

В. И. Скалозубов¹, В. Н. Васильченко², В. Н. Ващенко³, С. С. Яровой³

¹Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев

²ГНИЦ СКАР Минтопэнерго Украины, Киев

³Государственная экологическая академия последипломного образования, Киев

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ТЯЖЕЛЫХ АВАРИЯХ НА АЭС С ВВЭР

Проведен обзорный анализ состояния вопросов моделирования взрывобезопасности при тяжелых авариях. Показана необходимость разработки дополнительных детерминистских критериев условий возникновения паровых высокоэнергетических взрывов и взрывов водородных смесей, которые имели место при тяжелых авариях на АЭС Фукусима-1.

Ключевые слова: тяжелая авария (ТА), гермообъем (ГО), водородсодержащая паровоздушная смесь (ВПВС), топливосодержащие материалы, максимальная проектная авария (МПА), исходное событие аварии (ИСА).

Последние события на АЭС Фукусима-1 показали, что важным вопросом управления ТА является обеспечение взрывобезопасности. Именно произошедшие взрывы на блоках № 1 – 4 АЭС Фукусима-1 в конечном итоге определили разрушения защитных барьеров безопасности и значительные выбросы радиоактивных продуктов.

Основными возможными взрывоопасными событиями на внутри- и внекорпусной стадии ТА являются:

детонация и дефлаграция (самовозгорание) ВПВС в результате определенных термохимических взаимодействий компонентов;

паровой взрыв при резком росте давления в результате определенных условий теплообмена поврежденных элементов активной зоны с охлаждающей средой.

При паровом взрыве также может образоваться водород, приводящий к последующей детонации.

Далее будут подробнее рассмотрены необходимые и достаточные условия возникновения таких опасных для надежности защитных барьеров безопасности событий.

Как и для нормальных условий эксплуатации и проектных аварий необходимыми условиями детонации ВПВС на внутри- и внекорпусной стадии ТА является наличие водорода и окислителя. Однако основными источниками образования водорода (в отличие от нормальных условий эксплуатации и проектных аварий) при ТА являются:

1) термохимические реакции и процессы взаимодействия пара с высокотемпературными топливными конструкциями реакторной установки и контейнента;

2) возможные мощные паровые взрывы, приводящие к детонационному распаду молекул воды на водород и кислород.

Для внутрикорпусной стадии ТА основным термохимическим процессом образования водорода является пароциркониевая реакция



Кинетика пароциркониевой реакции существенно ускоряется при температурах выше 1200 – 1400 °С. Пароциркониевая реакция сопровождается в основном следующими эффектами: интенсивным выделением тепла при высоких температурах, выделением водорода, изменением физических свойств материала оболочки твэлов, в частности, снижением механической прочности из-за охрупчивания, повышением температуры плавления от 2170 (Zr) до 2900 К (ZrO₂). Выделение тепла при реакции составляет 6,29 МДж/кг и при T > 1250 К становится доминирующим фактором, определяющим разогрев активной зоны. Только за счет тепла реакции, без учета остаточного тепловыделения, температура твэлов может намного превысить 3100 К.

© В. И. Скалозубов, В. Н. Васильченко, В. Н. Ващенко, С. С. Яровой, 2012

Основными термохимическими источниками водорода в контейнменте являются: продукты пароциркониевой реакции, поступающие из реактора; продолжающиеся процессы пароциркониевой реакции в расплаве, поступающем из поврежденного корпуса реактора;

термохимические реакции между расплавленным топливом и бетонными конструкциями контейнмента, паром и металлическими конструкциями контейнмента, двуокисью урана и паром, химдобавками спринклерной воды и алюминиевыми оболочками теплоизоляции и др.

Взрыв ВПВС опасен возможностью разрушения строительных конструкций защитной оболочки вследствие увеличения давления в защитной оболочке до 1,0 – 1,2 МПа (например, при взрыве водородсодержащей среды при испытаниях опытного образца дожигателя водорода на стенде ЦНИИМАШ (Россия) зафиксировано значение давления, которое значительно превышает допустимое давление 0,5 МПа).

Известные расчетные оценки [1], полученные разными кодами, показали, что для серийных ВВЭР-1000 возможная масса выделившегося при пароциркониевой реакции водорода составляет не более 250 кг (первичное ИСА – МПА с двухсторонним гильотинным разрывом главного циркуляционного трубопровода – МПА), а скорость выделения водорода – 10^{-5} – 10^{-3} кг/с. Именно эти оценки максимально возможной массы водорода при авариях использованы в отчете по анализу безопасности блока № 5 ЗАЭС [2]. Следует также отметить, что они значительно превышают соответствующие значения в проектных режимах – не более 15 кг (с учетом радиолиза и разложения воды, аммиака и гидразина в теплоносителе, а также пароциркониевой реакции с 1 %-ной допустимой долей прореагировавшего циркония оболочек твэлов), но существенно меньше максимально возможной массы водорода при полном окислении всех циркониевых оболочек твэлов (около 30 т циркония для серийных ВВЭР-1000). Максимально возможную массу выделяющегося водорода в результате пароциркониевой реакции оболочек твэлов можно оценить по формуле (1):

$$m_{\max}(\text{H}_2) = \frac{2\mu(\text{H}_2)}{\mu(\text{Zr})} m(\text{Zr}), \quad (2)$$

где $\mu(\text{H}_2) = 2$ г/моль, $\mu(\text{Zr}) = 91$ г/моль – молярные массы водорода и циркония соответственно. Отсюда максимально возможная масса водорода при полном окислении циркониевых оболочек твэлов составит около 1300 кг.

Более поздние результаты [3, 4] расчетного моделирования ТА на ВВЭР-1000 с привлечением кода MELCOR (первичное ИСА – МПА) в отношении выделяющегося водорода при окислении циркония и стали приведены на рис. 1 и 2 (с учетом разных нодализационных схем расчетного моделирования).

Анализ известной аварии на корпусном реакторе ТМІ-2 (США) с ИСА «Малая течь реакторного контура» определил, что на ~ 200-й минуте процесса масса генерированного газообразного водорода составила более 400 кг. Результаты расчетного моделирования ТА на реакторах ВВЭР нового поколения повышенной безопасности (В-392М) с применением кода SCDAP/RELAP5/MOD3.3 [5] (ИСА – МПА) определили возможность образования около 1000 кг водорода.

Детальный анализ необходимых условий дефлаграции/детонации ВПВС, проведенный в ВАБ-2 энергоблока № 5 ЗАЭС [6], показал, что в зависимости от первичных ИСА и различных сценариев развития запроектной аварии масса образовавшегося и сгоревшего газообразного водорода достигает 2000 кг.

Представленные выше результаты позволяют заключить, что в [1, 3, 4] выбраны не наиболее консервативные сценарии и условия развития ТА в отношении массы выделяющегося при пароциркониевой реакции водорода (соответственно и условий дефлаграции и детонации ВПВС), а также отметить существенную зависимость результатов расчетного моделирования массы выделяющегося водорода от используемых расчетных нодализационных схем.

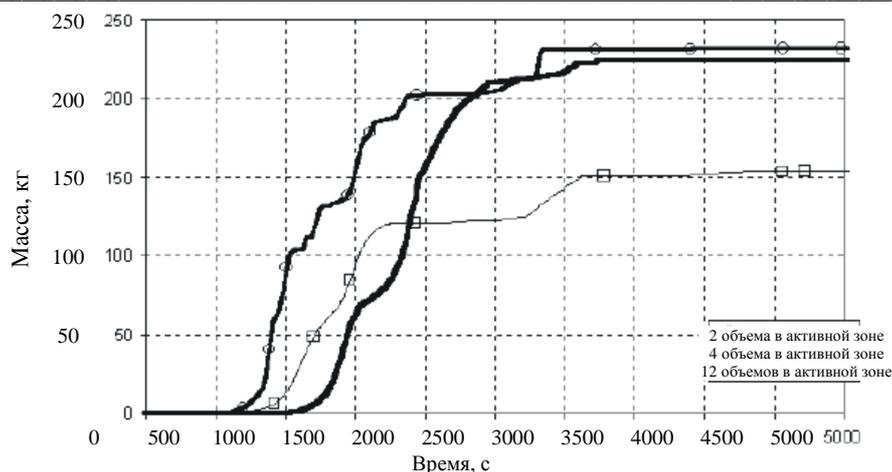


Рис. 1. Интегральная масса водорода, образующегося в результате реакции окисления циркония (без учета окисления стали), в расчетах с различным количеством расчетных объемов активной зоны (авария типа «большая течь»).

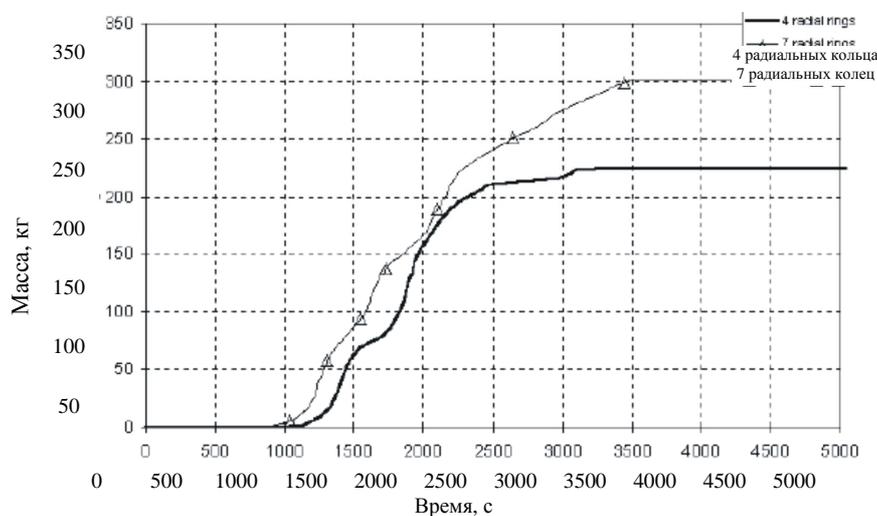


Рис. 2. Интегральная масса водорода, образующегося в результате реакции окисления циркония (без учета окисления стали), в расчетах с различным количеством радиальных расчетных зон (авария типа «большая течь»).

Для условий взрывобезопасности водорода важна не только общая масса выделившегося водорода, но и его локальная концентрация. Наибольшая локальная концентрация газообразного водорода в ГО в начальные моменты времени будет в местах разгерметизации реакторного контура. Учитывая высокую летучесть и диффузионность газообразного водорода, следует ожидать достаточно быстрое его распространение по объему контейнмента и снижение значений локальных концентраций в местах разгерметизации реакторного контура.

Характерное время снижения взрывоопасных локальных концентраций t_{VH} можно оценить соотношением

$$t_{VH} \approx \frac{V_{ГО}}{C_{VH}},$$

где $V_{ГО}$ – «свободный» объем ГО; C_{VH} – средняя по объему скорость распространения водорода, зависящая от неравномерности распределения концентрации водорода, а также свойств и состояния парогазовой среды ГО.

Характерное время достижения локальной критической концентрации водорода K_{KP}

$$t_{LH} \approx \frac{K_{KP}}{C_{LH}},$$

где C_{LH} – средняя скорость локального образования, зависящая от источников и механизмов образования водорода.

Таким образом, необходимое условие взрывобезопасности (дефлаграции/детонации) водорода в ГО

$$\frac{V_{ГО}}{C_{ВН}} > \frac{K_{КР}}{C_{ЛН}}. \quad (3)$$

Определяющим фактором необходимых условий взрывобезопасности ВПВС в ГО является соотношение скорости локальной генерации газообразного водорода и скорости распространения водорода в парогазовой среде ГО.

При пониженных давлениях в процессе ТА разгерметизации реакторного контура (соответственно и условий попадания в ГО основных реакторных источников водорода) следует ожидать незначительного изменения скорости локальной генерации водорода в местах разгерметизации, так как термодинамические параметры парогазовой смеси (давление, температура) имеют близкие значения (соответственно и скорости термохимических реакций).

При высоких давлениях в процессе ТА разгерметизации реакторного контура возникают значительные градиенты давлений и температур парогазовой среды, изменяющие условия тепломассообменных межфазных процессов, и соответственно условия термохимических реакций и скорости локальной генерации водорода. В частности, резкое падение давления в зонах разгерметизации приведет к дополнительной локальной генерации газообразного водорода из теплоносителя, находившегося в реакторном контуре. Кроме того, при прочих равных условиях может существенно сократиться время попадания в ГО других реакторных источников водорода, что также способствует условиям повышенной взрывоопасности.

Таким образом, реализация условий взрывобезопасности ВПВС существенно зависит от сценариев разгерметизации реакторного контура и условий попадания источников водорода на внекорпусной стадии ТА.

Необходимые условия взрывобезопасности водорода на внутрикорпусной стадии ТА при «плотном» реакторном контуре объемом $V_{ПК}$ имеют вид, аналогичный формуле (3):

$$\frac{V_{ПК}}{C_{ВН}} > \frac{K_{КР}}{C_{ЛН}(T_T)}, \quad (4)$$

где $C_{ЛН}(T_T)$ – локальная скорость генерации водорода на внутрикорпусной стадии, существенно зависящая от температуры топливосодержащих материалов T_T .

Достаточными условиями дефлаграции и детонации ВПВС является критическое сочетание концентраций горючего – окислителя – флегматизаторов при определенном термодинамическом состоянии смеси [7]. При анализе взрывоопасности традиционно в качестве критерия возникновения условий дефлаграции и детонации водорода используется трехкомпонентная диаграмма Шапиро - Моффетте: горючее – водород; окислитель – воздух; флегматизатор – пар. Пример, использования критериев Шапиро - Моффетте при анализе взрывоопасности ВПВС в процессе развития ТА на ВВЭР-1000/В-392 приведен на рис. 3 и 4 [8]. Моделирование и анализ пространственных эффектов при распространении водорода в объеме контейнента при ТА проведен в [8] на основе оригинальной версии кода КУПОЛ-3D.

Точка на диаграмме рис. 3 показывает долю каждого компонента в смеси в данном контрольном объеме в фиксированный момент времени. Динамика движения точки, расположенной в верхней части подкупольного пространства, по зонам с разными концентрациями пара, воздуха и водорода за промежуток времени 2600 с после начала подачи ВПВС показывает, что рассматриваемая точка перемещается в зону дефлаграции, расположенную между квадратами и треугольниками. Динамика заполнения водородом подкупольного пространства показывает, что в первые несколько минут после начала напуска происходит образование локального облака горючей смеси H_2 - H_2O -воздух, на формирование которого существенное влияние оказывает взаимодействие со стенками оболочки, с последующим его распространением в верхнюю часть подкупольного пространства (см. рис. 4). В течение всего времени напуска ВПВС существует достаточно существенное концентрационное расслоение при сильном влиянии естественной конвекции.

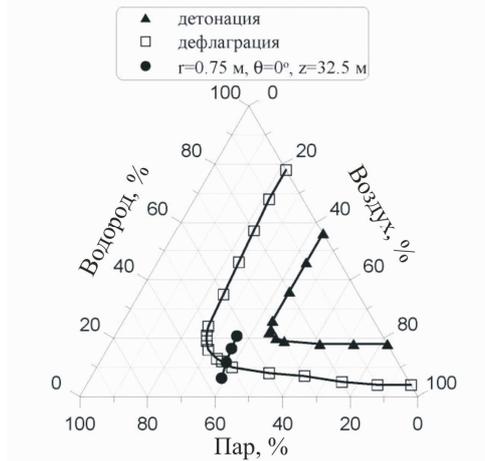


Рис. 3. Диаграмма Шапиро для точки, расположенной в верхней части подкупольного пространства, в течение 360 с после начала подачи ВПВС.

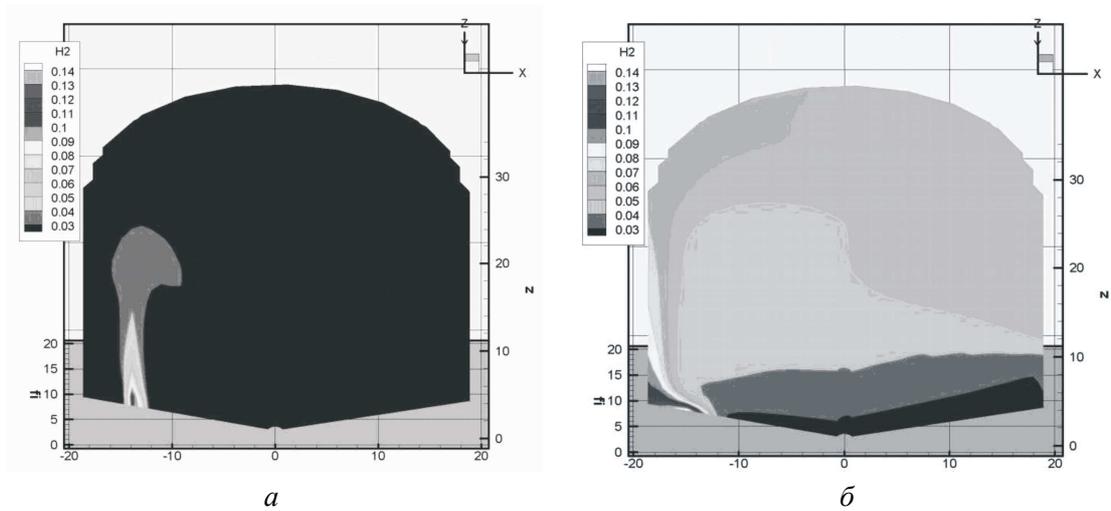


Рис. 4. Заполнение ВПВС подкупольной области:
а – через 20 с; б – через 360 с.

Численное моделирование задачи о выбросе водорода в подкупольное пространство показало, что в первые минуты имеют место: формирование локального облака горючей смеси в объеме оболочки; взаимодействие его со стенками оболочки; выраженная стратификация водорода в помещении, моделирующем свободный объем контейнента при сильном влиянии естественной конвекции. В частности, полученные в [2, 9] оценки момента наступления критических условий взрыва ВПВС в контейнменте ВВЭР-1000 на 19-е сутки после начала аварии при равномерном распределении водорода полностью не соответствуют результатам моделирования [8], учитывающим неравномерность распределения концентраций ВПВС по объему контейнента.

Анализ горения водорода на внекорпусной стадии для серийных энергоблоков ВВЭР-1000/В-320 проведен в отчете по ВАБ 2-го уровня [6] с учетом:

различных механизмов дефлаграции (медленная дефлаграция, быстрое турбулентное горение);

разных сценариев развития дефлаграционных процессов ВПВС в зависимости от первичных исходных событий и конфигураций работоспособности систем безопасности;

разных исходных состояний реакторной установки на номинальной мощности, на пониженном уровне мощности и на остановленном реакторе.

Для оценки вероятности разрушения/нарушения герметичности гермооболочки учитывались сценарии, в которых имеется изначально изолированный контейнмент и отсутствует байпас гермооболочки. Для каждого сценария в [6] определялись количество сгораемого

водорода, максимальное давление и время в процессе дефлаграции ВПВС, а также вероятностные оценки составляющих суммарной частоты предельного аварийного выброса. Детерминистское моделирование процессов в гермооболочке осуществлялось в ВАБ-2 [6] интегральным кодом MELCOR, а в качестве химических критериев дефлаграции/детонации ВПВС использовалась известная трехкомпонентная диаграмма Шапиро - Моффетте.

Основные ограничения/недостатки результатов ВАБ-2 [6] в отношении анализа взрывобезопасности ВПВС связаны со следующим положениями.

1. Отсутствует достаточное обоснование наиболее неблагоприятных для взрывобезопасности ВПВС сценариев. В частности, в сценарии № 6 с ИСА S3 (малые течи 1-го контура) и принятыми конфигурациями работоспособности систем безопасности согласно результатам расчетного анализа не возникают условия дефлаграции/детонации ВПВС для всех случаев и этапов развития аварии. Дополнительный анализ аналогичного ИСА (открытие с отказом на закрытие ИПУ КД) показывает, что при запроектном развитии процессов (полный отказ технологических систем удаления и дожигания водорода, а также другие маловероятные события) возможно возникновение условий дефлаграции ВПВС в барботажном баке.

2. Недостаточно обоснованно из рассмотрения (моделирования, анализа и обоснования противоаварийных мероприятий) исключены вопросы дефлаграции водорода на внутрикорпусной стадии и парогазовых взрывов как относительно маловероятных событий при ТА.

Вместе с тем такие взрывы произошли на АЭС Фукусима-1 и существенно повлияли на последствия аварии.

3. Отсутствует анализ неоднозначного влияния на взрывобезопасность ВПВС отдельных противоаварийных мероприятий по управлению ТА (в частности, управляющих параметров по охлаждению топливосодержащих материалов и организованному удалению парогазовой смеси). Опыт аварий на АЭС Фукусима-1 подтвердил актуальность этих вопросов:

на блоках № 1 и 3 парогазовые взрывы произошли сразу после организации сброса давления в контейнменте путем выброса парогазовой среды;

отсутствовала однозначность в отношении эффективности и целесообразности организации охлаждения поврежденного топлива.

Для решения вопросов эффективности управляющих противоаварийных мероприятий и уточнения областей взрывобезопасности необходимо дополнительное обоснование и внедрение консервативных теплогидродинамических критериев взрывобезопасности.

4. Применение в качестве достаточных условий взрывобезопасности ВПВС химических критериев диаграммы Шапиро - Моффетте является необоснованным для всех стадий и этапов развития ТА (в частности, при существенных скоростях изменения теплогидродинамических режимных параметров).

Относительно применимости диаграммы Шапиро - Моффетте как основного критерия достаточных условий дефлаграции и детонации водорода в процессе развития ТА необходимо отметить следующее:

диаграмма не учитывает изменение термодинамического состояния (давление, температура), определяющего критическое сочетание ВПВС, как на внутри-, так и на внереакторной стадии развития ТА. Кроме того, воздух содержит не только кислород (как окислитель), но и азот и инертные газы, являющиеся, по сути, флегматизаторами детонации, состав которых может изменяться на разных стадиях аварии;

диаграмма обоснована для равновесных или квазиравновесных процессов (при относительно медленном изменении теплогидродинамических параметров)

$$\frac{1}{\bar{X}_0} \frac{d\bar{X}}{dt} \ll \frac{1}{\bar{Y}_0} \frac{d\bar{Y}}{dt}, \quad (5)$$

где \bar{X} – теплогидродинамические параметры смеси (давление, температура, скорость движения); \bar{Y} – концентрации ВПВС; \bar{X}_0, \bar{Y}_0 – соответствующие начальные значения; t – время.

В частности, на внутрикорпусной стадии ТА теплогидродинамические процессы мо-

гут проходить достаточно быстро (например, при относительно больших течах теплоносителя) и условие (5) может не выполняться.

Таким образом, необходимы дополнительные обоснования применимости диаграммы Шапиро - Моффетте как достаточного условия взрывобезопасности ВПВС при протекании ТА в ВВЭР.

Паровой взрыв может привести к резкому росту давления и количества 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). Процесс начинается с бурного взаимодействия между расплавленными обломками активной зоны и водой (левая часть рис. 5). Если отводимая энергия достаточно велика и это происходит за достаточно короткий промежуток времени, то образующаяся ударная волна может разрушить днище корпуса реактора или создать гидроудар, направленный вверх внутри корпуса реактора, способный оторвать верхнюю крышку корпуса реактора (средняя часть рис. 5). Крышка корпуса в этом случае становится «снарядом», который может нанести удар по конструкциям контайнмента. Такая последовательность событий создает «альфа-вид» отказа контайнмента [10].

Физические исследования механизма термомеханического взаимодействия двух разнородных жидкостей различной температуры позволили выделить различные фазы возникновения и протекания парового взрыва [11]:

начальное перемешивание горячей и холодной жидкостей (механизм теплообмена между жидкостями – пленочное кипение);

резкая интенсификация теплообмена при нарушении пленочного кипения;

формирование ударной волны вследствие цепного процесса резкой генерации пара – дальнейшей фрагментации жидкости;

распространение ударной волны в многофазной системе.

Начальная фаза парового взрыва в значительной мере определяет массу расплава активной зоны, которая достаточно эффективно перемешивается с водой и может принимать участие в последующих фазах парового взрыва. Возможны два принципиально различных механизма перемешивания расплава с водой. Один предполагает, что фрагментация капель расплава происходит до размера, соответствующего пределу противоточного движения падающей капли и восходящего потока пара. Во втором случае расплав, вода и пар считаются образующими единую систему, расширяющуюся в радиальном направлении по мере погружения в объем теплоносителя.

Определяющей для парового взрыва является третья фаза, при которой генерация пара в данном месте происходит со скоростью выше интенсивности его отвода, что приводит к местному возрастанию давления и, как следствие, с одной стороны, к дальнейшей фрагментации частиц жидкости, развитию поверхности контакта и росту генерации пара; с другой стороны – к распространению этого процесса на соседние частицы. В результате имеет место детонационный процесс.

Третья фаза (формирование ударной волны) определяется циклической совокупностью процессов, включая процессы перемешивания и формирования новой области контакта системы «расплав – теплоноситель», в частности за счет фрагментации расплава, генерации пара и т.д.

Последняя фаза парового взрыва – распространение полностью сформированной детонационной волны в первоначально перемешанной смеси расплава, жидкого и парообразного теплоносителя. Прохождение ударной волны вызывает срыв парового слоя и частиц расплава.

На этой стадии фрагментация частиц расплава может происходить либо вследствие вскипания при докритических давлениях, либо вследствие нарушения устойчивости поверхности при сверхкритических давлениях.

Рис. 5 (см. с. 60).

В качестве примера феноменологических моделей парового взрыва можно привести неравновесную модель большого масштаба в водоохлаждаемом реакторе, представленную в [12]. Физическая модель рассматривает процессы перемешивания и взрыва в трех зонах системы (рис. 6): взрыва, промежуточной и расширения.

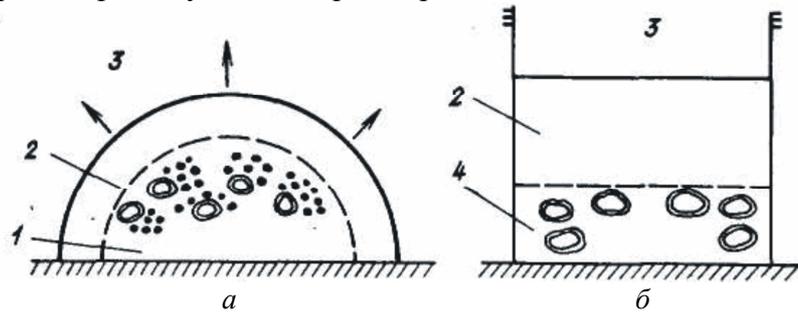


Рис. 6. Физическая модель процессов парового взрыва (а) и перемешивания (б): 1 – зона взрыва; 2 – промежуточная зона; 3 – зона расширения; 4 – зона перемешивания.

Основные допущения модели парового взрыва большого масштаба [12]:

система имеет одну зону взрыва, распространяющегося с плоским или полусферическим фронтом;

весь теплоноситель в зоне взрыва участвует во взаимодействии с расплавом;

теплообмен с окружающей средой отсутствует; внутренний теплообмен осуществляется между зонами взрыва и промежуточной;

частицы расплава топлива равномерно распределены в объеме теплоносителя в результате начального перемешивания;

весь пар, возникающий при взрыве, остается вокруг частиц топлива;

радиационной энергией пара и энергией химических реакций между топливом и теплоносителем можно пренебречь.

Вода и пар могут иметь различные температуры (неравновесное состояние). Частицы расплавленного топлива разделяются по размерам на две группы: первую образуют частицы диаметром, определяющимся процессом начального перемешивания; вторую составляют частицы, образовавшиеся в процессе фрагментации. Результаты расчетов по данной модели, приведенные в [12] и иллюстрируемые рис. 7, достаточно хорошо совпадают с экспериментальными данными, полученными на установке FITS, в том числе отражающими условия на ВВЭР.

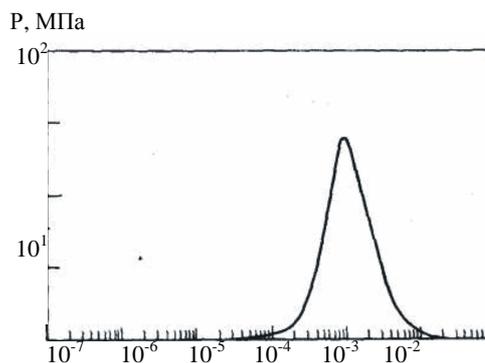


Рис. 7. Изменение давления во времени для опыта на установке FITS.

Для моделирования паровых взрывов на внутри и внекорпусной стадии ТА актуальным является вопрос определения условий (критериев) возникновения детонационной ситуации, в зависимости от теплогидродинамического трехфазного состояния в корпусе реактора и в контайнменте. Определение таких критериев позволит обосновать мероприятия по управлению ТА в отношении устранения условий возникновения паровых взрывов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Обеспечение* водородной взрывозащиты и взрывопреупреждения АЭС с ВВЭР // Совещание группы пользователей по вопросам безопасности российских АЭС. – 1995.
2. *Дополнительные материалы по анализу безопасности.* Запорожская АЭС. Энергоблок № 5. Глава 7. Анализ проектных решений и показателей эксплуатации. Детерминистическая оценка уровня безопасности. – 21.5.70.ОБ.01.07. – Ч. 3. Анализ функциональной достаточности АСУ ТП. Книга 9. – ОАО ХИ «Энергопроект», 2003.
3. *Носатов В., Стрижов В.* Анализ тяжелых аварий реакторов ВВЭР с использованием кода MELCOR-1.8.5. – М.: ИБРАЭ РАН, 2009.
4. *Asmolov V., Yegorova L., Kaplar E. et al.* Development of Data Base with Mechanical properties of Un- and Reradiated VVER Cladding // Proc. Twenty-Fifth Water Reactor Safety Information Meeting. – 1997. NUREG/CP-0162. – Vol. 2.
5. *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 No 1. The first European Review Meeting on Severe Accident Research (ERMSAR-2005). – Aix-en-Provence (France), Nov. 14 – 16, 2005.
6. *Вероятностный анализ безопасности 2-го уровня энергоблока № 5 ЗАЭС.* Итоговый отчет Запорожской АЭС. – № 21.5.59.ОБ.04.5. – Энергодар, 2009.
7. *Скалозубов В. И., Ключников А. А., Колыханов В. Н.* Основы управления запроектными авариями с потерей теплоносителя на АЭС с ВВЭР. – Чернобыль: ИПБ АЭС НАН Украины, 2010. – 400 с.
8. *Ефанов А. Д., Витушкина Н. М., Лукьянов А. А., Зайцев А. А.* Анализ пространственных эффектов при распространении водорода в объеме контайнмента // Материалы конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». – Подольск (Россия): ФГУП ОКБ «ГП», 2008.
9. *Система* удаления водорода из герметичных помещений. – Пояснительная записка 292009.0000003.21040.000РП.00. – М.: АЭП, 1989.
10. *IAEA Training in Level 2 PSA. Severe Accident Phenomena.*
11. *Кузнецов Ю. Н.* Теплообмен в проблеме безопасности ядерных реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 296 с.
12. *Oh M. D., Corradini M. L.* A Non-equilibrium Model for Large Scale Vapour Explosions // Proc. Third Intern. Topical Meeting Reactor Thermal Hydraulics. – Newport (USA), Oct. 15 - 18, 1985. – Vol. 2. – P. 19. J.

В. І. Скалозубов, В. М. Васильченко, В. М. Ващенко, С. С. Яровой

**СТАН ПИТАНЬ МОДЕЛЮВАННЯ ВИБУХОБЕЗПЕКИ ПРИ ВАЖКИХ АВАРІЯХ
НА АЕС ІЗ ВВЕР**

Проведено оглядовий аналіз стану питань моделювання вибухобезпеки при важких аваріях. Показано необхідність розробки додаткових детерміністських критеріїв умов виникнення парових високоенергетичних вибухів та вибухів водневих сумішей, що мали місце при важких аваріях на АЕС Фукусіма-1.

Ключові слова: важка аварія, гермооб'єм, водневовмісна пароповітряна суміш, паливовмісні матеріали, максимальна проектна аварія, вихідна подія аварії.

V. I. Skalozubov, V. M. Vasilchenko, V. M. Vashchenko, S. S. Jarovoj

**STATE-OF-THE-ART OF MODELLING OF EXPLOSION SAFETY DURING SEVERE
ACCIDENTS AT NPPS WITH WWER**

The survey analysis of a state-of-the-art of modelling of explosion safety during severe accidents is carried out in this paper. It is demonstrated necessity to develop additional deterministic criteria for conditions of occurrence of steam high-energy explosions and explosions of hydrogen mixes that took place during severe accidents at Fukushima-1.

Keywords: severe accident, containment, hydrogenous steam-air mixture, fuel-containing masses, maximum design basis accident, initial event of accident.

Надійшла 29.09.2011

Received 29.09.2011

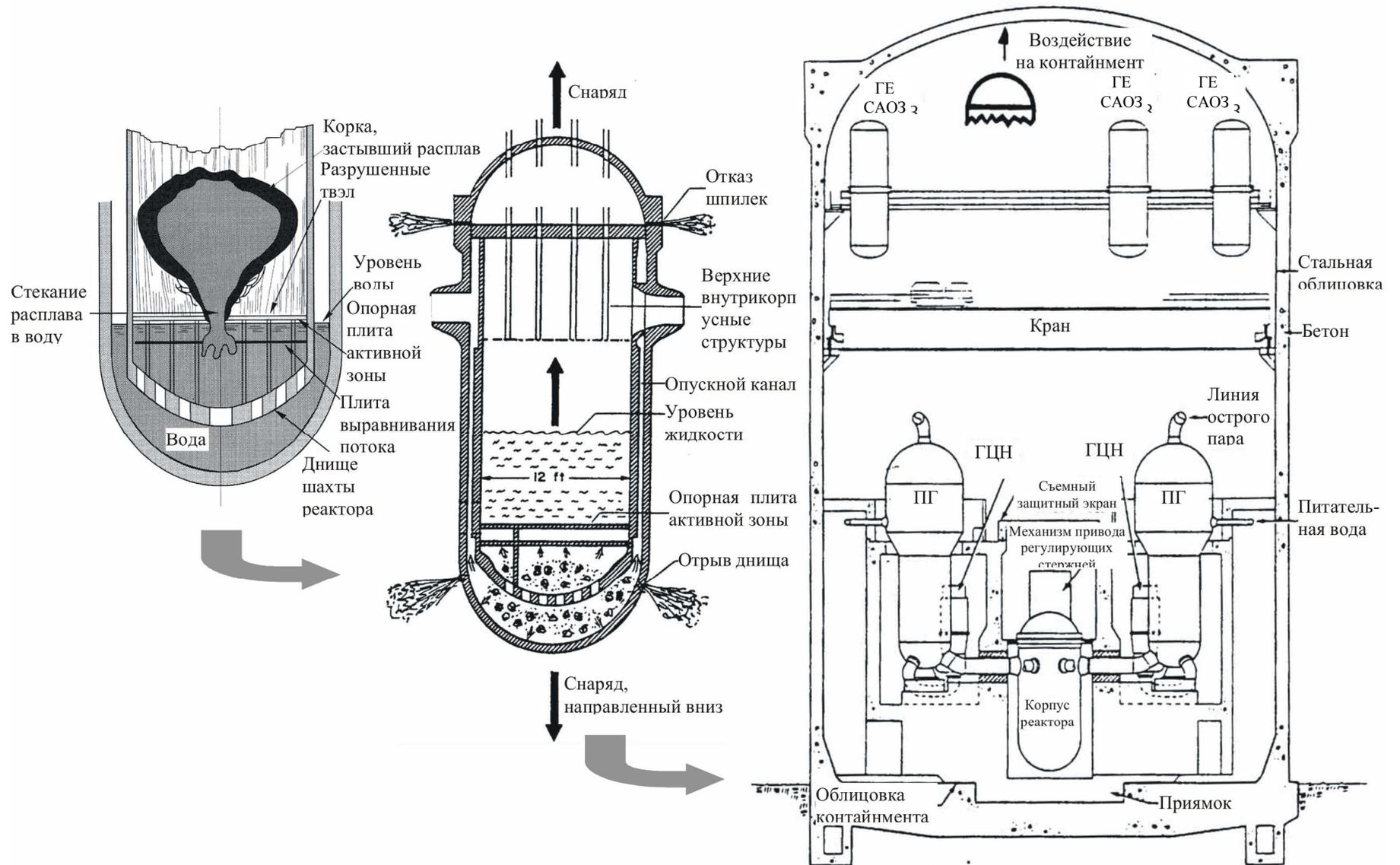


Рис. 5. Развитие парового взрыва внутри корпуса реактора [10].