

В. И. Скалозубов¹, Ю. Л. Коврижкин¹,
В. Н. Колыханов¹, Г. Г. Габлая²

¹ Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины

² Одесский национальный политехнический университет

Основные положения методического обеспечения моделирования тяжелых аварий на АЭС с ВВЭР

На основе современных представлений и исследований сформулированы основные положения методического обеспечения при моделировании и анализе тяжелых аварий на АЭС с ВВЭР.

Ключевые слова: аварийные последовательности (АП), исходные события аварий (ИСА), запроектные аварии (ЗА), тяжелые аварии (ТА), водо-водяной энергетический реактор (ВВЭР).

В. И. Скалозубов, Ю. Л. Коврижкин, В. М. Колиханов, Г. Г. Габлая

Основні положення методичного забезпечення моделювання важких аварій на АЕС із ВВЕР

На основі сучасних подань і досліджень сформульовано основні положення методичного забезпечення при моделюванні й аналізі важких аварій на АЕС із ВВЕР.

Ключові слова: аварійні послідовності (АП), вихідні події аварій (ВПА), запроектні аварії (ЗА), важкі аварії (ВА), водо-водяной энергетический реактор (ВВЕР).

Возникновение тяжелых аварий с повреждением топлива (топливных конструкций) корпусных реакторов является следствием развития запроектных аварий в случае нарушения установленных критериев повреждения топлива (топливных конструкций). Исходными событиями запроектных аварий (ИСА), которые приводят к возникновению тяжелых аварий, могут быть:

отказы и нарушения работоспособности систем, важных для безопасности (течи оборудования и трубопроводов, обесточивание энергоблока, ложное срабатывание предохранительных клапанов и т. п.);

внешние и внутренние экстремальные события (землетрясение, пожары, ударные воздействия, затопления и т. п.).

Развитие и многообразие аварийных последовательностей запроектных аварий (АПЗА), приводящих к возникновению тяжелых аварий, определяется в общем случае:

- 1) группой ИСА;
- 2) надежностью и работоспособностью систем, обеспечивающих выполнение функций безопасности и управления авариями;
- 3) действиями персонала по управлению и ликвидации последствий аварий.

Конечные состояния АПЗА в случае нарушения критериев повреждения топлива являются исходными состояниями тяжелых аварий на *первой (внутрикорпусной) стадии развития* (ИСТА1). Идентификация групп ИСТА1 определяется:

предысторией развития аварийных последовательностей (АП), которые могли привести к повреждению активной зоны (в том числе состоянием систем, обеспечивающих управление авариями);

состоянием и условиями повреждения активной зоны реактора (вид, местоположение, объем, степень повреждения и другие характеристики поврежденной активной зоны).

Основные процессы на внутриреакторной стадии тяжелой аварии следующие.

Фаза 1. Нарушение геометрии твэлов в результате «распухания» ядерного топлива и окисления оболочек. Начало расплавления внутрикорпусных конструкций и регулирующих стержней (с ограничением их перемещения).

Фаза 2. Расплавление и перемещение вниз веществ с низкой точкой плавления. Взаимодействие различных металлов и оксидов урана приводит к формированию комплексных эвтектик с температурами текучести ниже, чем температура плавления исходных компонентов активной зоны. Постепенное плавление, перемещение под действием сил тяжести и повторное затвердевание обеспечивают передачу энергии в нижнюю часть корпуса реактора.

Фаза 3. Накопление на дне корпуса реактора фрагментированных частей и ранее расплавленных веществ. Термическое взаимодействие повторно разогревающихся обломков активной зоны и структур в нижней части корпуса в конечном итоге может привести к разрушению днища корпуса реактора.

Основные факторы, специфичные для начальных стадий в активной зоне реактора, — термохимическое взаимодействие водяного пара с цирконием, содержащимся в оболочках твэлов и, возможно, в других конструктивных элементах активной зоны; термомеханическое поведение оболочек твэлов, их деформация и частичное разрушение. На ранней стадии тяжелой аварии повышение температуры может вызвать повышение давления в газовом зазоре твэла

изначально находящегося там газа и накопленных газообразных продуктов деления до уровня, превышающего давление в канале теплоносителя, что приводит к снижению прочности оболочки. Вздутие и разрыв могут произойти главным образом в АП при низком давлении в I-м контуре типа больших течей из-за относительно высокого давления в газовом зазоре. Деформация вызывает перераспределение потока теплоносителя, в результате чего можно ожидать уменьшения окисления и, следовательно, образования водорода и изменения передачи тепла внутри активной зоны и к верхним структурам. Кроме того, непосредственно в твэле происходят изменения, связанные с тем, что разрыв делает возможным поступление пара в зазор, увеличивая поверхность оболочки, доступную для окисления. Формирование оксидных слоев на внутренней поверхности и расширение зазора могут замедлить химическую реакцию между топливом и оболочкой. Если достигнута температура плавления неокисленного циркалоя (2033 К), то возникает возможность перемещения низко-температурной смеси U-Zr-C и увеличение выхода продуктов деления из превращенного в жидкость топлива. Если на внешней поверхности оболочки сформировался достаточно толстый оксидный слой, то какое-либо перемещение расплавленного циркалоя исключено или ограничено внутри зазора между оболочкой и топливными таблетками из-за эффекта “тигля” (crucible), обусловленного высокой температурой плавления ZrO_2 . Оксидный слой остается на месте, пока не будет достигнута точка его плавления либо он не будет растворен расплавленным циркалоем или не разрушится механически.

Изменение температуры активной зоны на этапе разогрева вызывает ряд других разнообразных явлений, которые, в свою очередь, могут критическим образом влиять на дальнейшее плавление активной зоны [1]. Окисление паром материала оболочки из циркалоя становится существенным вкладчиком в повышение температуры. Существенная деформация оболочки возможна при разгерметизации I-го контура, что изменяет характеристики теплопередачи в сборке. Охрупчивание, вызванное значительным окислением, может завершиться локальным разрывом. При высоких температурах тепловые излучения также могут вносить существенный вклад и быть доминирующей составляющей. Процесс изменения тепловыделений связан с другими важными процессами, такими как окисление и выгорание топлива, которые влияют на выход продуктов деления.

При температурах выше 1300 К разогрев активной зоны обеспечивается также теплом, выделяющимся за счет существенного вклада экзотермической реакции окисления циркалоя паром, сопоставимого по величине с мощностью остаточных тепловыделений продуктов деления. При температурах более 1850 К наступает стадия изменения молекулярной структуры оксида, которая при более высоком проникновении кислорода приводит к большому, почти многократному увеличению скорости парациркониевой реакции.

Присутствие воды и (или) подача воды при срабатывании систем безопасности либо в результате действия оператора может также существенно влиять на развитие плавления активной зоны внутри корпуса реактора. Непосредственно выше фронта охлаждения образуется насыщенный пар. За счет отвода тепла водой и быстрого охлаждения происходит охрупчивание окисленных поверхностей оболочек. Тепловое напряжение может вы-

зывать растрескивание или фрагментацию охрупченных поверхностей оболочек и формирование новых открытых поверхностей металла. Это ведет к обширному окислению циркалоя паром с образованием локального плавления, последующим перемещением, повторным быстрым ростом температуры и резким увеличением образование водорода. Вследствие теплового удара (разрушение, обусловленное быстрым охлаждением) и увеличения слоя обломков возможно также разрушение части активной зоны

Выход продуктов деления (особенно летучих материалов) на этапе разогрева активной зоны зависит от таких факторов, как глубина выгорания топлива. Выход может также увеличиться из-за взрыва при повторном заливе, что сопровождается фрагментацией топлива и образованием микротрещин на межкристаллическом уровне.

Превращение топлива в жидкость (под действием расплавленного циркалоя) может иметь прямое влияние на скорость выхода оставшихся продуктов деления, так как жидкое состояние характеризуется намного более быстрыми процессами диффузии, чем в твердом состоянии. Аэрозоли могут выделяться при превращении в пар материалов с низкой температурой плавления, взаимодействующих с высокотемпературным керамическим расплавом.

Пароциркониевая реакция сопровождается в основном следующими эффектами: интенсивным выделением тепла при высоких температурах, выделением водорода, изменением физических свойств материала оболочки твэла, в частности снижением механической прочности из-за охрупчивания, повышением температуры плавления от 2170 (Zr) до 2900 К (ZrO_2). Выделение тепла при пароциркониевой реакции составляет 6,29 МДж/кг и при температуре более 1250 К становится доминирующим фактором, определяющим разогрев активной зоны. Только за счет тепла пароциркониевой реакции, без учета остаточного тепловыделения, температура твэла может намного превысить 3100 К.

Различные материалы компонентов активной зоны являются термодинамически нестабильными друг относительно друга. В результате этого и происходят химические взаимодействия, которые становятся существенными при температурах более 1300 К, что позволяет идентифицировать три основных температурных режима в отношении повреждения активной зоны [2].

В первом температурном режиме (1473–1673 К) на стадии разогрева наблюдается начальная деградация активной зоны реактора, затрагивающая регулирующие стержни из-за очень низкой температуры плавления сплава (приблизительно 1100 К). Любое повреждение оболочки регулирующего стержня из нержавеющей стали позволит расплаву вступить в химический контакт с топливными элементами. Локальный контакт нержавеющей стали и циркалоя, например из-за вздутия оболочки регулирующего стержня под внутренним давлением паров кадмия, приводит к химическому взаимодействию с ранее образовавшимся расплавом и при температуре около 1470 К инициирует распространение плавления в активной зоне.

Во втором температурном режиме (2033–2273 К) происходит плавление неокисленного циркалоя приблизительно при 2033 К. Если перемещение невозможно из-за достаточно толстого твердого оксидного слоя на внешней поверхности оболочки (точка плавления ZrO_2 — 2973 К), то расплавленный циркалоем химически растворяет часть твердых таблеток UO_2 и оксидный слой, образуя жидкую смесь U-Zr-O. Если оболочка из циркалоя полностью

окислена перед достижением этого температурного режима (как ожидается в переходных процессах разогрева активной зоны с малой скоростью — меньше чем 0,1 К/с), такое растворение не происходит. С точки зрения управления тяжелой аварией различное поведение материалов при малой скорости разогрева предоставляет больше времени для восстанавливающих действий.

В третьем температурном режиме (между 2873 и 3123 К) оставшиеся материалы UO_2 , ZrO_2 и раствор $(U, Zr)O_2$ начнут плавиться. Это будет, в конечном счете, вести к полному расплавлению всех материалов активной зоны.

Процесс образования, течения и затвердевания ожиженных материалов при тяжелой аварии существенным образом определяется протекающими химическими реакциями; расплавленный циркалоид будет растворять диоксид урана (UO_2) при температурах, примерно равных температурам плавления металлического циркалоя, т. е. при существенно более низких температурах, чем температура плавления UO_2 (3100 К). Если оксидный слой, образовавшийся в результате пароциркониевой реакции на наружной поверхности оболочки твэла, достаточно велик, то большая часть ожиженной массы оболочки и топлива останется внутри твэла, и лишь незначительная ее часть вытечет в канал теплоносителя через небольшие отверстия в оксидном слое, приводя к незначительной блокаде канала. И уже в дальнейшем, при образовании больших трещин и отверстий в оболочке вытекает основная масса ожиженного топлива, вызывая значительно большую блокуровку каналов теплоносителя.

Существенное влияние на процесс расплавления может оказывать оксидная пленка, образующаяся на внутренней поверхности оболочки твэла при ее повреждении до расплавления. Эта пленка может заметно снижать количество топлива, растворяющегося расплавляющейся оболочкой при взаимодействии UO_2-Zr .

Скорость дальнейшего разогрева слоя обломков разрушенной активной зоны на третьей стадии тяжелой аварии внутри корпуса реактора во многом зависит как от геометрических и физических параметров слоя, так и от режима теплообмена внутри него. Геометрические и физические параметры слоя обломков определяются закономерностями и сочетанием процессов ожижения, движения и затвердевания, а также фрагментации при быстром охлаждении материалов активной зоны. Можно выделить две качественно различные структуры слоя обломков: слой достаточно грубых частиц (типа щебенки), способных перемещаться одна относительно другой, и слой мелких сцепленных между собой частиц, не имеющих возможности перемещаться.

В первом случае условия отвода тепла от слоя обломков активной зоны значительно лучше, чем во втором, так как способность фрагментов к перемещению делает возможными такие эффекты, как псевдоожожение слоя и образование паровых каналов, по которым при дальнейшем охлаждении может проникать жидкий теплоноситель. Наиболее существенными факторами, определяющими скорость разогрева слоя обломков активной зоны, являются наступление кризиса теплообмена и интенсивность закризисного теплообмена. Эффект образования паровых каналов существенно влияет на условия возникновения кризиса теплообмена. При заливе теплоносителя сверху кризис теплообмена определяется пределом противоточного движения жидкости и генерируемого внутри слоя пара.

Окисление и другие химические реакции могут значительно изменить характер перемещения расплава, влияя на температуру затвердевания и механическое поведение. В более холодных областях расплав начинает затвердевать и формирует корку на поверхности стержня. Растущая корка уменьшает поперечное сечение канала теплоносителя и ведет к формированию закупорки каналов — блокированию. Блокирование уменьшает локальный расход охлаждающей жидкости и ухудшает теплоотвод, что в свою очередь может вести к дальнейшему росту температуры и повреждению материалов, остающихся в активной зоне. Так как перемещающаяся смесь содержит источники остаточных тепловыделений (радиоактивные продукты), повторное плавление и затвердевание могут происходить неоднократно. Когда вода выкипает, расплавление активной зоны продолжается.

На дальнейших этапах аварии с повреждением активной зоны внутри корпуса реактора материалы твэлов (такие как топливные таблетки без оболочки и охрупченные окисленные оболочки) перемещаются вниз и могут достигнуть температур плавления (из-за внутренних источников тепла — радиоактивного распада) и сформировать жидкий объем, который покрыт твердой коркой, образованной из ранее расплавленных, переместившихся и застывших металлических компонентов. Разрушение корки в некоторой части цельного объема может позволить расплаву распространяться и перемещаться в нижнюю приемную камеру корпуса реактора. Расплавленные материалы могут падать в водный бассейн, приводя к неэнергичному (паровой шип) или энергичному (паровой взрыв) взаимодействию. Кориум может застыть временно под водой перед повторным плавлением.

Паровой взрыв может привести к резкому увеличению генерации пара и водорода, а также к сильному механическому воздействию на элементы конструкции реактора и, в первую очередь, на корпус или оболочку реактора (в зависимости от того, где произошел взрыв). Паровой взрыв можно определить как высвобождение значительного количества энергии расплава в форме ударной волны сжатия вследствие высокоскоростного цепного процесса взаимодействия горячей жидкости (расплава) и холодной испаряющейся жидкости (теплоносителя).

Таким образом, развитие и многообразие АП на внутриреакторной стадии тяжелой аварии (АПТА1) определяется в общем случае:

- 1) группой ИСТА1;
- 2) условиями межфазного взаимодействия внутрикорпусных структур, корпуса реактора, воды и парогазовой среды;
- 3) надежностью и работоспособностью систем, обеспечивающих выполнение функций безопасности и управления тяжелыми авариями;
- 4) действиями персонала по управлению и ликвидации последствий тяжелой аварии.

Конечные состояния АПТА1 в случае нарушения критериев разрушения корпуса реактора и (или) герметичности реакторного контура являются исходными событиями на *второй (вне реакторной) стадии развития тяжелой аварии (ИСТА2)*. Идентификация групп ИСТА2 определяется в общем случае:

- предысторией развития АП, которые могли привести к разрушению корпуса реактора и (или) герметичности реакторного контура;
- состоянием и условиями разрушения корпуса реактора и (или) герметичности реакторного контура.

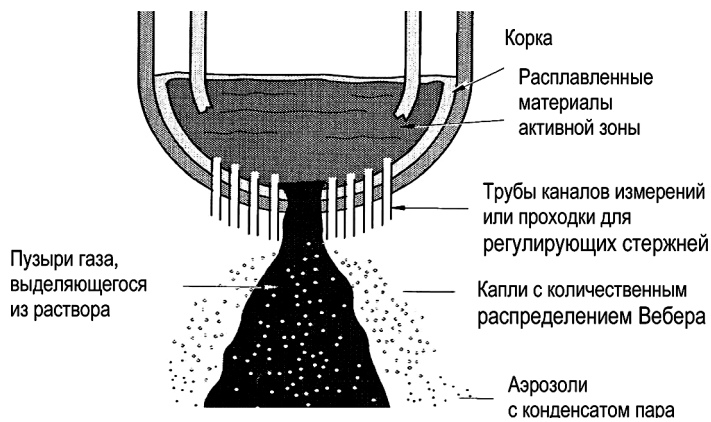


Рис. 1. Механизмы выброса расплава при высоком давлении [1]

Развитие и многообразие АП на внереакторной стадии тяжелой аварии (АПТА2) определяется в общем случае:

- 1) группой ИСТА2;
- 2) условиями выхода и взаимодействия продуктов внутриреакторной стадии тяжелой аварии за пределы реакторного контура;
- 3) условиями межфазного взаимодействия расплава, контейнмента и многофазной среды в объеме гермооболочки;
- 4) конструкцией, надежностью и работоспособностью систем, обеспечивающих выполнение функций безопасности и управления тяжелыми авариями;
- 5) действиями персонала по управлению и ликвидации последствий тяжелой аварии.

К основным процессам в контейнменте, происходящим вне корпуса реактора при тяжелых авариях, относятся: выброс расплава при разрыве днища корпуса реактора; взаимодействие расплава с бетоном контейнмента; нарушение герметичности системы 1-го контура на этапе внутрикорпусного повреждения активной зоны; выход водорода в контейнмент; паровой взрыв в контейнменте.

Разрыв днища корпуса приводит к существенному изменению характеристик протекания тяжелой аварии. Выброс обломков (расплава) активной зоны в контейнмент имеет существенное влияние на угрозу целостности контейнмента, пути распространения радиоактивных продуктов и многие другие аспекты всего протекания аварии. Некоторые особенности или характеристики повреждения корпуса влияют на переход с периода протекания аварии «внутри корпуса» к периоду «вне корпуса» реактора. Наиболее важным из них является давление, при котором происходит разрыв корпуса реактора.

Выброс расплава при высоком давлении может стать причиной наибольшего увеличения давления в контейнменте ядерного реактора с водой под давлением и сопровождается (рис. 1):

- истечением из корпуса реактора теплоносителя высокого давления;
- образованием пара и водорода при взаимодействии расплава с теплоносителем;
- прямым нагревом атмосферы контейнмента находящейся в воздухе частицами обломков.

Разрыв днища корпуса при высоком давлении может вызвать наибольшую проблему целостности контейнмента в ходе тяжелой аварии (особенно для проектов ядерного реактора с водой под давлением). Увеличение давления

в контейнменте является результатом сочетания следующих факторов:

1) формы и объема бетонной шахты реактора — пространства под корпусом реактора (малый объем может усилить рассеивание из шахты в остальную часть контейнмента); наличия пути выхода из шахты, по которому обломки (расплавы) могут быть рассеяны;

2) возможного наличия воды на днище шахты, что может привести к совместному уносу капель воды с частицами расплавленных обломков. Это обеспечивает наилучшие условия для взаимодействия расплава с водой (возможно образование водорода в расплаве металла) и (или) быстрое образование пара;

3) степени непосредственного взаимодействия находящихся в воздухе обломков с атмосферой контейнмента, которая зависит от возможности транспорта обломков в атмосферу верхней части контейнмента.

Выбросы расплава при низком давлении характеризуются следующими процессами:

«выливанием» обломков из днища корпуса реактора в бетонную шахту реактора;

возможным взаимодействием расплава с водой (при ее наличии) и остыванием;

началом взаимодействия материалов активной зоны с бетоном.

Взаимодействие расплавленной активной зоны и бетона (MCCI — Molten Core-Concrete Interactions) характеризуется экзотермическими химическими реакциями между обломками активной зоны и бетоном; образованием большого количества газа из-за разложения бетона; физическими и химическими взаимодействиями между газами, образующимися при разложении бетона, и нелетучими продуктами деления, выделяемыми обломками активной зоны; вертикальной и горизонтальной эрозией нижней бетонной плиты, разрушающей фундамент защитной оболочки [1].

Важная роль принадлежит тепломассообменным процессам взаимодействия расплава активной зоны с бетоном оболочки реактора. Процесс взаимодействия расплава активной зоны с бетоном оболочки существенно зависит от температуры расплава, которая определяется следующими оказывающими противоположное влияние эффектами: подводом тепла за счет остаточного тепловыделения и экзотермических реакций между материалами расплава и выделяющимися при взаимодействии расплава с бетоном газами (водяной пар и диоксид углерода); отводом тепла к среде внутри оболочки, а также тепла, полученного за счет эндотермического взаимодействия с бетоном.

Разрыв системы 1-го контура, вызванный разрушением активной зоны, сопровождается следующими процессами: выходом горячих газов из верхней части активной зоны на ранней фазе повреждения топлива;

возникновением потоков за счет естественной циркуляции;

чрезмерным нагревом трубопроводов контура, что может привести к их разрушению из-за ползучести.

Попадание водорода в контейнмент приводит к его смешению с атмосферой контейнмента и возможному возгоранию (в случае, если локальные параметры превышают критерии воспламеняемости). Водород, образующийся при окислении оболочек из циркония или стальных конструкций внутри корпуса реактора, в конечном счете попадает в контейнмент либо при разрыве трубопровода (LOCA), либо при циклическом срабатывании предохранительных

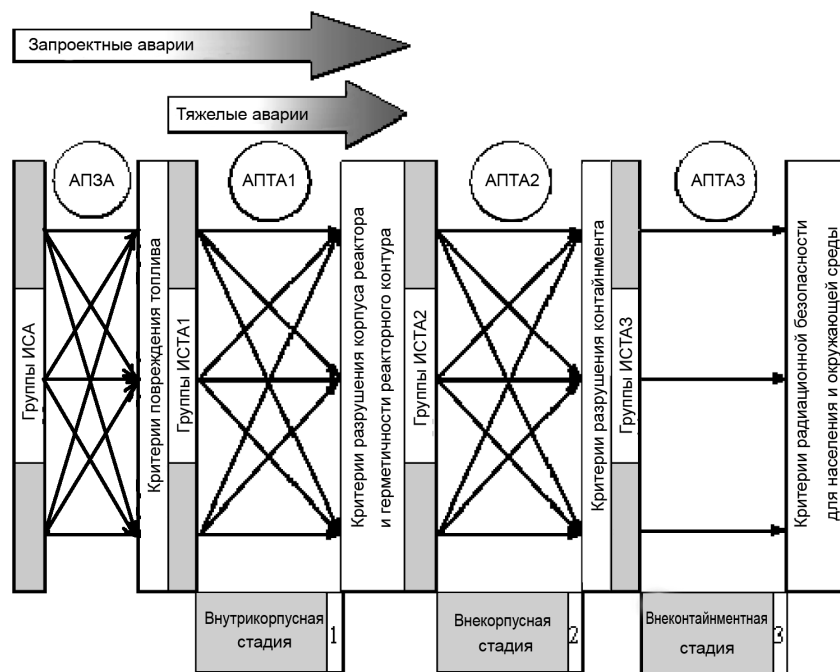


Рис. 2. Этапы и стадии возникновения и развития тяжелых аварий на корпусных реакторах

клапанов. Накопление водорода в контайнменте может привести к образованию огнеопасной смеси. Детали геометрии и конфигурации контайнмента очень важны для оценки концентрации водорода.

Для парового взрыва в контайнменте необходима реализация четырех последовательных стадий взаимодействия расплава и теплоносителя:

- 1) постепенного смешивания расплава и воды;
- 2) исчезновения паровой пленки на поверхности теплообмена, вызывающего ускоренный отвод энергии («триггер»-событие, запускающее процесс);
- 3) распространения импульса давления через смесь с образованием ударной волны;
- 4) распространения ударной волны, направленного наружу (механизм повреждения).

Взаимодействие расплавленных обломков с водой под корпусом реактора может также привести к энергичному «паровому взрыву», когда происходит разрыв днища корпуса реактора. Распространение ударной волны через массу воды может вызвать разрушение контайнмента, если основные конструкции контайнмента затоплены и находятся под водой.

Конечные состояния АПТА2 в случае нарушения критериев разрушения контайнмента являются ИС для *третьей (внеконтанментной) стадии развития тяжелой аварии* (ИСТА3). Идентификация групп ИСТА3 определяется в общем случае:

- предысторией развития АПТА2;
- состоянием и условиями повреждения контайнмента.

Развитие АП и условий нарушения критериев радиационной безопасности для населения и окружающей среды зависит от:

- 1) группы ИСТА3;
- 2) условий выхода и взаимодействия продуктов вне-реакторной стадии тяжелой аварии за пределы контайнмента;
- 3) состояния окружающей среды;

4) противоаварийных мероприятий по ликвидации последствий тяжелой аварии.

Стадии и этапы возникновения и развития тяжелых аварий на корпусных реакторах обобщены на рис. 2.

Выводы

Подытоживая представленные выше результаты, можно сформулировать основные требования к методическому обеспечению моделирования тяжелых аварий на корпусных реакторах типа ВВЭР.

1. Условия возникновения тяжелых аварий, состояние поврежденной активной зоны, конфигурации работоспособных СБ для дальнейшего управления тяжелыми авариями в общем случае зависят от всего возможного спектра ИСА (отказы/нарушения систем, внутренние и внешние экстремальные события), а также соответствующего спектра АПЗА, которые могут привести к тяжелому повреждению топлива.

До настоящего времени при моделировании и анализе тяжелых аварий на ВВЭР обычно в качестве ИСА рассматриваются большие течи 1-го контура или потеря питательной воды при конечных состояниях с повреждением топлива (см. [3, 4]). Такой подход требует дополнительных обоснований его консервативности, так как при других запроектных авариях (межконтурные течи, экстремальные воздействия и т. д.) могут создаваться «худшие» условия возникновения и развития тяжелой аварии.

2. Моделирование и анализ тяжелых аварий целесообразно рассматривать на трех основных стадиях: внутрикорпусной, внекорпусной (в пределах контайнмента) и внеконтанментной.

Каждая стадия развития тяжелой аварии должна быть идентифицирована:

- необходимыми и достаточными критериями (условиями) возникновения и окончания стадии;
- условиями протекания аварийных процессов (начальные и граничные условия);

спектрами (наборами) ИСА в зависимости от их предыстории возникновения, а также состояния систем и оборудования;

необходимыми для управления и ликвидации последствий функциями безопасности и критическими конфигурациями систем, обеспечивающих их выполнение;

спектрами АП (деревьев событий) в зависимости от набора ИСА каждой стадии, надежности и работоспособности систем (обеспечивающих выполнение необходимых функций безопасности), а также развития и взаимодействия доминирующих процессов при характерных начальных и граничных условиях каждой АП.

До настоящего момента при моделировании и анализе тяжелых аварий на ВВЭР обычно (без достаточного обоснования) рассматривается одна или несколько АП (см. [3], [4]), которые в общем случае не отражают все возможные условия протекания процессов при тяжелой аварии (нейтронно-физические, физико-химические, тепломассообменные, динамические и др.), а также условия надежности и состояния работоспособности систем, обеспечивающих выполнение необходимых функций безопасности.

В рамках предложенного подхода, основанного на постадийной систематизации развития АП событий, возможно достаточно обоснованное моделирование и анализ тяжелых аварий, а соответственно и технических руководств (инструкций) по управлению и ликвидации их последствий.

Список литературы

1. IAEA. Training in Level 2 PSA. Severe Accident Phenomena.
2. Hofmann P., Hagen S., Schanz G. and Skokan A. Reactor Core Materials Interactions at Very High Temperatures // Nuclear Technology. — 1989. — 87. — Pp. 146–186.
3. Обеспечение локализуемых функций защитной оболочки НВ АЭС-2 при ЗПА с течами из реакторной установки / ФГУП «Атомэнергопроект» — ИПБЯЭ РНЦ «Курчатовский институт» // Материалы конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». — Подольск, 2008.
4. Звонарев Ю., Будаев М., Кобзарь В., Волчек А. Валидация компьютерного кода ASTEC и применение для анализа безопасности АЭС с ВВЭР. Code application and PSA methodologies. Paper № 1 The first European Review Meeting on Severe Accident Research (ERMSAR-2005) Aix-en-Provence, France, 14-16 November 2005.

Надійшла до редакції 09.03.2010.