

**С. В. Васильченко<sup>1</sup>, С. Л. Волошина<sup>2</sup>, Т. В. Габлая<sup>2</sup>, В. Ю. Кочнева<sup>2</sup>,  
К. В. Скалзубов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>НАЭК «Энергоатом», ул. Ветрова, 3, Киев, 01032, Украина

<sup>2</sup>Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, ул. Лысогорская, 12, корп. 106, Киев, 03028, Украина

## **АНАЛИЗ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ ПРИЧИН ТЯЖЕЛЫХ АВАРИЙ НА АЭС FUKUSHIMA-DAIICHI**

Проводится анализ неопределенностей причин тяжелых аварий на АЭС Fukushima-Daiichi, связанных с состоянием активной зоны и корпусов реакторов, природой и механизмами возникших парогазовых взрывов, эффективностью действий персонала по снижению давления в контайнменте и охлаждению поврежденного топлива.

*Ключевые слова:* тяжелая авария, контайнмент, водородсодержащая паровоздушная смесь, топливосодержащие материалы, исходное событие аварии.

Предварительный анализ коренных причин возникновения тяжелых аварий на АЭС Fukushima-Daiichi возможен на основе проектно-конструкторских данных, анализа хронологии и последствий событий, а также моделирования условий развития аварийных процессов.

Исходные события тяжелых аварий на энергоблоках № 1 – 3 АЭС Fukushima-Daiichi явилась потеря (отказ) аварийного электроснабжения от дизель-генератора (ДГ) в результате цунами и запроектного затопления (рис. 1). Высота волны цунами вблизи промплощадки АЭС Fukushima-Daiichi достигла 14 м при высоте волнореза 5,7 м и высоте побережья 10 м над уровнем моря. Наиболее вероятным путем затопления ДГ в нижних помещениях турбинного отделения было поступление морской воды через траншеи для трубопроводов и кабелей, расположенных в 55 м от берега, совместно с водой контайнмента.

Отказ ДГ нарушил эффективную работоспособность систем аварийного охлаждения и отвода остаточных тепловыделений от активной зоны реакторов.

Одной из первых попыток оперативного моделирования (на качественном уровне) дальнейших процессов развития тяжелых аварий на остановленных реакторах энергоблоков № 1 – 3 АЭС Fukushima-Daiichi являются работы AREVA [2] (рис. 2):

отказ ДГ ⇒ отказ эффективной работоспособности насосов системы безопасности по охлаждению активной зоны и отводу остаточных тепловыделений ⇒ снижение уровня теплоносителя и «оголение» активной зоны реакторов ⇒ рост температуры топлива ⇒ интенсификация парциркуляционной реакции (образование газообразного водорода), повреждение топливных элементов (выделение высокорadioактивных газообразных продуктов) ⇒ попадание через барботажный бак контайнмента (Wetwell) высокорadioактивной парогазовой смеси в объем контайнмента.

Дальнейшие процессы, приведшие к парогазовым взрывам на энергоблоках № 1 – 3, в моделях AREVA [2] приведены на рис. 3:

1) превентивный (контролируемый) выброс высокорadioактивной парогазовой смеси через систему вентиляции контайнмента в атмосферу ⇒ взаимодействие водорода с кислородом воздуха ⇒ взрыв водорода над реакторным отделением (РО) энергоблоков № 1 и 3;

2) взрыв в пределах контайнмента на энергоблоке № 2.

Модель процессов развития тяжелых аварий с последующим горением/парогазовым взрывом в приреакторном бассейне выдержки ядерного топлива блока № 4 представлена на рис. 4 [2]:

снижение уровня теплоносителя в бассейне (наиболее вероятная причина – течь бассейна вследствие запроектного землетрясения) ⇒ «оголение» и рост температуры топлива ⇒ интенсификация парциркуляционной реакции (образование газообразного водорода) ⇒ горение/взрыв водорода.

К настоящему времени отсутствует достаточно объективная и полная информация о состоянии систем и оборудования в процессе развития аварий на блоках № 1 – 4 АЭС Fukushima-Daiichi, а также достаточно обоснованный детерминистский анализ всех возможных аварийных последовательностей, что затрудняет объективную оценку произошедших процессов и их коренных причин. На текущий момент мы располагаем недостаточно определенной (а иногда и противоречивой в разных ис-

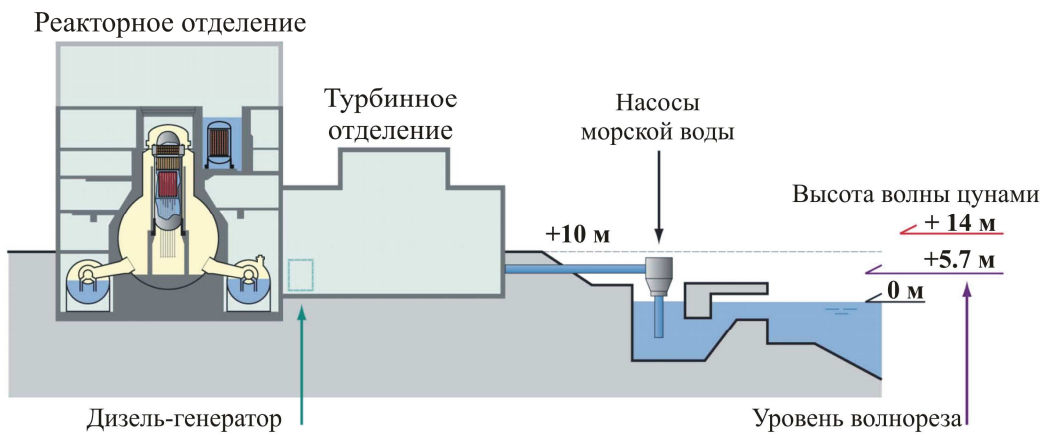
© С. В. Васильченко, С. Л. Волошина, Т. В. Габлая,  
В. Ю. Кочнева, К. В. Скалзубов, 2013

точниках) информацией о состоянии ядерного топлива, корпусов реакторов, контайнментов, бассейна выдержки отработанного ядерного топлива и других систем в процессе развития аварий. Также недостаточно объективной информации о действиях персонала по охлаждению реакторов, контайнмента и бассейна выдержки отработанного ядерного топлива, по превентивной (контролируемой) вентиляции контайнментов и др. Из хронологии событий следует также противоречивая информация об условиях и причинах возникновения парогазовых взрывов. Так, в отдельных источниках указывается, что на блоке № 2 произошел не один, а два взрыва внутри контайнмента (вечером 14 и утром 15 марта); в одних источниках подтвержден взрыв на блоке № 4, а в других – авария ограничивалась двумя последовательными пожарами (вероятно, дефлаграция водорода) и т.п. Поэтому пока актуальны следующие проблемы.

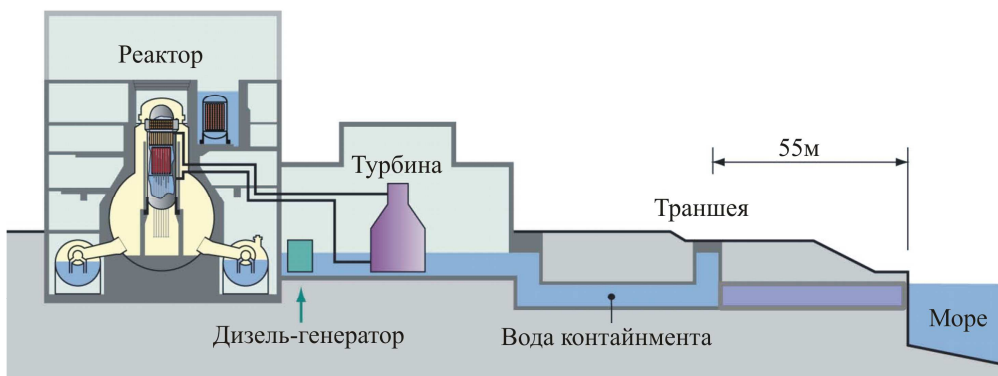
1. *Неопределенность состояния активной зоны и корпусов реакторов* в процессе развития аварий на энергоблоках № 1 – 3 определяет возможность разных сценариев.

При достижении температур топлива в реакторе более 1000 °С возможно разрушение/ расплавление активной зоны и формирование в нижней части реактора высокотемпературных топливосодержащих материалов (ТСМ), способных разрушить нижнюю часть корпуса реактора. В таком сценарии развития тяжелых аварий высокорadioактивная парогазовая смесь может дополнительно генерироваться в контайнменте.

Обобщенная модель гипотетических последовательностей аварии может привести к различным видам парогазовых взрывов (взрыв водорода/паровой энергетический взрыв/паровой взрыв с последующей детонацией водородсодержащей высокорadioактивной парогазовой смеси) как в пределах контайнмента, так и за его пределами.

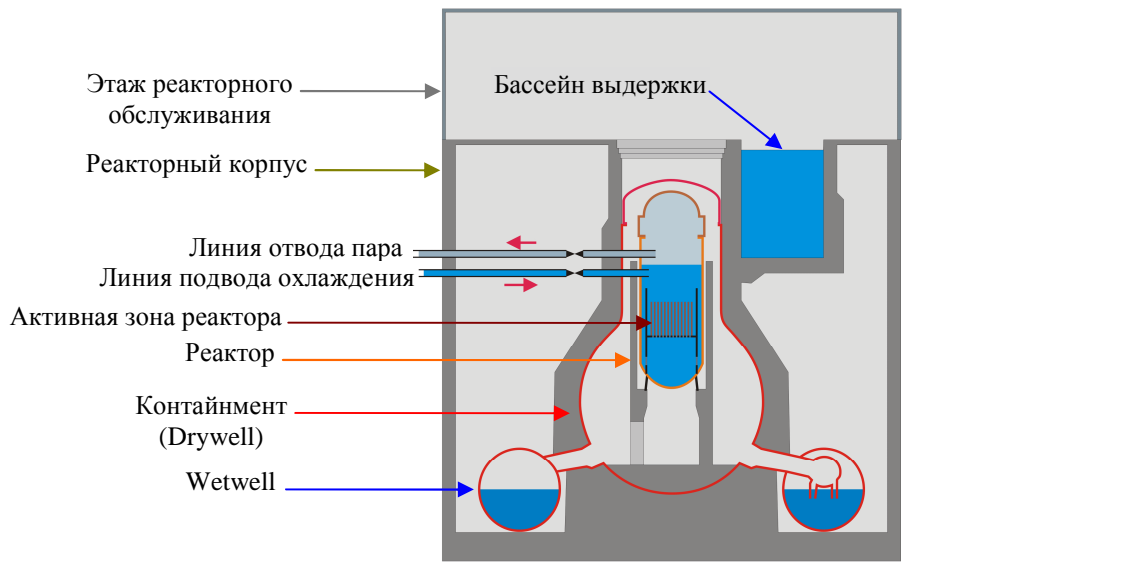


а) запроектная высота волны цунами (источник: JANTI)

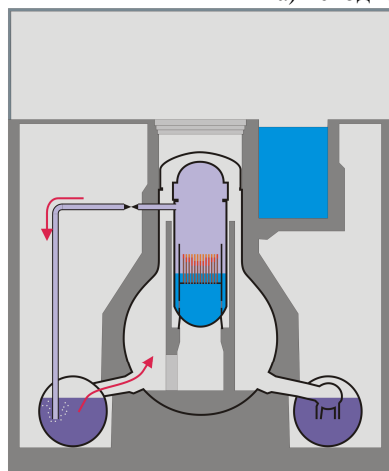


б) затопление ДГ в турбинных отделениях через траншеи с водой контайнмента (источник: МАГАТЭ, WNN)

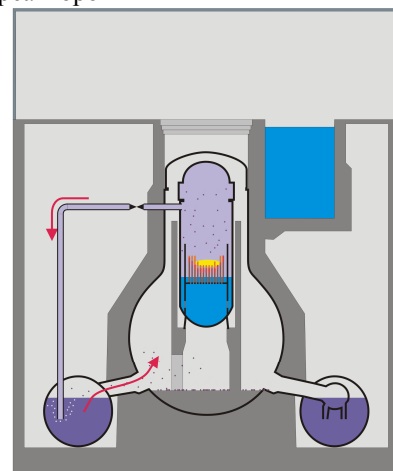
Рис. 1. Модель исходного события тяжелых аварий на энергоблоках № 1 – 4 АЭС Fukushima-Daiichi (потеря аварийного электроснабжения, вызванная затоплением промплощадки).



а) исходное состояние реакторов

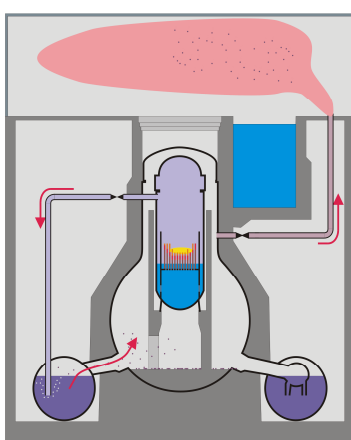


б) снижение уровня теплоносителя в реакторах –  
рост температуры топлива –  
пароциркониевая реакция –  
отвод парогазовой смеси в контейнмент

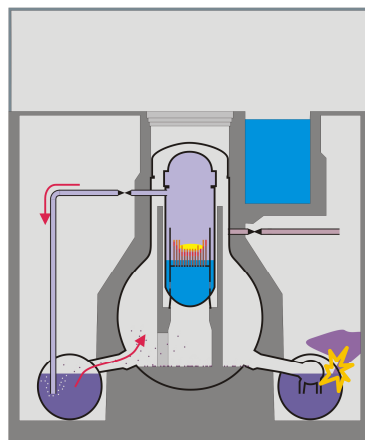


в) повреждение ядерного топлива в реакторах –  
поступление газообразных радиоактивных продуктов в контейнмент

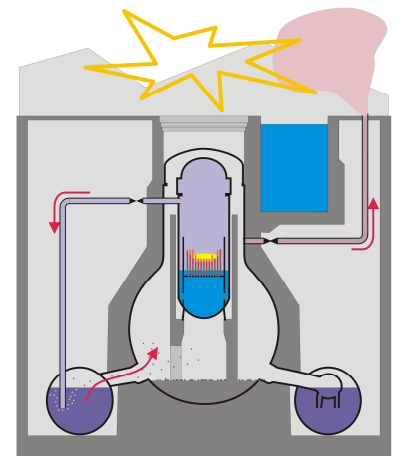
Рис. 2. Модель развития тяжелых аварий в реакторах энергоблоков № 1 – 3 АЭС Fukushima-Daiichi [2].



а) превентивный сброс парогазовой смеси из контейнмента в атмосферу



б) взрыв водорода за пределами контейнментов на блоках № 1 и 3



в) взрыв водорода в пределах контейнмента на блоке № 2

Рис. 3. Модель возникновения парогазовых взрывов на энергоблоках № 1 – 3 АЭС Fukushima-Daiichi [2].

Возможен также другой сценарий развития тяжелых аварий при возникновении парогазового взрыва в реакторе. В случае разрушения корпуса реактора в контайнмент могут попасть поврежденные ТСМ с последующими аварийными процессами по предыдущему сценарию. В случае отрыва верхнего блока реактора под воздействием парогазового взрыва последовательность развития тяжелых аварий на блоках № 1 – 3 АЭС Fukushima-Daiichi приведена на рис. 5.

2. Неопределенность природы и механизмов возникших парогазовых взрывов.

При предварительном анализе условий произошедших на блоках № 1 – 3 АЭС Fukushima-Daiichi взрывов специалисты разошлись во мнениях по поводу их природы. Так, в [1 – 4 и др.] указывалось, что взрывы на блоках № 1 – 3 с наибольшей вероятностью произошли по причине детонации водорода. Более того, специалисты VGB PowerTech [1] предполагают, что повреждение здания энергоблока № 2 в конечном итоге вызвано водородным взрывом на блоке № 3. Другие специалисты, опираясь на известные разработки [5, 6], полагают, что основным механизмом детонации, разрушившим верхнюю часть контайнмента блока № 3, был *паровой взрыв*.

Основными аргументами возникновения парового взрыва на блоке № 3 являются (см., например, [4]):

а) существенное отличие формы «грибовидного» облака и мощности взрыва на блоке № 3 от характерных водородных взрывов. Источниками парового взрыва вне корпуса реактора могли быть морская вода и поступающий в контайнмент расплав ядерного топлива;

б) устойчивые паровые факелы из разрушенной верхней части контайнмента на ранней стадии после взрыва;

в) соответствие наиболее теплонапряженных участков шахты контайнмента паровым факелам из контайнмента;

г) в соответствии с данными контроля и измерений [8] уровни воды в реакторе не смогли повыситься в течение длительного времени до взрыва (несмотря на поступающую охлаждающую воду), а непосредственно взрыв был связан со значительной скоростью изменения давления и резким его снижением после взрыва, характерным для паровых взрывов.

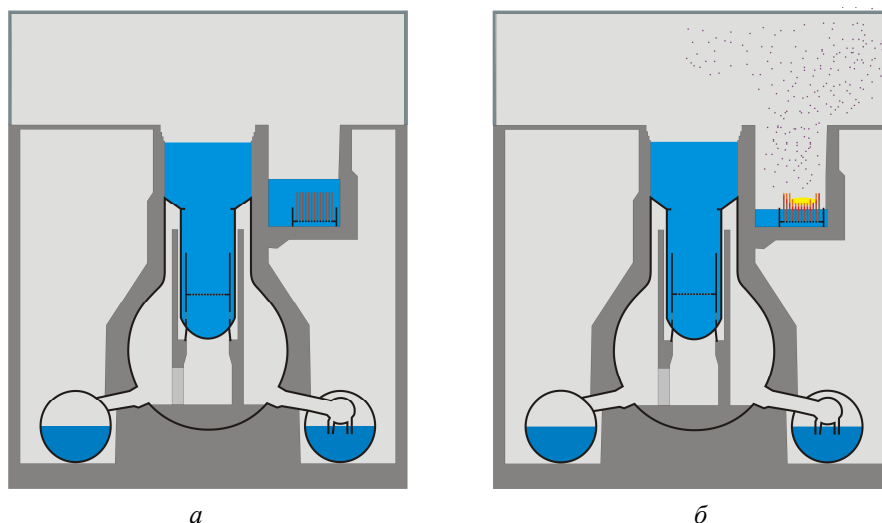


Рис. 4. Модель развития тяжелой аварии в бассейне выдержки ядерного топлива блока № 4 АЭС Fukushima-Daiichi [2]: а - исходное состояние бассейна выдержки; б - снижение уровня воды – рост температуры топлива – парциркуляция реакция, рост давления пара – взрыв.

Судя по последствиям (масштабы разрушений и длинная вертикальная трещина на стене реактора), взрыв на блоке № 3 был значительно мощнее, чем на блоках № 1 и 2. Возможной причиной повышенной мощности парогазового взрыва на блоке № 3 могло быть частичное использование плутонийсодержащего MOX-топлива (32 топливные сборки из 548), имеющего относительно низкую температуру плавления по сравнению с урановым топливом (UO<sub>2</sub>). Кроме того, согласно хронологии событий на блоке № 3 13 марта (до взрыва) было организовано расхолаживание через систему инжекционного впрыска теплоносителя в реакторный контур (которая позже отказала). До настоящего времени не определено однозначное влияние охлаждения водой уже поврежденного плутонийсодержащего топлива. Так, в [9] показано, что подача охлаждающей воды на расплавленное плутонийсодержащее топливо приводит к росту сечения захвата и деления, а также последующему «разгону» цепной реакции и резонансным механизмам.



Рис. 5. Обобщенная модель гипотетических последовательностей развития тяжелых аварий на блоках № 1 –3 АЭС Fukushima-Daiichi (ВПС – водородо-парогазовая смесь).

Аргументами возникновения исходного парового взрыва/взрывов в контейнменте блока № 2 могут быть ограниченность объема и заполненность контейнмента азотом, являющимся декатализатором взрывов водорода. Кроме того, согласно хронологии событий взрывы на блоках № 2 и 3 произошли более чем через сутки после превентивных сбросов давления в контейнментах (а соответственно, и удаления водорода) в отличие от блока № 1, где взрыв вне контейнмента произошел через 1,5 ч после начала сброса давления. Необходимым условием детонации водорода является его достаточная локальная концентрация и присутствие катализаторов/отсутствие декатализаторов. Учитывая повышенную летучесть водорода, возможность поддержания более суток его критической локальной концентрации в атмосфере/вне контейнмента является маловероятным феноменом.

Еще более неопределенная ситуация с основной причиной и механизмом возможного взрыва в бассейн выдержки ядерного топлива блока № 4: существовали необходимые условия как для водородного (пароциркониевая реакция, отсутствие декатализатора азота, пожары, вызванные, возможно, горением водорода), так и парового (интенсивное парообразование, ограниченность объема) взрыва. Однако, как указывалось выше, на текущий момент существует неопределенность самого факта взрыва на блоке № 4, а, тем более, его причин.

Таким образом, для выяснения объективных причин и факта возникновения парогазовых взрывов в процессе тяжелых аварий на АЭС Fukushima-Daiichi, приведших к катастрофическим последствиям, актуальны дополнительные глубокие детерминистские исследования. Положение осложняется еще и тем, что до настоящего времени в методическом обеспечении анализа безопасности ядерных реакторов фактически отсутствуют достаточно обоснованные детерминистские критерии (условия) возникновения паровых и водородных взрывов. Традиционно используемые диаграммы Шапиро - Монфетти определяют только критерии возникновения детонации водородсодержащей паровоздушной смеси в квазиравновесных («медленных») условиях протекания процессов, и их применение в общих случаях недостаточно обосновано.

*3. Неопределенность эффективности действий персонала по снижению давления в контейнменте и охлаждению расплавленного/поврежденного топлива.*

Действия по превентивному выбросу парогазовой смеси из контейнмента имели неоднозначное влияние на обеспечение безопасности и эффективности управления тяжелыми авариями на АЭС Fukushima-Daiichi. По данным [2] превентивные сбросы давления в контейнменте на блоке № 1 были 12 марта в 14:00 (взрыв в 15:36 вне контейнмента), на блоке № 2 – 13 марта в 0:00 (возможные взрывы внутри контейнмента вечером 14 и утром 15 марта), на блоке № 3 – 13 марта в 8:41 (взрыв 14 мар-

та в 11:01 вне контейнмента). Судя по этой информации, наиболее вероятной причиной взрыва был сброс давления в контейнменте, который привел к детонации водорода с кислородом воздуха вне контейнмента. Менее вероятны эти причины для блока № 3, так как взрыв произошел более чем через сутки после сброса давления. Еще менее вероятной причиной взрывов на блоке № 2 может быть превентивный сброс давления: взрыв/взрывы произошли через двое суток и внутри контейнмента.

Возможные причины этих различий могут быть связаны с имевшими место разными условиями и механизмами возникновения парогазовых взрывов, а также неоднозначностью влияния превентивных выбросов из контейнмента. С одной стороны, эти выбросы способствовали снижению давления и удалению водорода из контейнмента (положительный эффект для неразрушения контейнмента и предотвращения парогазовых взрывов в контейнменте). С другой стороны, выбросам сопутствовало удаление из контейнмента декатализирующей детонацию водорода азотной среды, а поступивший в атмосферу из контейнмента водород контактирует с кислородом воздуха, который является катализатором водородной дефлаграции и детонации (отрицательный эффект для взрывобезопасности водорода).

Недостаточно определенным эффектом являются действия персонала по охлаждению водой высокотемпературного/поврежденного топлива. В работах [10, 11] показано, что подача охлаждающей воды после начала пароциркониевого химического взаимодействия (в объемах, недостаточных для необходимого снижения температуры в разрушенной активной зоне) только может усугубить ситуацию, провоцируя еще большие объемы образования водорода. При этом, кроме образования водорода и выделения теплоты, пароциркониевая реакция естественно сопровождается охрупчиванием оболочки твэлов и уменьшением ее исходной толщины за счет окислирования циркония. Начинаясь при температуре примерно 950 °С, пароциркониевая реакция становится самоподдерживающейся при температуре, превышающей 1200 °С. Расчеты показывают, что кинетика реакции такова, что за 10 – 12 мин происходит окисление оболочки с уменьшением толщины оболочки твэлов на 0,13 мм и разогревом ее до температуры плавления.

Как указывалось выше, неопределенным также является эффект от организации охлаждения водой поврежденного МОХ-топлива на блоке № 3 [9], связанный со спецификой нейтронно-физических процессов в плутонии при относительно высоких температурах.

Неопределенность эффективности и целесообразности действий персонала в процессе управления тяжелыми авариями на АЭС Fukushima-Daiichi связана также с неопределенностью влияния эффекта на безопасность процессов возможного смешения охладителей борного раствора с неборированной водой (например, морской водой, которую подавали в защитный барьер безопасности в процессе аварий). Известно, что при определенных условиях такие смешения могут иметь существенно отрицательный эффект на обеспечение условий безопасности [9]. Однако этот эффект в настоящее время недостаточно изучен (особенно для условий остановленных реакторов с высокотемпературным поврежденным топливом).

Эти факты указывают на недостаточную обеспеченность персоналом обоснованных действий по эффективному управлению тяжелыми авариями в отношении охлаждения высокотемпературного топлива и предотвращения парогазовых взрывов и их последствий для безопасности. Обоснование эффективных действий по управлению подобными тяжелыми авариями требует дальнейших глубоких научных исследований.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Braun M.* The Fukushima Daiichi Incident. – AREVA NP, 2011. – 33 p.
2. *Impact to TEPCO's Facilities due to Miyagiken-Oki Earthquake (as of 3:00PM).* – TEPCO Press Release, March 13, 2011.
3. *The Accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations.* – Report of Japanese Government to the IAEA Ministerial Conference on Nuclear Safety. – Chapter 4. – 2011.
4. *Moriyama K. et al.* Evaluation of Containment Failure Probability by Ex-Vessel Steam Explosion in Japanese LWR Plants // *Journal of Nuclear Science and Technology.* – 2006. – 43(7). – P. 774 – 784.
5. *Evaluating the Risk of Steam Explosions.* – Nuclear Safety Research. – JAEA R&D Review. – 2006. – 83 p.
6. *Goddard I.* Fukushima Unit 3: Steam-Explosion Theory. – www.LewRockwell.com. – 2011.
7. *Unit3 D/W pressure rate of change (MPa/h) in the period 0-96 hours after quake.* TEPCO raw data for Unit 3. 2011.
8. *Rusov V., Linnik E., Vaschenko et al.* Traveling Wave reactor and Condition of Existence of Nuclear Burning Soliton-Like Wave in Neutron-Multiplying Media // *Energies.* – 2011. – No. 4. – P. 1337 – 1361.
9. *Погосов А. Ю.* Физико-технический анализ латентных факторов развития аварийных процессов в энергоблоках АЭС Фукусима-1 // *Ядерная и радиационная безопасность.* – 2012. – № 1.

10. Pogosov A. Yu., Gerliga V. A., Domashev Ye. D. Current Methods of Empirical Analysis of the Thermohydraulic Stability of Steam-Generating Channels and the Development with Consideration of the Feasibility of Employing the Noise of Operating Parameters (A Review) // Heat Transfer Research. – 1997. – Vol. 26, No. 3-8. – Reprint: Begell House, Inc. ISSN 1064-2269. – P. 502 – 510.
11. Казачков И. В. Современное состояние и некоторые проблемы моделирования тяжелых аварий на зарубежных АЭС // Ядерная и радиационная безопасность. – 2003. – № 1. – С. 25 – 34.

**С. В. Васильченко, С. Л. Волошина, Т. В. Габлая, В. Ю. Кочнева, К. В. Скалозубов**

<sup>1</sup>НАЕК «Енергоатом», вул. Ветрова, 3, Київ, 01032, Україна

<sup>2</sup>Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Лисогірська, 12, корп. 106, Київ, 03028, Україна

#### **АНАЛІЗ НЕВИЗНАЧЕНОСТЕЙ ПРИЧИН ВАЖКИХ АВАРИЙ НА АЕС ФУКУСИМА-ДАІЦХІ**

Наведено аналіз невизначеностей причин важких аварій на АЕС Фукусіма-Daiichi, пов'язаних зі станом активної зони і корпусів реакторів, з природою та механізмами, що виникли в результаті парогозових вибухів, з ефективністю дій персоналу зі зниження тиску в контейнменті та охолодження пошкодженого палива.

*Ключові слова:* важка аварія, контейнмент, водневовмісна пароповітряна суміш, паливовмісні матеріали, вихідна подія аварії.

**S. V. Vasyl'cheko, S. L. Voloshina, T. V. Gablaya, V. Ju. Kochneva, K. V. Skalozubov**

National Nuclear Energy Generating Company "Energoatom", 3, Vetrova str., Kyiv, 01032, Ukraine

Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants NAS of Ukraine, 12, Lysogirska str., building 106, Kyiv, 03028, Ukraine

#### **ANALYSING UNCERTAINTY OF CAUSES OF SEVERE ACCIDENTS AT FUKUSHIMA-DAIICHI**

The paper analyses uncertainty of causes of severe accidents at Fukushima-Daiichi relating to a state of a reactor core and vessels, the nature and mechanisms of steam-gas explosions, efficiency of staff's actions to decrease pressure in containment and to cool the damaged fuel. It is shown that the main uncertainties are: the state of uncertainty in the core and the reactor pressure during the development of accidents at power units № 1 - 3 determines the possibility of different scenarios, the uncertainty of the nature and mechanisms arising steam explosions uncertainty effectiveness of personnel to reduce the pressure in the containment vessel and the cooling of the molten / damaged fuel.

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

#### **REFERENCES**

1. Braun M. The Fukushima Daiichi Incident. - AREVA NP, 2011. - 33 p.
2. Impact to TEPCO's Facilities due to Miyagiken-Oki Earthquake (as of 3:00 PM). - TEPCO Press Release, March 13, 2011.
3. The Accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations. - Report of Japanese Government to the IAEA Ministerial Conference on Nuclear Safety. - Chapter 4. - 2011.
4. Moriyama K. et al. Evaluation of Containment Failure Probability by Ex-Vessel Steam Explosion in Japanese LWR Plants // Journal of Nuclear Science and Technology. - 2006. - 43 (7). - P. 774 - 784.
5. Evaluating the Risk of Steam Explosions. - Nuclear Safety Research. - JAEA R & D Review. - 2006. - 83 p.
6. Goddard I. Fukushima Unit 3: Steam-Explosion Theory. - Wwww.LewRockwell.com. - 2011.
7. Unit3 D/W pressure rate of change (MPa/h) in the period 0-96 hours after quake. TEPCO raw data for Unit 3. 2011.
8. Rusov V., Linnik E., Vaschenko etc. Traveling Wave reactor and Condition of Existence of Nuclear Burning Soliton-Like Wave in Neutron-Multiplying Media // Energies. - 2011. - No. 4. - P. 1337 - 1361.
9. Pogosov A. Physical and technical analysis of the latent factors of disturbance in the power plant Fukushima-1 // Yadernaya i radiatsionnaya besopasnost'. - 2012. - № 1. (Rus)
10. Pogosov A., Gerliga V. A., Domashev Ye. D. Current Methods of Empirical Analysis of the Thermohydraulic Stability of Steam-Generating Channels and the Development with Consideration of the Feasibility of Employing the Noise of Operating Parameters (A Review) // Heat Transfer Research. - 1997. - Vol. 26, No. 3-8. - Reprint: Begell House, Inc. ISSN 1064-2269. - P. 502 - 510.
11. Kazachkov I. Current status and some problems of modeling of severe accidents at nuclear power plants abroad // Yadernaya i radiatsionnaya besopasnost'. - 2003. - № 1. - S. 25 - 34. (Rus)

Надійшла 21.05.2012

Received 21.05.2012