

<sup>1</sup> Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, ул. Лысогорская, 12, корп. 106, Киев, 03028, Украина

<sup>2</sup> Одесский национальный политехнический университет, просп. Шевченко, 1, Одесса, 65044, Украина

<sup>3</sup> НТУУ «Киевский политехнический институт», ул. Политехническая, 6, Киев, 03056, Украина

## УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПАРОВЫХ ВЗРЫВОВ ПРИ АВАРИЯХ В КОРПУСНЫХ РЕАКТОРАХ

Развиваются разработки авторов в отношении моделирования условий возникновения паровых взрывов в реакторах при авариях с различным исходным состоянием реакторного контура. Показано, что даже при открытии предохранительных клапанов реактора и больших течах реакторного контура паровые взрывы возможны при определенных соотношениях интенсивности парообразования и «вентиляции» реактора. Поэтому возможность возникновения паровых взрывов в общем случае необходимо учитывать при моделировании аварий и анализе безопасности корпусных реакторов.

*Ключевые слова:* авария, корпусный реактор, паровой взрыв.

Разрыв днища корпуса приводит к существенному изменению характеристик протекания тяжелой аварии. Выброс обломков/расплава активной зоны в контейнмент представляет существенную угрозу целостности контейнмента, влияет на пути распространения радиоактивных продуктов и многие другие аспекты всего протекания аварии. Некоторые характеристики повреждения корпуса влияют на переход от периода протекания аварии «внутри корпуса» к периоду «вне корпуса» реактора. Наиболее важной из них является давление, при котором происходит разрыв корпуса реактора.

Паровой взрыв может привести к резкому увеличению генерации пара и водорода, а также к сильному механическому воздействию на конструкционные элементы реактора и, в первую очередь, на корпус или гермооболочку 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).

Расчетная модель возникновения парового взрыва в реакторе при тяжелых авариях представлена на рисунке.

В рамках принятых допущений, следуя [1], уравнения массового и теплового баланса имеют вид

$$\frac{d\rho_{\text{пр}} V_{\text{пр}}}{dt} = G_{\text{ип}} - G_{\text{пк}} - G_{\text{ок}}, \quad (1)$$

$$\rho_{\text{в}} \frac{dV_{\text{в}}}{dt} = G_{\text{ок}} - G_{\text{те}} - G_{\text{ип}}, \quad (2)$$

$$K_{\text{т}} F_{\text{аз}} (T_{\text{ят}} - T_{\text{ок}}) = G_{\text{ок}} i_{\text{ок}} + G_{\text{те}} i_{\text{те}} + G_{\text{ип}} r, \quad (3)$$

где  $\rho_{\text{пр}}$ ,  $\rho_{\text{в}}$  – плотность парогазового объема и водного теплоносителя соответственно;  $V_{\text{пр}}$ ,  $V_{\text{в}}$  – «свободный» (от внутриреакторных конструкций и топлива) парогазовый и водный объем реактора соответственно;  $t$  – время;  $G_{\text{ип}}$  – интенсивность парообразования;  $G_{\text{пк}}$  – расход через предохранительный клапан реактора;  $G_{\text{ок}}$  – расход система аварийного охлаждения активной зоны;  $i_{\text{ок}}(T_{\text{ок}})$ ,  $i_{\text{те}}(T_{\text{те}})$  – удельная энтальпия (температура) охлаждающей и вытекающей среды соответственно;  $K_{\text{т}}$  – приведенный коэффициент теплопередачи между ядерным топливом и окружающей средой;  $F_{\text{аз}}$  – площадь поверхности теплообмена активной зоны и/или топливосодержащих масс;  $r$  – скрытая теплота парообразования.

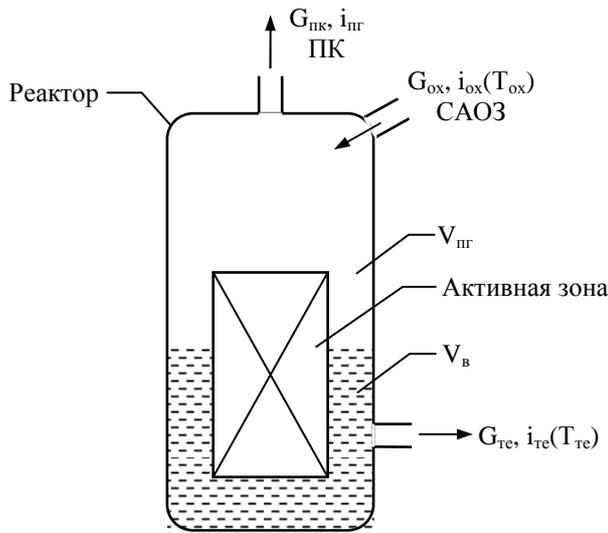
Из уравнения (3) следует

$$G_{\text{ип}} = \frac{1}{r} [K_{\text{т}} F_{\text{аз}} (T_{\text{ят}} - T_{\text{ок}}) - G_{\text{ок}} i_{\text{ок}} - G_{\text{те}} i_{\text{те}}]. \quad (4)$$

Расходы через предохранительный клапан реактора и в течь реакторного контура в зависимости от режимов истечения [2]

$$G_{\text{пк}} = \begin{cases} F_{\text{пк}} \sqrt{2\mu_{\text{пк}} \rho_{\text{пр}} (P - P_0)}, & w_{\text{пк}} < a; \\ \rho_{\text{пр}} F_{\text{пк}} a, & w_{\text{пк}} \geq a, \end{cases} \quad (5)$$

© В. И. Скалозубов, И. Л. Козлов, С. В. Клевцов, 2015



Расчетная модель возникновения парового взрыва в реакторе при авариях.

$$G_{те} = \begin{cases} F_{те} \sqrt{2\mu_{те}\rho_{пр}(P - P_o)}, & w_{те} < a; \\ \rho F_{те} a, & w_{те} \geq a, \end{cases} \quad (6)$$

где  $\mu_{пк}$ ,  $\mu_{те}$  – коэффициент расхода через предохранительный клапан и течь соответственно;  $P$ ,  $P_o$  – давление в реакторе и гермообъеме соответственно;  $w_{пк}$ ,  $w_{те}$  – скорость истечения среды через предохранительный клапан и течь соответственно;  $a$  – скорость распространения возмущений в истекающей среде (скорость звука). После преобразований уравнений (1) – (3) получим условия возникновения парового взрыва при флуктуационных возмущениях давления  $\delta P$  в парогазовой среде

$$\frac{d\delta P}{dt} = K_{пв} \delta P, \quad (7)$$

где критерий условий возникновения парового взрыва

$$K_{пв} = \frac{\frac{\partial G_{пр}}{\partial P} - \frac{\partial G_{пк}}{\partial P} - \frac{\partial G_{ox}}{\partial P}}{V_{пр} \frac{d\rho_{пр}}{dP} + \frac{dV_{пр}}{dP} \frac{di_{пр}}{dP}}. \quad (8)$$

Решение (7) имеет вид

$$\delta P \approx \exp(K_{пв} t). \quad (9)$$

Из уравнения (9) следуют консервативные условия возникновения парового взрыва в реакторе

$$K_{пв} > 0. \quad (10)$$

Физический смысл полученного условия возникновения парового взрыва (10) заключается в том, что если в текущий момент развития аварии значение  $K_{пв}$  положительно, то любое флуктуационное возмущение в парогазовой среде приведет к аperiodической неустойчивости и резкому (скачкообразному) росту давления – паровой взрыв. Если  $K_{пв} < 0$ , то возмущения  $\delta P$  будут затухать и условия парового взрыва отсутствуют.

Входящие в критерий  $K_{пв}$  текущие теплогидродинамические параметры определяются на основе результатов детерминистского моделирования конкретных аварийных процессов (при полном спектре исходных событий), а производные этих параметров – на основе аналитических или численных методов.

Рассмотрим отдельные аварийные ситуации в отношении условий возникновения парового взрыва на основе полученного критерия  $K_{пв}$ .

*Аварии с исходным событием «Плотный реакторный контур»* ( $G_{те} = 0$ ). В этом случае определяющим параметром является пропускная способность предохранительного клапана реактора (ИПУ КД для ВВЭР). Однако даже открытие предохранительного клапана не является достаточным условием предотвращения парового взрыва при

$$\frac{\partial G_{пр}}{\partial P} > \frac{\partial G_{пк}}{\partial P} - \left| \frac{\partial G_{ox}}{\partial P} \right|. \quad (11)$$

В случае отказа на открытие предохранительного клапана (запроектные аварии с множественными отказами) паровой взрыв практически неизбежен.

*Аварии с исходным событием «Неплотный реакторный контур».* В этом случае течи реакторного контура способствуют естественному снижению давления; однако даже при больших течах, соответствующих уровню максимальной проектной аварии, необходимое условие предотвращения парового взрыва

$$K_T F_{аз} (T_{ят} - T_{ок}) \leq G_{ок} i_{ок} + G_{те} i_{те}. \quad (12)$$

В случае сохранения целостности оболочек твэлов условие (12) может выполняться, так как значения приведенного коэффициента теплопередачи от ядерного топлива в окружающую среду относительно малы ввиду газового зазора твэла и низкой теплопроводности UO<sub>2</sub>-топлива. При нарушении герметичности оболочек твэлов (температура оболочек более 1200 °С) охлаждающая реактор среда входит в прямой контакт с высокотемпературным ядерным топливом (более 2000 °С), что способствует значительному увеличению  $K_T$  и интенсивности парообразования. В этом случае паровой взрыв может произойти и при больших течах реакторного контура.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Анализ причин и последствий аварии на АЭС Fukushima как фактор предотвращения тяжелых аварий в корпусных реакторах* / В. И. Скалозубов, А. А. Ключников, В. Н. Ващенко, С. С. Яровой. – Чернобыль: ИПБ АЭС НАН Украины, 2012. – 280 с.
2. *Научно-технические основы мероприятий повышения безопасности АЭС с ВВЭР* / В. И. Скалозубов, А. А. Ключников, Ю. А. Комаров, А. В. Шавлаков. – Чернобыль: ИПБ АЭС НАН Украины, 2010. – 200 с.

**В. И. Скалозубов<sup>1</sup>, И. Л. Козлов<sup>2</sup>, С. В. Клевцов<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> *Институт проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Лисогірська, 12, корп. 106, Київ, 03028, Україна*

<sup>2</sup> *Одеський національний політехнічний університет, просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна*

<sup>3</sup> *НТУУ «Київський політехнічний інститут», вул. Політехнічна, 6, Київ, 03056, Україна*

#### УМОВИ ВИНИКНЕННЯ ПАРОВИХ ВИБУХІВ ПІД ЧАС АВАРІЙ У КОРПУСНИХ РЕАКТОРАХ

Розвинуто розробки авторів щодо моделювання умов виникнення парових вибухів у реакторах під час аварій з різним вихідним станом реакторного контуру. Показано, що навіть під час відкриття запобіжних клапанів реактора та великих течях реакторного контуру парові вибухи можливі за умов певних співвідношень інтенсивності паротворення і «вентиляції» реактора. Тому можливість виникнення парових вибухів у загальному випадку необхідно враховувати під час моделювання аварій та аналізу безпеки корпусних реакторів.

*Ключові слова:* аварія, корпусний реактор, паровий вибух.

**V. I. Skalozubov<sup>1</sup>, I. L. Kozlov<sup>2</sup>, S. V. Klevtsov<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> *Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants NAS of Ukraine, Lysogirska str., 12, building 106, Kyiv, 03028, Ukraine*

<sup>2</sup> *Odesa national polytechnic university, Shevchenko Blvd., 1, Odesa, 65044, Ukraine*

<sup>3</sup> *NTUU "Kyiv Polytechnic Institute", Politekhnichna str., 6, Kyiv, 03056, Ukraine*

#### CONDITIONS OF APPEARANCE OF STEAM EXPLOSIONS DURING ACCIDENTS IN TANK REACTORS

The paper develops studies of authors concerning modelling of conditions of appearance of steam explosions in reactors during accidents with various initial conditions of a reactor loop. The work shows that steam explosions are possible at certain ratios of rates of steam generation and "venting" of the reactor even when safety valves of the reactor are opened and large leaks of a reactor loop are available. Therefore, possibility of steam explosions generally needs to be considered during the modelling of accidents and the safety analysis of tank reactors.

*Keywords:* accident, tank reactor, steam explosion.

#### REFERENCES

1. *Analysis of Causes and Consequences of Accident at NPP Fukushima as Prevention Factor of Severe Accidents in Tank Reactors: monograph* / V. I. Skalozubov, A. A. Kliuchnykov, V. N. Vashchenko, S. S. Yarovoi. – Chernobyl: Institut problem bezpeky AES NAN Ukraine (Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants), 2012. – 280 p. (Rus)
2. *Scientific and Technical Basics of Arrangements to Improve a Safety of NPPs with WWER: monograph* / V. I. Skalozubov, A. A. Kliuchnykov, Yu. A. Komarov, A. V. Shavlakov. – Chernobyl: Institut problem bezpeky AES NAN Ukraine (Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants), 2010. – 200 p. (Rus)

Надійшла 18.05.2015

Received 18.05.2015