

УДК 621.039

**АНАЛИЗ ПОДХОДОВ ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ БЕЗОПАСНОСТИ
АКТИВНОЙ ЗОНЫ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА**

**ANALYSIS OF APPROACHES TO ENSURE THE SAFETY OF THE CORE OF A
NUCLEAR REACTOR**

Р.В. Адамчук, И.С. Евсиевич

Научные руководители – А.Л. Буров, старший преподаватель,

А.А. Павловская, старший преподаватель

Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Республика Беларусь

burov@bntu.by, a.pawlowskaya@bntu.by

R. Adamchuk, I. Evsievich

Supervisors – A. Burov, Senior Lecturer, N. Paulouskaya, Senior Lecturer

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

***Аннотация:** В данной статье рассмотрены проблемы безопасности на АЭС мира и связанные с ними аварии, системы безопасности ядерных реакторов на АЭС.*

***Abstract:** This article deals with the safety problems at nuclear power plants in the world and related accidents, as well as the safety systems of nuclear reactors at nuclear power plants.*

***Ключевые слова:** безопасность, реактор, авария, последствия, энергоблок.*

***Keywords:** safety, reactor, accident, consequences, power unit.*

Введение

В начале 1970-х годов были сделаны некоторые допущения о возможных аварийных последовательностях. Это породило жанр драматической фантастики (например, Китайский синдром) в общественном сознании, а также консервативный подход в проектировании, включая структуры контроля в самой отрасли. Также были оформлены правила лицензирования ядерных объектов как на стадии проектирования, так и на стадиях ввода в эксплуатацию, эксплуатации и вывода из эксплуатации.

Только в конце 1970-х годов подробные анализы и крупномасштабное тестирование, последовавшие за расплавлением активной зоны на энергоблоке АЭС Три Майл-Айленд, показали, что худшая авария на атомной электростанции или случаи с ядерным топливом не могут нести серьезный вред для населения. Промышленность, исследовательские организации и контролирующие органы по-прежнему работают, чтобы свести к минимуму вероятность аварии с расплавлением активной зоны, но теперь ясно, что не нужно бояться возможного нанесения вреда здоровью населения только потому, что произошло расплавление активной зоны реактора на АЭС. Авария на АЭС Фукусима показала, что в результате расплавления топлива на трех энергоблоках никогда не было смертельных исходов и никто не получил серьезного облучения, в то время как более двухсот человек продолжали работать, чтобы уменьшить и ликвидировать последствий аварии [3].

Основная часть

Испытания и анализы, проходящие десятилетиям дали понять, что выбросы радиоактивности при плавлении топлива меньше, чем предполагалось изначально, и что большая часть выброшенных радиоактивных материалов остаётся внутри сооружений АЭС. Таким образом, даже если гермооболочка, окружающая все радиоактивное оборудование современных атомных электростанций, будет разрушен, как это было, по крайней мере, на одном из энергоблоков АЭС Фукусима, то он по-прежнему остается эффективным при предотвращении утечки большей дозы радиоактивности в окружающую среду.

Даже спустя несколько месяцев после аварии в Три Майл-Айленд (ТМІ) в 1979 году предполагалось, что плавления активной зоны не было, так как не было никаких признаков серьезного радиоактивного выброса даже внутри гермооболочки. Оказалось, что на самом деле около половины активной зоны было расплавлено. До 2011 года это оставалось единственным случаем плавления активной зоны в водо-водяных реакторах, соответствующем критериям безопасности NRC, и последствия аварии сохранялись в том виде, в каком они были законсервированы после аварии, без радиационного ущерба для населения и персонала АЭС.

В Фукусиме в 2011 году (конструкция реактора отличалась от АЭС Три Майл Айленд, и представляла собой водо-водяной реактор кипящего типа BWR) активные зоны трех ядерных реакторов, по-видимому, в значительной степени расплавились в первые два-три дня, но на подтверждение этого потребовалось около десяти недель. На данный момент неизвестно, какая доля активных зон расплавилась и находится на дне корпуса ядерного реактора, хотя, несомненно, в начале аварии был значительный выброс радионуклидов в атмосферу, а затем в охлаждающую воду.

После Чернобыльской катастрофы произошло около десяти инцидентов с плавлением активной зоны или ядерного топлива – большем случае в военных или экспериментальных реакторах. Ни одна из них не приводила к какой-либо опасности за границами предприятия, хотя в одном случае произошёл значительный выброс излучения из-за горения топлива в горячем графите (так же как и в Чернобыле, но в меньшем масштабе). В данном контексте следует учитывать аварию в Фукусиме, так как топливо сильно повреждено, и произошли значительные выбросы радиации за пределами площадки.

Новые международные стандарты и нормы, введенные для АЭС, требуют, чтобы последствия аварий, связанных с плавлением активной зоны реактора ограничили территорией, данной АЭС.

Основная проблема безопасности – выброс радиоактивного материала, который невозможно контролировать, это привести к определенным последствиям, например, загрязнению и дальнейшему радиационному воздействию за пределами АЭС. Ранние предположения заключались в том, что это было бы вероятным в случае крупной потери аварии охлаждения (ЛОСА), в результате которой плавится активная зона реактора. Опыт аварии на ТМІ доказывает другое, при аварии на АЭС Фукусима был реализован именно этот

сценарий. Разумеется, этот вопрос был серьезно рассмотрен на примере трех реакторов атомной электростанции Fukushima Daiichi в Японии в марте 2011 года. Охлаждение было потеряно практически через час после остановки, и не было возможности на быстрое его восстановление, чтобы предотвратить серьезное повреждение топлива. Реакторы, созданные в 1971-75 годах, были выведены из эксплуатации. Четвертый энергоблок, топливо из которого было выгружено в бассейн выдержки ядерного топлива, также был выведен из эксплуатации из-за повреждения зданий и сооружений от взрыва водорода.

Основополагающим принципом работы АЭС во всем мире является то, что оператор несет ответственность за его безопасную эксплуатацию. Национальный регулирующий орган не несет непосредственную ответственность за обеспечение безопасной эксплуатации АЭС, а обеспечивает надзорные функции. Вторая важная задача национального регулирующего органа заключается в защите людей и окружающей среды.

Проектная сертификация реакторов также является обязанностью национальных регуляторов. Между ними существует международное сотрудничество в разной степени, и существует ряд наборов кодов и стандартов, связанных с качеством и безопасностью.

С созданием новых реакторных установок на международной основе с 1990-х годов как промышленность, так и регулирующие органы стремятся к большей стандартизации проектирования, а также к гармонизации регулирования.

Уже давно доказано, что аварии на ядерных реакторах маловероятны, но стоимость ликвидации данных последствий очень большая. Многие люди считают такие риски нецелесообразными. Но, учитывая физику и химию ядра, а так же современное оборудование реакторов, можно сделать вывод, что последствия аварии будут менее серьезными, по сравнению с авариями на других объектах.

Отмечается: «Авиационная промышленность, медицинская промышленность, коммерческая атомная энергетика, ВМС США, Министерство энергетики и его подрядчики и другие высокоэффективные, технологически сложные организации приняли принципы работы человека, концепций и практик, чтобы сознательно уменьшить человеческие ошибки и усилить контроль, чтобы уменьшить несчастные случаи и события». «Около 80 процентов всех событий связано с человеческими ошибками. В некоторых отраслях это число приближается к 90 процентам [2]. Примерно 20 процентов событий связаны с отказами оборудования. Если 80 процентов человеческих ошибок рассмотреть подробнее, то видно, что большинство ошибок, связанных с аварийными событиями, вытекают из скрытых организационных просчетов (совершенными людьми в прошлом, но не учтенными в регламенте эксплуатации), тогда как только около 30 процентов вызваны действиями отдельных работников с оборудованием и системами непосредственно на объекте эксплуатации. Очевидно, что сосредоточение усилий на сокращении человеческих ошибок уменьшит вероятность аварийных событий». После аварии на АЭС Фукусима основное внимание регулирующих органов и

эксплуатирующих организаций в мире было направлено на устранение организационных недостатков, которые увеличивают вероятность ошибки эксплуатирующего персонала.

Чтобы обеспечить безопасность АЭС мира используется подход «защита в глубину» с несколькими системами безопасности, которые дополняют природные особенности активной зоны реактора. Ключевыми аспектами такого подхода:

- проектирование и строительство высокого качества;
- использование оборудования, предотвращающего возникновение проблем, связанных с эксплуатационными нарушениями или человеческим фактором;
- мониторинг и постоянное тестирование для обнаружения неисправностей оборудования или недочетов в подготовке оператора;
- избыточные и разнообразные системы для контроля повреждения топлива и предотвращения значительных радиоактивных выбросов;
- обеспечение ограничения последствий серьезного повреждения топлива.

Все эти принципы можно соединить: «Предотвращение, мониторинг и действия» (для смягчения последствий отказов).

Положения безопасности включают ряд барьеров между активной зоной ядерного реактора и окружающей средой, имеют несколько систем безопасности, каждая из которых включает в себя резервирование и предназначена для исключения ошибок оператора и неисправности оборудования самой системы. На системы безопасности затрачивается четверть капитальных затрат современных реакторов.

В качестве барьеров безопасности реакторной установки используется топливо в форме твердых керамических (UO_2) таблеток, продукты радиоактивного деления остаются внутри этих таблеток. Урановые таблетки упаковывают в герметичные трубки из циркониевого сплава для образования топливных стержней. Они заключены внутри корпуса реактора под давлением со стенками толщиной до 30 см. Также имеются связанные с ним трубопроводы для первичного водяного охлаждения. Все это, заключено внутри прочной железобетонной защитной конструкции со стенками толщиной не менее метра. Это три барьера вокруг топлива, которые сами по себе стабильны до очень высоких температур.

Контроль над барьерами производится на постоянной основе, параллельно осуществляя контроль над топливной оболочкой при помощи количественного измерения радиоактивности в охлаждающей воде, а также над системой охлаждения при помощи скорости утечки воды из I контура и давлением внутри герметичной оболочки.

В современных ядерных реакторах имеются три основные функции безопасности:

- контроль реактивности;
- охлаждение топлива;
- сдерживание радиоактивных веществ.

Безопасность ядерных реакторов прямо пропорциональна их физическим свойствам, а именно отрицательному температурному коэффициенту (ОТК) реактивности и отрицательному пустотному коэффициенту (ОПК) реактивности. ОТК предназначен для контроля уровней мощности в новых конструкциях ядерных реакторов. Его физическое значение в обратной пропорциональности увеличения температуры за пределами оптимального уровня к реактивности. ОПК же имеет значение прямой зависимости образований в охлаждающей воде вроде пара и уменьшения эффекта замедления, и, как следствие, уменьшению количества делящихся нейтронов и гашению реакции.

Для удаления избыточного тепла и сдерживания продуктов радиоактивного деления в границах I контура используется резервная система охлаждения активной зоны (ECCS).

Системы безопасности реактора делятся на активные и пассивные. Инженерная система называется активной, если она подачи электрической или механической энергии для выполнения этими системами функций безопасности, пассивной – при автоматическом срабатывании системы, к примеру, предохранительные клапанов. Оба типа систем безопасности требуют резервирования.

Проектирование и оснащение реактора, его систем безопасности зависит только от физических явлений, а именно:

- конвекция;
- гравитация;
- устойчивость к высоким температурам.

АЭС проектируются с дополнительной системой безопасности, основывающейся на полной остановке станции в случае землетрясения. В новых конструкциях практикуется замена пассивных систем и присущих им функций на активные. В основе такого проекта лежит плавление активной зоны вкпе с выбросом радиации в атмосферу в случае чрезвычайных ситуаций.

Заключение

Атомная электрическая станция – объект повышенной опасности, основной упор при строительстве АЭС идет на безопасное использование. Все АЭС оборудованы многими современными системами безопасности, поэтому шанс аварии очень мал, но в случае аварии эти системы позволяют минимизировать последствия.

Литература

1. Samuel J. Walker. Three Mile Island: A Nuclear Crisis in Historical Perspective : [англ.]. – Berkeley : University of California Press, 2004. – 317 p. – ISBN 0-520-23940-7.
2. Авария на АЭС «Фукусима-дайити». Доклад Генерального директора МАГАТЭ Юкия Аmano. Издание GC(59)/14, Вена, Австрия, 2015. – 278 с.
3. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии "Общие положения обеспечения безопасности атомных станций" (НП-001-15). Зарегистрировано в Минюсте России 2 февраля 2016 г. N 40939.