

## Моделирование условий возникновения парогазовых взрывов при тяжелых авариях на АЭС с ВВЭР

Приведен анализ известных подходов моделирования условий возникновения водородных и паровых взрывов при тяжелых авариях (с повреждением ядерного топлива). Показано, что известные подходы оценки условий возникновения парогазовых взрывов не учитывают существенную динамичность процессов на начальных этапах развития тяжелой аварии и для «быстротекущих» сценариев разрушения защитных барьеров безопасности. Предложен альтернативный метод оценки консервативных условий возникновения парогазовых взрывов при тяжелых авариях в корпусных реакторах на основе общих положений теории неустойчивости, который учитывает существенную динамичность процессов и «цепную» детонацию водорода от паровых взрывов.

*Ключевые слова:* парогазовые взрывы, тяжелая авария, контейнмент, моделирование, водо-водяной реактор (ВВЭР).

**В. І. Скалозубов, І. Л. Козлов, А. О. Гудима**

### Моделювання умов виникнення парогазових вибухів у процесі важких аварій на АЕС з ВВЕР

Наведено аналіз відомих підходів моделювання умов виникнення водневих і парових вибухів у процесі важких аварій (з пошкодженням ядерного палива). Показано, що відомі підходи оцінки умов виникнення парогазових вибухів не враховують істотної динамічності процесів на початкових етапах розвитку важкої аварії та для «швидкоплинних» сценаріїв руйнування захисних бар'єрів безпеки. Запропоновано альтернативний метод оцінки консервативних умов виникнення парогазових вибухів під час важких аварій у корпусних реакторах на основі загальних положень теорії нестійкості, який враховує істотну динамічність процесів і «ланцюгову» детонацію водню від парових вибухів.

*Ключові слова:* парогазові вибухи, важка аварія, контейнмент, моделювання, водо-водяний енергетичний реактор (ВВЕР).

© В. И. Скалозубов, И. Л. Козлов, А. А. Гудима, 2015

**Т**яжелая авария в корпусном реакторе второго блока АЭС «Три-Майл-Айленд», США, произошедшая в 1997 году, положила начало глубоким исследованиям в области моделирования и анализу аварий с повреждением ядерного топлива.

Одним из ключевых вопросов моделирования и анализа тяжелых аварий является оценка условий сохранения целостности защитных барьеров безопасности (контейнмента и корпуса реактора). Многочисленными теоретическими и экспериментальными исследованиями (аналитические обзоры которых приведены, например, в [1–4]) установлено, что основные механизмы разрушения защитных барьеров безопасности (ЗББ) связаны с парогазовыми взрывами (детонация водорода и/или паровые взрывы) и непосредственным контактом ЗББ с топливосодержащими массами (ТСМ).

Разрушительные парогазовые взрывы с катастрофическими экологическими последствиями в результате тяжелых аварий в ядерных реакторах энергоблоков №№ 1–3 и в районе бассейна выдержки отработанного ядерного топлива энергоблока № 4 АЭС «Фукусима Даичи» убедительно «продемонстрировали» актуальность воздействия парогазовой детонации на целостность ЗББ. Конечно, недостаток объективной информации о происходивших процессах и состояниях ЗББ до возникновения взрывов не позволяет сделать однозначные выводы о коренных причинах, условиях и механизмах разрушительных детонаций. Предварительный анализ имеющейся на тот момент информации, проведенный в [5], позволяет лишь предположить, что: а) на блоке № 1 произошел взрыв водорода вне контейнмента; б) на блоке № 2 произошло несколько паровых взрывов внутри контейнмента; в) на блоке № 3 произошел паровой взрыв, инициировавший более мощную водородную детонацию; г) в районе бассейна выдержки отработанного ядерного топлива блока № 4 произошел взрыв водородсодержащей среды.

Можно также вспомнить, что именно парогазовый взрыв на блоке № 4 Чернобыльской АЭС стал основной причиной катастрофических последствий.

В «дофукусимский» период основное внимание специалистов уделялось моделированию и анализу процессов горения (детонации) водорода в контейнменте корпусных реакторов типов PWR, ВВЭР (контейнменты ВВЭР заполнены инертными газами). Фактически полагалось, что в реакторах обеспечена достаточная вентиляция по удалению парогазовой среды (даже при исходных аварийных событиях с «плотным» реакторным контуром), а вероятность возникновения паровых взрывов в реакторе или контейнменте крайне незначительна. В качестве условий (критериев) возникновения водородного взрыва обычно использовалась известная диаграмма Шапиро—Монффетти в координатах объемной концентрации «водород — пар»; критические концентрации водорода — более 4 % [3, 4].

Относительно «дофукусимских» разработок в области моделирования и анализа возникновения парогазовых взрывов при тяжелых авариях в корпусных реакторах можно отметить следующее [1–5]):

1. Отсутствуют достаточно обоснованные критерии возникновения паровых взрывов при различных сценариях и стадиях развития тяжелых аварий.

2. Критерии взрыва водорода в диаграмме Шапиро—Монффетти обоснованы для квазистатических процессов. При существенно динамических процессах, характерных для начальных моментов развития тяжелых аварий на разных стадиях или для «быстротекущих» сценариев

разрушения ЗББ, критерии возникновения водородной детонации могут зависеть также от скорости изменения концентрации водорода, а соответственно, и от скорости изменения теплогидродинамических и термохимических параметров [5].

3. Уроки Фукусимской аварии показали, что общепринятый ранее принцип исключения из рассмотрения (моделирование, анализ и противоаварийные мероприятия) относительно маловероятных событий (в том числе паровых взрывов) недопустим.

В «пост-фукусимский» период авторами монографии [5] на основе упрощенного моделирования нестационарных теплогидродинамических процессов на внутри- и внекорпусной стадиях тяжелых аварий были предложены критерии возникновения парогазовых взрывов в форме зависимостей от предельно допустимых скоростей роста удельной энтальпии ( $i_T$ ) топливосодержащих масс (ТСМ) и давления ( $P$ ) в парогазовой среде. На основе полученных критериев в [5] на качественном уровне оценены эффективные области управления тяжелыми авариями для предотвращения парогазовых взрывов по расходу охлаждения ТСМ и вентиляции реактора (контейнмента). Однако практическое применение полученных критериев ограничивается избыточной консервативностью допущений и недостаточной определенностью расчетных значений предельно допустимых скоростей роста значений  $i_T$  и  $P$ .

В представленной работе рассматривается альтернативный метод оценки критериев (условий) возникновения парогазовых взрывов на основе анализа теплогидродинамической неустойчивости процессов при тяжелых авариях на внутри- и внекорпусных стадиях. Под паровым взрывом здесь подразумевается ударная волна интенсивного импульса давления, вызванного процессами межфазного взаимодействия.

В качестве критерия возникновения парового взрыва определены условия спонтанного роста импульса давления, зависящие, в общем случае, от начальных и граничных условий сценариев развития тяжелых аварий и соответствующих механизмов процессов межфазного взаимодействия.

В качестве критерия возникновения водородной детонации предлагаются условия спонтанного устойчивого роста температуры ТСМ, зависящие, в общем случае, от начальных и граничных условий сценариев развития тяжелых аварий, а также от текущих параметров, определяющих процессы межфазного взаимодействия и внутреннего энерговыделения ТСМ. В отличие от общепринятых критериев водородной детонации (по предельной локальной концентрации водорода), предлагаемый критерий основан на том, что спонтанный устойчивый рост температуры ТСМ является достаточным условием генерации критических концентраций водорода в результате парциркулированной реакции.

Другие положения и допущения метода оценки условий возникновения парогазовых взрывов в корпусных реакторах и контейнментах на основе теории теплогидродинамической неустойчивости заключаются в следующем:

1. Моделируется установившаяся во времени динамический процесс развития тяжелой аварии при возникновении случайных (флуктуационных) «малых» возмущений (относительно установившихся) определяющих параметров парогазовых взрывов (удельная энтальпия/температура ТСМ  $i_T/T_{Тн}$  и давление в парогазовом объеме  $P$ ).

В зависимости от состояния системы и обратных связей взаимодействующих процессов такие возмущения могут либо «затухать» со временем (процесс устойчив), либо спонтанно возрастать (процесс неустойчив). Условия спонтанного возрастания давления и температуры ТСМ полагаются условиями возникновения парогазовых взрывов (парового взрыва и детонации водорода).

2. Основным источником интенсивного парообразования и генерации водорода служат межфазные теплогидродинамические процессы и термохимические реакции ТСМ.

3. Для упрощения анализа полагается, что изменения плотности внутренних источников энергии ТСМ ( $Q_{VT}$ ), тепловых потоков между ТСМ и парогазовой средой ( $q_{ПТ}$ ), а также между ТСМ и жидким охладителем ( $q_{ЖТ}$ ) определяются изменениями энтальпии (температуры) ТСМ. Изменения плотности парогазовой среды ( $\rho_{П}$ ), скорости конденсации ( $G_{КОН}$ ) и распространения возмущений ( $a_{П}$ ) определяются изменениями давления в парогазовой среде.

Также консервативно полагается, что расход охлаждения ( $G_{ЖО}$ ) полностью идет на парообразование в результате теплового межфазного взаимодействия с ТСМ.

Тогда, с учетом принятых допущений, скорости изменения удельной энтальпии ТСМ и давления (определяющих параметров парогазовых взрывов) можно представить в таком виде [5]:

$$\frac{di_T}{dt} = \frac{Q_{VT}(i_T) - q_{ПТ}(i_T) \Pi_{ПТ} - q_{ЖТ}(i_T) \Pi_{ЖТ}}{M_T} = K_1(i_T), \quad (1)$$

$$\frac{dP}{dt} = \frac{G_{ЖО} - G_{КОН}(P) \cdot (1 - \rho_{П} / \rho_{Ж}) - G_{ВЕН}}{V_{ПГ} \left[ \frac{1}{a_{П}^2(P)} + \frac{\partial \rho_{П}}{\partial i_{П}} \cdot \frac{\partial i_{П}}{\partial P} \right]} = K_2(P), \quad (2)$$

где  $\Pi_{ПТ}$ ,  $\Pi_{ЖТ}$  — контактная площадь поверхности теплообмена между парогазовой средой и ТСМ, жидким охладителем и ТСМ, соответственно;  $M_T$  — общая масса ТСМ;  $G_{ЖО}$ ,  $G_{ВЕН}$  — массовые расходы жидкого охладителя и вентиляции парогазовой среды, соответственно;  $\rho_{П}$ ,  $\rho_{Ж}$  — плотность парогазовой среды и жидкости, соответственно;  $V_{ПГ}$  — «свободный» парогазовый объем;  $K_1$ ,  $K_2$  — критерии возникновения парогазовых взрывов.

Текущие значения всех параметров, входящих в правую часть (1) и (2), могут быть определены на основе детализированного моделирования «тяжелоаварийными» кодами при начальных и граничных условиях различных сценариев развития тяжелой аварии на внутри- и внекорпусной стадиях (например, [4]).

В возмущениях ( $\delta$ ) определяющих параметров парогазовых взрывов при тяжелых авариях уравнения (1), (2) имеют вид

$$\frac{d\delta i_T}{dt} = \frac{\partial K_1}{\partial i_T} \delta i_T, \quad (3)$$

$$\frac{d\delta P}{dt} = \frac{\partial K_2}{\partial P} \delta P. \quad (4)$$

Решения (3), (4):

$$\delta i_T(t) \approx \exp \left( \int_0^t \frac{\partial K_1}{\partial i_T} dt \right), \quad (5)$$

$$\delta P(t) \approx \exp \left( \int_0^t \frac{\partial K_2}{\partial P} dt \right). \quad (6)$$

Таким образом, теплогидродинамический критерий возникновения водородной детонации

$$\frac{\partial K_1}{\partial i_T}(t) > 0, \quad (7)$$

а теплогидродинамический критерий возникновения парового взрыва

$$\frac{\partial K_2}{\partial P}(t) > 0. \quad (8)$$

Текущие значения критериев парогазовых взрывов в процессе развития тяжелой аварии определяются на основе численного дифференцирования феноменологических зависимостей, моделирующих плотность внутренних источников энерговыделений ТСМ, межфазного тепло-массообмена, скорости конденсации и распространения возмущений в парогазовой бреше, а также текущих значений расходов охлаждения и вентиляции, температуры ТСМ и давления в парогазовом объеме.

Предложенные критерии парогазовых взрывов могут применяться только как дополнения к детализированным кодам, моделирующим изменения текущих теплогидродинамических параметров в процессе развития тяжелых аварий при начальных и граничных условиях различных сценариев на внутри- и внекорпусных стадиях.

Основные ограничения предложенного метода связаны с принятыми допущениями и упрощениями, что и составляет предмет дальнейшего изучения и усовершенствования.

#### Список использованной литературы

1. IAEA. Training in Level 2 PSA. Severe Accident Phenomena. [Электронный ресурс]. — Режим доступа : [http://www-ns.iaea.org/downloads/ni/training/specific\\_expert\\_knowledge/psa-level2/E2 %20 %20Exercise%20on%20Sev%20Accident%20Phenom.pdf](http://www-ns.iaea.org/downloads/ni/training/specific_expert_knowledge/psa-level2/E2%20Exercise%20on%20Sev%20Accident%20Phenom.pdf)

2. Кузнецов Ю. Н. Теплообмен в проблеме безопасности ядерных реакторов / Ю. Н. Кузнецов. — М. : Энергоатомиздат, 1989. — 296 с.

3. Скалозубов В. И. Основы управления запроектными авариями с потерей теплоносителя на АЭС с ВВЭР / В. И. Скалозубов, А. А. Ключников, В. Н. Кольханов. — Чернобыль : ИПБ АЭС НАНУ, 2010. — 400 с.

4. Support provided by the SARNET in the Framework Programs of Research of the European Commission // Academic press is an imprint of Elsevier. — 2012.

5. Анализ причин и последствий аварии на АЭС Fukushima как фактор предотвращения тяжелых аварий в корпусных реакторах / В. И. Скалозубов, А. А. Ключников, В. Н. Вашенко, С. С. Яровой. — Чернобыль : ИПБ АЭС НАНУ, 2012. — 280 с.

#### References

1. IAEA, "Training in Level 2 PSA. Severe Accident Phenomena", available at: [http://www-ns.iaea.org/downloads/ni/training/specific\\_expert\\_knowledge/psa-level2/E2 %20 %20Exercise%20on%20Sev%20Accident%20Phenom.pdf](http://www-ns.iaea.org/downloads/ni/training/specific_expert_knowledge/psa-level2/E2%20Exercise%20on%20Sev%20Accident%20Phenom.pdf).

2. Kuznetsov, Yu. N. (1989), Heat Transfer for Nuclear Reactor Safety [Теплообмен в проблеме безопасности ядерных реакторов], Moscow, Energoatomizdat, 296 p. (Rus)

3. Skalozubov, V.I., Kluchnikov, A. A., Kolykhanov, V. N. (2010), Management of Beyond Design-Basis Accidents with Loss of Coolant at NPPs with WWER: monograph [Osnovy upravleniya zaproektnimi avariyami s poterey teplonositelya na AES s VVER: monografiya], Chornobyl, Institute for Safety Issues of Nuclear Power Plants, 400 p. (Rus)

4. Support provided by the SARNET in the Framework Programs of Research of the European Commission (2012), Academic Press, Elsevier.

5. Skalozubov V. I., Kluchnikov A. A., Vaschenko V. N., Yarovoi S. S. (2012), Analysis of Causes and Consequence of Fukushima NPP Accident for Prevention of Severe Accidents in Vessel-Type Reactors: monograph [Analiz prichin i posledstviy avarii na AES Fukushima kak faktor predotvrascheniya tiazhelykh avarii v korpusnykh reaktorakh: monografiya], Chornobyl, Institute for Safety Issues of Nuclear Power Plants, 280 p. (Rus)

Получено 24.10.2014.