер безопасности. Первый вывод, который можно сделать в связи с этим, состоит в том, что уровень радиоактивности вокруг АЭС и установок по переработке топлива очень низок, а величина выбросов радиоактивных отходов значительно меньше предельных значений, устанавливаемых для каждой атомной установки национальными контрольными и законодательными органами. Детальные сведения по воздействию атомных установок на окружающую среду содержатся в американском докладе 087**, английском — 512, ФРГ — 399 и др. Например, годовые отходы радиоактивных веществ в 1970 г. на коммерческих АЭС США составили в жидких сбросах 0,14—25%, а в газовых сбросах 0,002—6,5% разрешенного уровня (доклад 087). Уже сейчас можно спроектировать ядерный реактор с любым желаемым низким уровнем выхода радиоактивных продуктов. Английский опыт показывает, что в настоящее время наиболее существенные радиоактивные отходы возникают на установках по переработке топлива. Во многих странах предпринимаются специальные исследования для уменьшения радиоактивных сбросов на будущих больших заводах по переработке топлива.

На основании прогноза возможных путей поступления радиоактивных продуктов от АЭС в окружающую среду и сравнения ядерной энергетики, как возможного источника загряз-

* Обзор докладов IV Международной конференции по мирному использованию атомной энергии. Женева, 1971.

** Списки женевских докладов опубликованы в октябрьских номерах журналов «Атомная энергия» (советские доклады) и «Атомная техника за рубежом» (иностраные доклады) за 1971 г.

нения окружающей среды, с энергетикой на органическом топливе в советском докладе 684 делается вывод о том, что развитие ядерной энергетики обеспечивает сохранение достаточной чистоты внешней среды; более того, замена энергии, вырабатываемой на обычном топливе, атомной энергией приведет к значительному уменьшению загрязнения внешней среды токсичными веществами и оздоровлению среды обитания.

Наряду с оптимистическими картинами сегодняшнего состояния и прогнозами анализ докладов выявляет четкую тенденцию усиления требований к безопасности АЭС как по отношению к «фактической» радиационной опасности АЭС (значительное уменьшение разрешенных сбросов радиоактивных веществ), так и по отношению к «потенциальной» опасности (усиление требований к надежности защитных устройств и устройств, локализующих радиоактивность в случае возможных аварий). Эта тенденция обусловлена увеличением числа АЭС и приближением их к крупным населенным пунктам с большой плотностью населения.

Усовершенствование систем безопасности, в том числе локализующих устройств (контейнментов), идет по пути повышения их эффективности, создания большей компактности и удешевления. Эта сторона проблемы стала довольно актуальной, поскольку наблюдавшееся в последние годы удорожание сооружения АЭС в значительной мере обязало оснащению станций дополнительными мерами безопасности, соответствующими более строгим требованиям.

Другая черта, характеризующая современные тенденции, связана с резким повышением роли качества оборудования как фундамента обеспечения фактической безопасности и снижения вероятности аварий. Этой стороне проблемы уделялось внимание и прежде, но сейчас вместе с другими мерами безопасности, которые можно назвать «наглядными», эти вопросы приобретают первостепенную роль. Самостоятельное значение имеет такое средство обеспечения качества, как контроль оборудования на всех этапах: от его изготовления до использования. Накопленный к настоящему времени опыт эксплуатации АЭС позволил улучшить методы контроля на действующем оборудовании и при периодическом осмотре в ходе эксплуатации (ультразвуковая дефектоскопия, контроль шумов и т. п.).

Как следует из докладов, в настоящее время большое значение придается направленному разрешению ключевых технологических про-

блем безопасности, выявляемых на основании изучения возможных путей опасного развития процессов на АЭС, прежде всего в аварийных условиях.

Рассмотренные основные тенденции проблемы безопасности АЭС обсуждаются в американских докладах (038, 040) как принципы «защиты в глубину», в соответствии с которыми могут быть сформулированы следующие этапы обеспечения безопасности АЭС: обеспечение качества исходного оборудования; технологическая и схемная невозможность опасных последствий какого-либо единичного нарушения или повреждения; ограничение последствий возможных аварийных случаев.

Во многих докладах подчеркивается, что проблемы обеспечения безопасности АЭС сложны и многосторонни и не могут иметь единственного всеобъемлющего решения. Нельзя надеяться, в частности, обеспечить безопасность только достижением высокого качества оборудования (лучшим, чем в обычной теплоэнергетике) или только проведением мер по локализации последствий возможных аварий (таких, как заключение АЭС в оболочки — контейнменты). Необходимо уделять внимание всем сторонам этой сложной проблемы.

Выполнение принципа защиты в глубину можно проследить при разных подходах к обеспечению безопасности АЭС.

При одном из возможных подходов все системы и оборудование АЭС подразделяются на три функциональные части: собственно реактор, оборудование и системы, обеспечивающие его нормальное функционирование; «внешние» системы защиты, предназначенные для уменьшения возможности опасного отклонения параметров установки от проектных значений и предохранения установки от повреждения в случае нарушения устройств нормальной эксплуатации; системы, уменьшающие последствия любых аварий, которые могут произойти. Безопасность АЭС обеспечивается независимостью и надежностью каждой из трех ее функциональных частей.

При другом подходе защита в глубину проявляется при обеспечении надежности и независимости различных «барьеров» на пути возможного поступления осколков деления от топлива к населению: из топлива в теплоноситель, из теплоносителя в помещения АЭС, из помещений АЭС на окружающую местность и, наконец, различными путями к человеку.

Заслуживает внимания развитие в некоторых странах концепций и критериев безопасности.

В течение последних лет неоднократно отмечалась необходимость количественного и вероятностного подхода к оценке и нормированию безопасности, но при этом отмечалась также недостаточность статистических данных о работе оборудования АЭС. Во французском докладе 579 обращено внимание на дороговизну внедрения в практику подобного подхода и на важность международной кооперации для успешного решения этой проблемы. Конференция показала, что необходимость количественного подхода к оценке и анализу безопасности сейчас общепризнана, но в то же время преобладает сдержанное отношение к возможности вероятностного подхода к нормированию безопасности АЭС. Количественные методы оценки надежности оборудования и вероятности аварий развиваются и должны широко внедряться в практику проектирования АЭС. Эти методы позволяют сравнивать разные пути, надежнее выбирать оптимальные решения при разработке оборудования и систем безопасности. Однако в ближайшее время, по-видимому, не будет достаточных оснований для количественного подхода к нормированию безопасности АЭС. В докладе ФРГ 364 обращается внимание на то, что для очень серьезных аварий, вероятность которых оценивается величиной порядка 10^{-7} 1/год, атомные установки всего мира не могут дать необходимых статистических данных на протяжении человеческой жизни; для таких аварий количественный подход становится бессмысленным.

Наиболее часто используемой концепцией обеспечения безопасности остается концепция «основной проектной аварии». Совершенствование этой концепции проявляется частично в том, что при выборе основной проектной аварии делаются попытки использовать вероятностный аппарат. Наиболее существенное усовершенствование подхода, проявившееся в последние годы, состоит в том, что при создании АЭС рассматривается не только «максимально возможная авария», но и полный спектр возможных аварий, в том числе и основная авария. Это делается для обеспечения станции мерами защиты не только от потенциальной опасности, которую представляют большие и маловероятные аварии, но и от реальной опасности, которую несут значительно более вероятные повреждения оборудования. Эффективным методическим средством анализа спектра аварийных ситуаций является анализ «древа повреждений». По этому методу выявляются все случаи, которые могут быть вызваны каждым конкрет-

ным отказом или повреждением. Древо повреждений позволяет продемонстрировать и количественно оценить комбинации опасных повреждений, могущих привести к аварии.

Применительно к водяным реакторам основной проектной аварией остается полный разрыв максимального трубопровода циркуляционного контура. Изучается возможность разрыва корпуса реактора. В некоторых проектах (например, в ФРГ) даже рассматривается возможность аварий с повреждением корпуса. При этом считают, что наиболее вероятным местом возможного повреждения корпуса является зона патрубков подсоединения циркуляционных петель. Изучение возможного развития трещин в корпусе дает основания учитывать в проекте лишь такие дефекты в других частях корпуса, которые приводят к течам, существенно меньшим по размерам, чем течи при разрыве максимального трубопровода (доклад ФРГ 364).

Разновидность концепции основной проектной аварии изложена в канадском докладе 150. Оценка безопасности АЭС делается с применением количественного анализа частоты возможных опасных процессов в системе, однако использование тех или иных предельных доз облучения населения основывается на двух основных схемах развития аварий: единичное повреждение в нормальном технологическом оборудовании при сохранении работоспособности аварийных и локализирующих устройств или совпадение повреждений в независимых системах нормальной эксплуатации и в аварийных защитных системах. В первом случае предельными считаются дозы, допускаемые при нормальной эксплуатации; во втором случае в качестве предельных принимаются специальные аварийные дозы.

Накопленный к настоящему времени опыт проектирования и эксплуатации АЭС позволил отработать многие конкретные решения по различным системам обеспечения безопасности (доклад США 040). Например, разработаны методы и приемы создания оборудования и сооружений, стойких к землетрясениям (японский доклад 226, швейцарский 672), ураганам, противостоящим наводнениям и другим стихийным бедствиям. Имеется опыт сооружения АЭС вблизи аэропорта, где есть опасность удара или пожара в связи с аварией самолета. Разработаны приборы и программа контроля за распространением радиоактивности на окружающей АЭС местности.

В конструкции водяных реакторов разработаны и внедрены устройства для контроля

и подавления возможных эффектов, связанных с ксеноновыми колебаниями мощности (например, поглощающие стержни постоянной длины); используются неподвижные временные поглотители для уничтожения положительного температурного коэффициента реактивности замедлителя. Внедрены в практику широкие программы исследования вибрации внутрикорпусных устройств при пусковых испытаниях для выявления и устранения слабых узлов. Конкретные решения, направленные на повышение надежности конструкции, обеспечение постоянного или периодического контроля и работоспособности в аварийных условиях, внедрены в системы охлаждения реакторов, строительные конструкции и контейменты, технические системы безопасности, контрольно-измерительные и другие системы.

Среди проблем, требующих дальнейшего изучения, называются следующие:

- развитие дефектов в стальных конструкциях контуров циркуляции;
 - тепловое взаимодействие топлива и теплоносителя, в частности кризис теплообмена (английский доклад 477);
 - охрупчивание сталей на толстых образцах (в том числе в связи с проблемой теплового удара при использовании систем аварийного охлаждения активной зоны);
 - работоспособность аварийных систем в аварийных условиях;
 - предельные параметры и мощности (эту проблему можно считать «вечной»);
 - вероятности природных явлений, учитываемых при проектировании АЭС;
 - повышение эффективности аварийных систем охлаждения активной зоны (доклады США 040, 039);
 - условия теплоотвода во время и после аварий с потерей теплоносителя;
 - гидродинамические явления в реакторном корпусе и охлаждающем контуре при больших течах;
 - совершенствование методов дистанционного контроля состояния оборудования при эксплуатации, улучшение ультразвуковых методов;
 - расплавление активной зоны (доклады ФРГ 365, 364).
- Специальное внимание было уделено безопасности реакторов на быстрых нейтронах. Для быстрых реакторов с натриевым охлаждением характерными опасными событиями, при которых единичное повреждение или нарушение может привести к существенным последствиям,

обычно считаются повреждения первичного контура, загорание натрия, цепное повреждение топливных элементов, прохождение больших газовых пузырей через зону и т. д. В соответствии с этим при изучении развития различных проектных аварий (быстрое введение реактивности, прекращение циркуляции теплоносителя и пр.) и, следовательно, при разработке средств защиты от последствий таких явлений, как пустотообразование в натрии, взаимодействие теплоносителя с расплавленным топливом, механизм распространения повреждений твэлов на другие, доплер-эффект, образование и распространение аэрозолей в связи с горением натрия (доклад США 041).

В заключение следует еще раз подчеркнуть общепризнанное значение создания системы норм и правил для всех стадий проектирования, изготовления оборудования, строительства, эксплуатации и ремонта АЭС. Создание и совершенствование системы норм и правил является непрерывным процессом. По опыту США (доклад 043) помимо той работы, которая ведется КАЭ по разработке общих правил, критериев, требований, процедур и т. п. с участием 1200 представителей от 400 организаций, создается система из 78 наиболее необходимых ядерных стандартов. Заканчивается разработка первых десяти стандартов, к которым относятся:

- дополнительные критерии для реакторов с водой под давлением;
- дополнительные критерии для кипящих водяных реакторов;
- критерии учета сейсмичности при размещении и проектировании;
- квалификация и обучение эксплуатационного персонала АЭС;
- требования к периодическим испытаниям АЭС;
- требования к предпусковым и пусковым испытаниям АЭС;
- критерии и практика по обеспечению качества на АЭС и пр.

В следующем десятилетии должны быть разработаны 1500 ядерных стандартов. Опыт показывает, что АЭС могут быть созданы и создаются надежными и безопасными. Разработка и внедрение в практику системы норм и правил позволяют зафиксировать достигнутый уровень технологии и с успехом воспроизвести его на других образцах.