

СПВТ 30; за типом кінцевого поглиначя; за типом контура охолодження; за режимом роботи; за механізмом теплообміну; за рушійною силою охолоджувача. За розглянутими основними класифікаційними ознаками наведено приклади.

*Ключові слова:* класифікація, пасивна система, захисна оболонка, ядерний реактор

*Х.М. Наффаа, В.А. Дубковський. Классификация систем пассивного отвода остаточных тепловыделений от защитных оболочек ядерных реакторов.* Разработанная классификация систем пассивного отвода остаточных тепловыделений от защитных оболочек ядерных реакторов позволяет провести детальный анализ различных концепций систем пассивного отвода остаточных тепловыделений от защитных оболочек ядерных реакторов (СПОТ 30) нового поколения. На основании проведенного анализа различных проектов новых реакторных установок и научных публикаций по использованию СПОТ 30 установлены определенные закономерности и общие подходы в формировании классификации СПОТ 30. Такой анализ дал основание для разработки классификации СПОТ. Подобная классификация позволяет проводить анализ системы по следующим классификационным признакам: по материалу 30; по характеру охлаждения; по механизму конденсации пара; по типу СПОТ 30; по типу конечного поглотителя; по типу контура охлаждения; по режиму работы; по механизму теплообмена; по движущей силе охладителя. По рассмотренным основным классификационным признакам приведены примеры.

*Ключевые слова:* классификация, пассивная система, защитная оболочка, ядерный реактор

*Kh.M. Naffaa, V.A. Dubkovsky. Classification of passive heat residual removal systems from reactors containments.* A developed classification of passive heat residual removal systems from reactors containments allows conducting a detailed analysis of various concepts of passive residual heat removal from the protective shells of nuclear reactors (HPRS-C) of the new generation. Based on our analysis of the various projects of new reactor systems and scientific publications of the use of HPRS-C certain laws and common approaches were established in the formation of classification of HPRS-C. This analysis provided the basis to develop a classification of SPOT, which is represented in the figure. Such a classification allows system analysis by the following classification features: the containment material; the cooling nature; the mechanism of vapor condensation; HPRS-C type; type of finite heat sink; cooling circuit type; by the mode of operation; the mechanism of heat transfer; by the driving force of the cooler. Thus, the basic classification features are considered. Examples are provided.

*Keywords:* classification, passive system, containment, nuclear reactor

Рецензент д-р. техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Кравченко В.П.

Поступила в редакцию 11.06.2014 г.

УДК 621.039.586:502/504

И.Л. Козлов, канд. техн. наук, доц., Одес. нац. политехн. ун-т

## АНАЛИЗ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ И УРОКОВ ФУКУСИМСКОЙ АВАРИИ

**Введение.** Землетрясение и цунами, произошедшие в Японии 11 марта 2011 г., стали причиной тяжелой аварии на АЭС Fukushima-Daiichi с выбросом в окружающую среду радиоактивных материалов. Прошло три года после аварии, в течение которых мировое ядерное сообщество активно занималось исследованием причин, последствий и уроков большой аварии на АЭС Fukushima-Daiichi.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Сделан предварительный анализ, основных причин, приведших к тяжелым авариям на АЭС Fukushima-Daiichi (с недопустимыми повреждениями ядерного топлива), и последствий радиационного воздействия на экологию ок-

DOI: 10.15276/opr.1.43.2014.20

© И.Л. Козлов, 2014

ружающей среды [1]. Дальнейшее развитие вопросов анализа основных причин аварии уже в постфукусимский период нашли свое отражение в других работах [2...6].

В послеаварийный период произошел также целый ряд важных международных событий и решений, связанных с большой аварией на АЭС Fukushima-Daiichi:

— Заявление Совета Евросоюза о необходимости переоценки безопасности всех европейских АЭС с учетом событий на АЭС Fukushima-Daiichi (24 марта 2011 г.). Западноевропейская ассоциация органов регулирования ядерной безопасности (WENRA) организовала разработку технических условий на проведение переоценки безопасности (стресс-тесты) действующих и вводимых в эксплуатацию энергоблоков АЭС.

— Пятое совещание стран-членов Конвенции по ядерной безопасности по выполнению принятых обязательств в связи с большой аварией (4...14 апреля 2011 г.);

— Миссия МАГАТЭ (24 мая ... 1 июня 2011 г.) по предварительным урокам аварии на АЭС Fukushima-Daiichi.

— Активизация деятельности органов ядерного регулирования всех ведущих ядерных держав “в т.ч. Украины”, по обеспечению и регулированию безопасности при авариях, вызванных экстремальными природными воздействиями.

Большинство ядерных держав, кроме Бельгии, Германии, Швейцарии, Италии и Японии, подтвердили свои планы приверженности эксплуатации и развития атомной энергетики в постфукусимский период. Только после катастрофы 2011 г. в разных странах введено в эксплуатацию 9 энергоблоков АЭС, 62 энергоблока находятся в состоянии строительства. Решения стран, отказавшихся от дальнейшей эксплуатации АЭС, не являются окончательными, так как некоторые из них и ранее (до большой аварии на АЭС Fukushima-Daiichi) принимали подобные стратегические решения.

**Цель работы** заключается в продолжении анализа экологических последствий и уроков Фукусимской аварии на основе обзора полученных в последнее время результатов моделирования и обследования распространения радиоактивных продуктов, а также состояния защитных барьеров безопасности на аварийных энергоблоках.

**Изложение основного материала.** После большой аварии на АЭС Fukushima-Daiichi, которая началась 11 марта 2011 г., на текущий момент осуществлен целый ряд мероприятий, существенно влияющих на смягчение и ликвидацию последствий для экологической безопасности.

Японские власти провели прямой мониторинг людей, а также мониторинг окружающей среды для обеспечения оценки доз и создали экспертную группу, чтобы определить и провести обследование здоровья и оценку дозы жителей, включая живущих в NW зоне (Зона плановой эвакуации). Прямой мониторинг индивидуального облучения и использование результатов мониторинга окружающей среды позволили достичь реалистичной оценки доз, увеличить доверие населения и определить индивидуальные медицинские программы. Японские инструкции для радиационной защиты соответствуют рекомендациям, утвержденным Международной комиссией по радиационной защите в публикации ICRP-60 (1990). Пределы дозы для работников установлены в показателях Эффективной Дозы (ED) 100 мЗв за 5 лет с максимумом 50 мЗв в год, а для женщин 5 мЗв за 3 месяца. Однако для аварийных ситуаций предпочтительнее использовать предписанные эталонные уровни индивидуальной дозы, чем пределы. Изначально эталонный уровень индивидуальной дозы составлял 100 мЗв. После оценки аварийной ситуации власти решили увеличить эталонный уровень для индивидуальной дозы до 250 мЗв Эффективной Дозы для суммы внешних и внутренних облучений во время аварийного периода, что дало возможность проводить необходимые действия по смягчению совместно с защитой работников. Оператор ТЕРСО установил меньший эталонный уровень (200 мЗв), чтобы гарантировать выполнение определенных задач.

Установленные процедуры и организации для контроля облучения работников на АЭС Fukushima-Daiichi и J-Village представляются эффективными при обеспечении высокого уровня защиты в контексте экстремальных трудностей (зоны серьезного заражения и очень высокие уровни мощности дозы).

Достигнуто “холодное” состояние поврежденного ядерного топлива и значительное понижение радиоактивного фона, что подтверждается установленными с помощью робототехники датчиками температуры и постоянным радиационным контролем.

Проведено обследование состояния ядерного топлива в бассейне выдержки четвертого блока, которое установило, что большая часть топлива не имеет видимых повреждений. В сентябре 2013 года начались работы по надежной эвакуации топлива из бассейна выдержки четвертого блока.

Своевременными и эффективными оказались меры радиационной защиты населения и окружающей среды, предпринятые японскими властями:

— эвакуация из 20-километровой зоны (около 200 тыс. человек) и полная профилактика населения;  
— мониторинг запрета приема питьевой воды, молока, овощей и других продуктов из 75-километровой зоны около станции, а также профилактические меры для фермерских хозяйств по защите животных от радионуклидов;

— мониторинг запрета рыбной ловли и другой хозяйственной деятельности в море на территории в радиусе 40 км от станции;

— в короткие сроки (4 месяца с момента начала аварии) построена защитная стена, отделяющая сооружение станции от моря, для предотвращения попадания радиоактивных продуктов, в том числе “загрязненной” в процессе аварии охлаждающей воды, в морскую акваторию, а также для укрытия поврежденных строений.

Проведенные и проводимые мероприятия позволяют существенно снизить дозу облучения населения и вероятность возникновения онкологических заболеваний в будущем. Конечно, сейчас еще преждевременно говорить об объективных количественных оценках, однако, исходя из опыта и анализа данных по ликвидации Чернобыльской аварии, можно предположить, что в результате предпринятых мер дозовые нагрузки на население снижены не менее, чем в 4...5 раз. Так, измерения содержания радиоактивного йода в организме более 1000 детей (в возрасте до 15 лет) из префектуры Фукусима, выполненные в июле 2011 г., показали среднюю дозу облучения щитовидной железы 0,04 мкЗв/ч, а максимальную — 0,1 мкЗв/ч (установленная в Японии норма 0,2 мкЗв/ч); а в процессе развития аварии в радиусе около 4 км от АЭС концентрация радиоактивных изотопов йода-131 в три раза и более превышала установленные нормы.

В послеварийный период выполнен и ряд важных организационных мероприятий [2]. Компания ТЕРСО — оператор АЭС Fukushima-Daiichi — перешла под контроль японского правительства после получения государственных инвестиций в размере около 13 млрд USD. В частности, осуществляется государственный контроль за ходом ликвидации последствий вплоть до демонтажа реакторов, за проведением дезактивации, выплатами компенсаций и др.

Разработан долгосрочный (на 40 лет) многоэтапный план действий и мероприятий (“дорожная карта”) по снятию с эксплуатации аварийных энергоблоков АЭС Fukushima-Daiichi, который должен осуществляться реорганизованной компанией ТЕРСО или в перспективе специализированной организацией с привлечением около 400 компаний-партнеров. Укрупненный план “дорожной карты” приведен в табл. 1.

Таблица 1

План “дорожной карты”

Этап	Основные цели этапа	Сроки выполнения
0	Стабилизация “холодного” состояния поврежденного ядерного топлива и значительное снижение радиоактивного фона	$T_0 = 2012$ г.
1	Создание условий для начала извлечения отработанного топлива из хранилища	$T_0 + 2$ года
2	Вывоз топлива и полная дезактивация всех блоков; создание условий для удаления кориума	$T_0 + 10$ лет
3	Завершение удаления поврежденного топлива и полный вывод из эксплуатации	$T_0 + 40$ лет

Несмотря на продолжающиеся инциденты (землетрясения, временную потерю охлаждения бассейнов отработанного ядерного топлива и слив около 100 т радиоактивной воды в начале 2013 г. и др.), анализ текущего состояния промплощадки АЭС Fukushima-Daiichi позволяет вполне обоснованно говорить об окончании нулевого этапа плана “дорожной карты” уже спустя год после большой аварии, в 2012 г. Выполнение последующих этапов вполне реалистично и по материально-техническому обеспечению, и по срокам их завершения.

Полученные в послеаварийный период результаты обследования состояния защитных барьеров безопасности, мониторинг радиационной обстановки, моделирование и анализ распространения радиоактивных продуктов аварии также позволили сделать важные шаги в понимании основных причин, процессов и последствий большой аварии на АЭС Fukushima-Daiichi, среди которых можно выделить следующие:

— Обнаружены существенные неплотности в корпусах аварийных реакторов, через которые поврежденное ядерное топливо частично поступало в контеймент. Таким образом, не подтвердились первоначальные модели тяжелых аварий ТЕРСО-AREVA на блоках № 1...3, которые основывались на попадании продуктов парциркулированной реакции в контеймент только через барботажный конденсатор реакторов.

— Установлено, что возможной первопричиной детонаций на блоках № 2 и 3 могли быть паровые взрывы, которые ранее фактически не учитывались при моделировании и анализе тяжелых аварий. Эти результаты имеют важное значение как для дальнейшего моделирования и анализа тяжелых аварий на АЭС Fukushima-Daiichi, так и для дальнейшей переоценки безопасности мировой атомной энергетики.

— Анализ метеорологической обстановки над Японией (с точки зрения переноса радиоактивных продуктов деления) показал, что в течение периода с 11 по 26 марта 2011 г. над районом АЭС доминировал перенос воздушных масс на восток, что приводило к выносу радиоактивных продуктов в основном в Тихий океан. Однако в течение дня 15 марта произошел поворот ветра на юг, в сторону суши, что в конечном итоге и привело к ее загрязнению. Одновременно в связи с подходом с юго-запада циклона начались интенсивные дожди. Это явилось неблагоприятным фактором, так как способствовало осаждению с дождем радиоактивных продуктов. Перенос в сторону моря восстановился только к 20:00 15 марта. Далее (вплоть до 20 марта) над АЭС преобладал умеренный западный ветер. При этом возможные выбросы радиоактивных веществ сносились в сторону Тихого океана.

Расчетный прогноз переноса радионуклидов на основе локальной атмосферной ситуации показал, что в течение 15 марта образовались радиационные следы в направлении на юг и северо-запад от АЭС Fukushima-Daiichi, что и предопределило радиационное загрязнение территории Японии в этих направлениях. Эта информация была подтверждена данными радиационного мониторинга.

Результаты моделирования также показали, что в районе промплощадки АЭС Daini мощность дозы после прохождения облака составляла 10...20 мкЗв/ч, а в префектуре Ибараки 1...2 мкЗв/ч. Это соответствует уровню мощности дозы, измеренной датчиками. Результаты расчета мощности дозы в точках контроля практически совпадают с измерениями; причем расчетное время прихода радиоактивного облака в точки контроля соответствует времени, когда был зарегистрирован существенный рост мощности дозы.

Кроме выбросов в первой половине 15 марта результаты измерений и анализ состояния атмосферы показывают, что на аварийной АЭС Fukushima-Daiichi были выбросы и во второй половине дня. При этом количество радиоактивных веществ, выброшенное в атмосферу в это время, судя по результатам измерений, существенно превосходило выброс в первой половине дня. Однако о каких-либо происшествиях на АЭС в этот период официально не сообщалось. Возможно это связано с частичной или полной эвакуацией персонала с АЭС из-за существенно ухудшения радиационной обстановки на территории АЭС. Именно к этому времени также относятся заявления об эвакуации персонала (по данным ТЕРСО). В то же время анализ полей приземного ветра показывает, что во второй половине дня после 12:00 15 марта преимущественное направление ветра у поверхности земли изменилось на северо-западное. Отсутствие в

течение длительного времени (2...3 суток) достоверных данных о прохождении радиационного облака и формировании выпадений на поверхность земли в этом направлении скорее всего объясняется отсутствием стационарных датчиков контроля радиационной обстановки (по данным МЕХТ, Япония). Ближайшей точкой, где проводили непрерывный мониторинг 15 марта с 12:00 с повторяемостью два раза в час, был город Фукусима-сити, расположенный в 60 км к северо-западу от АЭС Fukushima-Daiichi. Данные о мощности дозы в остальных точках мониторинга появлялись позже. В качестве опорной точки были выбраны точка контроля № 32, расположенная на расстоянии 30 км от АЭС на оси северо-западного следа, и точка контроля в городе Фукусима-сити (табл. 2). Кроме того, проведено сравнение расчетных значений мощности дозы в опорных точках контроля радиационной обстановки с измерениями мощности дозы с помощью аэрогаммасъемки местности (по данным Департамента энергетики США). Анализ поля приземной скорости ветра показал, что основной выброс для формирования радиационной обстановки, подтвержденной результатами измерений, должен произойти 15 марта не раньше 15:00 и не позднее 18:00. В противном случае, распространение радиоактивных веществ в северо-западном направлении от АЭС было бы невозможно по атмосферным условиям.

Таблица 2

Выпадение Cs-137 вблизи точек контроля радиационной обстановки [5]

Точка контроля	Выпадения $^{137}\text{Cs}$ , Ки/км <sup>2</sup>		
	“Нострадамус”	МЕХТ (Япония)	Департамент энергетики (США)
АЭС Daini	11	13	12
Префектура Ибараки	3	1,3	>8
Точка № 32	102	173	120
г. Фукусима-сити	6	9	12
Деревня Иитате	50	30	54
Точка № 83	200	300	450

Результаты моделирования показали, что в точке № 32 мощность дозы после прохождения облака составляла 170 мкЗв/ч, а через 24 ч — 160 мкЗв/ч. В районе Фукусима-сити мощность дозы после прохождения облака составляла 8 мкЗв/ч, а через 24 ч — 7,5 мкЗв/ч. Это примерно соответствует уровню мощности дозы, измеренной датчиками мониторинга радиационной обстановки в данных точках контроля.

Сравнение результатов расчета выпадений  $^{137}\text{Cs}$ , полученных с помощью поста слежения “Нострадамус”, с расчетами на основе данных мониторинга радиационной обстановки (МЕХТ, Япония) и оценками Департамента энергетики США показывает, что оценки совпадают по порядку величины во всех точках контроля, расположенных как на южном, так и на северо-западном следе. При этом отклонение результатов моделирования от расчетов по данным мониторинга варьируется от 15 до 40 %. Полученные оценки выпадений свидетельствуют о том, что моделирование переноса радионуклидов в атмосфере в течение 15 марта корректно, а их изначальное количество в выбросе из помещений аварийной АЭС достаточно для создания наблюдаемых уровней загрязнения территории Японии.

По оценкам отечественных специалистов ИПБ АЭС НАНУ за 15 марта 2011 г. в атмосферу было выброшено: радионуклидов йода  $\sim 4 \cdot 10^{17}$  Бк, цезия  $\sim 1 \cdot 10^{17}$  Бк, РБГ  $\sim 4 \cdot 10^{17}$  Бк [6]. В табл. 3 приведены оценки выбросов  $^{131}\text{I}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в атмосферу, сделанные экспертами различных стран, а также выбросы при аварии на Чернобыльской АЭС.

Несмотря на некоторое различие в оценках, все результаты неплохо согласуются между собой. Оценка выброса составляет  $\sim 11$  % по  $^{131}\text{I}$  и  $\sim 35$  % по  $^{137}\text{Cs}$  от выброса при аварии на Чернобыльской АЭС. При этом оценки NISA, NSC, IRSN [6] соответствуют 7 уровню по Международной шкале ядерных событий (INES).

Таблиця 3

*Сравнительный анализ данных по выбросам радиоактивных продуктов аварий [6]*

Нуклид	Выброс за 15 марта ИБРАЭ РАН	NISA	NSC	IRSN	Авария на Чернобыльской АЭС
$^{131}\text{I}$	$2 \cdot 10^{17}$	$1,3 \cdot 10^{17}$	$1,5 \cdot 10^{17}$	$9 \cdot 10^{16}$	$1,8 \cdot 10^{18}$
$^{137}\text{Cs}$	$3 \cdot 10^{16}$	$0,6 \cdot 10^{16}$	$1,2 \cdot 10^{16}$	$1 \cdot 10^{16}$	$8,5 \cdot 10^{16}$
Всего	$1,4 \cdot 10^{18}$	$3,7 \cdot 10^{17}$	$6,3 \cdot 10^{17}$	$4,9 \cdot 10^{17}$	$5,2 \cdot 10^{18}$

По данным Японской комиссии по ядерной безопасности годовой лимит внешней радиации (при норме в 0,04 мкЗв/ч) в суммарном исчислении превышен в зоне, простирающейся более чем на 60 км на северо-запад от места аварии на АЭС и около 40 км юго-восточнее от нее. Поэтому японские власти сначала эвакуировали людей из 20-километровой зоны вокруг АЭС, позже расширив зону эвакуации пятью населенными пунктами.

Радиоактивные выбросы из аварийной АЭС в Японии распространились с атмосферными потоками и достигли территории Канады, США, Европы и Азии. В Украине также в начале апреля были зафиксированы следы радиации на уровне от 0,003 до 0,005 Бк/м<sup>3</sup> воздуха, что составляет одну тысячную допустимой нормы.

Присвоение 7 уровня опасности аварии на АЭС Fukushima-Daiichi дало повод сравнить ее с аварией на Чернобыльской АЭС. В Управлении ядерной и промышленной безопасности (NISA) утверждают, что радиоактивное излучение от японской станции с момента аварии составило лишь 10 % чернобыльского. Однако некоторые специалисты предупреждают, что остается вероятность превышения суммарных выбросов радиации с АЭС Fukushima-Daiichi. Эта вероятность во многом определяется эффективностью мероприятий по ликвидации последствий большой аварии.

Одной из основных текущих задач, стоящих после большой аварии на АЭС Fukushima-Daiichi, является мониторинг и обеспечение экологической безопасности “загрязненных” вод, образующихся в результате непрерывного замкнутого цикла охлаждения топливосодержащих масс (ТСМ) и конструкций поврежденных энергоблоков. После загрязнения радионуклидами вода поступает в подвалы зданий энергоблоков, где осуществляется ее обработка и подготовка для дальнейшего применения (не менее 700 м<sup>3</sup>/сутки).

Общее количество высокоактивной воды ( $5 \cdot 10^5$  Бк/л по тритию и  $10^3$  Бк/л по стронцию) оценивается в несколько сотен тысяч кубометров (на середину 2013 года); а при общей длине соединительных систем замкнутого охлаждения (около 4 км) возникает риск протечек, что и произошло, например, в апреле 2013 и в начале 2014 гг. Чтобы ограничить поступление “загрязненной” воды в грунтовые воды и океан, осуществляется целый комплекс мероприятий по поддержанию надежности технических и природных защитных барьеров безопасности, соответствующего уровня вод и мониторингу поступления радионуклидов в океан.

**Результаты.** Основные результаты проведенного анализа заключаются в следующем:

— Проведенные в постфукусимский период расчетные моделирования тяжелых аварий на 1...3 блоках АЭС Fukushima-Daiichi (в т.ч. кодами SAMPSON и СОКРАТ [2, 3]) установили: в процессе аварий произошло разрушение корпусов реакторов и выход ТСМ в контейнменты; причиной детонации на 2 и 3 блоках могли быть паровые энергетические взрывы; персонал станции фактически потерял контроль над ситуацией в предотвращении тяжелых аварий на 1 блоке и в бассейне выдержки отработанного ядерного топлива 4 блока; недостатки конструкции реакторов BWR, а также неэффективные действия персонала не позволили предотвратить тяжелые аварии на 2 и 3 блоках.

— В настоящее время уровень радиационного загрязнения Фукусимской аварии оценивается на порядок ниже, чем на Чернобыльской. Однако, эти оценки не являются окончательными и во многом определяются эффективностью дальнейших мероприятий по мониторингу и лик-

видации экологических последствий. Преодоление экологических последствий должно учитывать многолетний опыт и уроки Чернобыльской аварии.

— Основные причины Фукусимской и Чернобыльской аварий оказались подобными: недостатки конструкций и недостаточная подготовленность персонала в предотвращении возникновения тяжелых аварий и разрушительных взрывов [2, 3].

— Недостаточная подготовленность персонала на АЭС Fukushima-Daiichi напрямую связана с ранее общепринятым принципом исключения из рассмотрения противоаварийных мероприятий для крайне маловероятных событий. В частности, после аварии на АЭС Fukushima-Daiichi американские операторы реакторных установок, эксплуатирующие десятки подобных реакторных установок с BWR и регулирующий орган США (NRC) полностью исключили возможность возникновения подобной аварии на основании отсутствия условий для аналогичных землетрясений и цунами. Однако, проведенные в последствии NRC инспекции фактически на всех АЭС США определили недостаточную подготовленность персонала по управлению авариями с полным обесточиванием (аналог Фукусимской аварии).

**Выводы.** На основе результатов анализа последних известных исследований экологических последствий и уроков Фукусимской аварии можно сделать следующие выводы:

— Не подтвердились первоначальные предположения эксплуатирующей организации ТЕРСО о сохранении целостности корпусов реакторов на 1...3 блоках, а также то, что единственной причиной разрушительных взрывов была детонация водорода. Эти уроки Фукусимской аварии следует учитывать в дальнейшем при моделировании и управлении тяжелыми авариями.

— Одной из причин Фукусимской аварии была недостаточная подготовленность персонала по управлению относительно маловероятными событиями, которая привела к многочисленным непреднамеренным ошибкам при управлении авариями. В частности, не были обеспечены необходимые превентивные меры предотвращения тяжелых аварий на 1 и 4 блоках; вентиляция контейнента на 1 блоке привела к разрушительному взрыву и высокорadioактивному выбросу в окружающую среду; не получилось подключение низконапорных систем для охлаждения ядерного топлива на 2 и 3 блоках и другие.

— Необходимо отменить ранее общепринятые в атомной энергетике принципы исключения из рассмотрения относительно маловероятных аварийных событий. Это один из главных уроков Фукусимской аварии.

— Преодоление экологических последствий Фукусимской аварии должно учитывать многолетний опыт Чернобыльской катастрофы.

## Литература

1. Анализ причин и последствий аварии на АЭС Fukushima как фактор предотвращения тяжелых аварий в корпусных реакторах: монография / В.И. Скалозубов, А.А. Ключников, В.Н. Ващенко, С.С. Яровой; ред.: В.И. Скалозубов; НАН Украины, Ин-т пробл. безопасности АЭС. — Чернобыль: Ин-т пробл. безопасности АЭС, 2012. — 279 с.
2. Naitoh, M. Analysis of the Fukushima Daiichi Nuclear Accident by Severe Accident Analysis Code SAMPSON / M. Naitoh, H. Suzuki, H. Hirakawa et al. // 6th European Review meeting on Severe Accident Research (ERMSAR-2013) Avignon (France), Palais des Papes, 2-4 October, 2013.
3. Naitoh, M. The Overview of the OECD/NEA Benchmark Study of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (BSAF) Project / M. Naitoh, F. Nagase, A. Whites // 6th European Review meeting on Severe Accident Research (ERMSAR-2013) Avignon (France), Palais des Papes, 2-4 October, 2013
4. Авария на АЭС “Фукусима-1”: оперативный прогноз и оценка радиационных и радиологических последствий / Р.В. Арутюнян, О.А. Павловский, С.В. Панченко и др. // Труды ИБРАЭ. Авария на АЭС “Фукусима-1”: опыт реагирования и уроки. — М.: Наука, 2013. — Вып. 13. — С. 15 — 66.
5. Повышение экологической безопасности атомной энергетики Украины в постфукусимский период: монография / [В.И. Скалозубов, В.Н. Ващенко, Т.В. Габляя и др.]; под ред. В.И. Скалозубова; НАН Украины, ИПБ АЭС НАНУ. — К.: “А.С.К.”, 2013. — 128 с.

6. Оборский, Г.А. Основные направления международного сотрудничества по повышению эффективности энергетического хозяйства и безопасности атомной энергетики с учетом уроков аварий на Чернобыльской АЭС и АЭС Fukushima-Daiichi / Г.А. Оборский, А.С. Мазуренко, В.И. Скалозубов и др. // Материалы международной украинско-японской конференции по вопросам научно-промышленного сотрудничества, 24-25 октября 2013 г. — Одесса: ОНПУ, 2013. — С. 125 — 130.

## References

1. Analiz prichin i posledstviy avarii na AES Fukushima kak faktor predotvrashcheniya tyazhelykh avariiv v korpusnykh reaktorakh: monografiya [Analysis of the causes and consequences of the accident at Fukushima NPP as a factor of preventing severe accidents in tank-type reactors: monograph] / V.I. Skalozubov, A.A. Klyuchnikov, V.N. Vashchenko, S.S. Yarovoy, edited by V.I. Skalozubov; NAS of Ukraine, Inst. of NPP Safety. — Chernobyl: Inst. of NPP Safety, 2012. — 279 p.
2. Analysis of the Fukushima Daiichi Nuclear Accident by Severe Accident Analysis Code SAMPSON / M. Naitoh, H. Suzuki, H. Hiraoka et al. // 6th European Review meeting on Severe Accident Research (ERMSAR-2013) Avignon (France), Palais des Papes, 2-4 October, 2013.
3. Naitoh, M. The Overview of the OECD/NEA Benchmark Study of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (BSAF) Project / M. Naitoh, F. Nagase, A. Whites // 6th European Review meeting on Severe Accident Research (ERMSAR-2013) Avignon (France), Palais des Papes, 2-4 October, 2013.
4. Avariya na AES "Fukushima-1": operativnyy prognoz i otsenka radiatsionnykh i radiologicheskikh posledstviy [The accident at the Fukushima-1 NPP: operation prognosis and estimation of radiation and radiological consequences] / R.V. Arutyunyan, O.A. Pavlovskiy, S.V. Panchenko and others // Trudy IBRAE. Avariya na AES "Fukushima-1": opyt reagirovaniya i uroki [Proceeding of IBRAE. Accident at Fukushima-1 NPP: experience of response and lessons]. — Moscow, 2013. — Iss. 13. — pp. 13 — 66.
5. Povyshenie ekologicheskoy bezopasnosti atomnoy energetiki Ukrainy v postfukusimskiy period: monografiya [Greening of nuclear energy in Ukraine in the post-Fukushima period: monograph] / [V.I. Skalozubov, V.N. Vashchenko, T.V. Gablaya and others]; edited by V.I. Skalozubov; NAN Ukrainy, IPB AES NANU [NAS of Ukraine, Inst. of NPP Safety NASU]. — Kyiv, 2013. — 128 p.
6. Osnovnye napravleniya mezhdunarodnogo sotrudnichestva po povysheniyu effektivnosti energeticheskogo khozyaystva i bezopasnosti atomnoy energetiki s uchetom urokov avariiv na Chernobyl'skoy AES i AES Fukushima-Daiichi [The main directions of international cooperation for improving the efficiency of energy sector and nuclear safety with lessons of Chernobyl and Fukushima-Daiichi power plant accidents] / G.A. Oborskiy, A.S. Mazurenko, V.I. Skalozubov and others // Materialy mezhdunarodnoy ukrainsko-yaponskoy konferentsii po voprosam nauchno-promyshlennogo sotrudnichestva, 24–25 oktyabrya 2013 [Materials of the Ukrainian-Japanese conference on scientific and industrial cooperation, 24–25 October, 2013]. — Odessa, 2013. — pp. 125 — 130.

## АНОТАЦІЯ / АННОТАЦИЯ / ABSTRACT

*І.Л. Козлов. Аналіз екологічних наслідків і уроків Фукусімської аварії.* Події що відбулися на АЕС Fukushima-Daiichi примусили усе світове ядерне співтовариство і державні органи регулювання екологічної безпеки знову, після Чорнобильської катастрофи, повернутися до необхідності переоцінки безпеки всіх діючих та проєктованих АЕС. Наслідки, пов'язані з викидами радіоактивних речовин до навколишнього середовища, обумовлюють підвищення обґрунтованості вивчення та аналізу екологічних питань при оцінці робіт у післяаварійний період. Наведений аналіз дій японської сторони та міжнародних організацій з пом'якшення і ліквідації наслідків аварії і результати моделювання розповсюдження радіоактивних речовин у навколишньому середовищі дозволяють зробити важливі кроки в розумінні основних причин, процесів і наслідків великої аварії АЕС Fukushima-Daiichi. Отримані оцінки є попередніми і потребують подальшого моніторингу і аналізу розвитку питань екологічної безпеки і усунення наслідків аварій на АЕС.

*Ключові слова:* Фукусімська аварія, екологічні наслідки, радіоактивні викиди.

*И.Л. Козлов. Анализ экологических последствий и уроков Фукусимской аварии.* Произошедшие события на АЭС Fukushima-Daiichi заставили все мировое ядерное сообщество и государственные органы регулирования экологической безопасности вновь, после Чернобыльской катастрофы, вернуться к необходимости переоценки безопасности всех действующих и проектируемых АЭС. Последствия, связанные с выбросами радиоактивных продуктов в окружающую среду, определяют повышение обоснованности изучения и анализа экологических вопросов в оценке



работ в послеаварийный период. Представленный анализ действий японской стороны и международных организаций по смягчению и ликвидации последствий аварии и известные результаты моделирования распространения радиоактивных продуктов в окружающей среде позволяют сделать важные шаги в понимании основных причин, уроков и последствий большой аварии на АЭС Fukushima-Daiichi. Полученные оценки носят предварительный характер и предполагают дальнейший мониторинг и анализ развития вопросов по обеспечению экологической безопасности и устранению последствий аварий на АЭС.

*Ключевые слова:* Фукусимская авария, экологические последствия, радиоактивные выбросы.

*I.L. Kozlov. Analysis of ecological consequences and lessons of the Fukushima accident.* The events that occurred at the nuclear power plant (NPP) Fukushima-Daiichi forced all the world nuclear community and government bodies of ecological safety regulation to return again, after Chernobyl accident, to the need of reevaluating the safety of all operating and designed NPPs. The consequences connected with emissions of radioactive products to the environment increase the validity of studying and analyzing the environmental issues, while evaluating the works done in the postemergency period. The presented analysis of the actions of the Japanese side and of the international organizations on mitigation and elimination of consequences of the accident, as well as the results of modeling of radioactive products distribution in environment allow to take important steps in understanding the main reasons, processes and consequences of the big accident on the nuclear power plant Fukushima-Daiichi. The obtained estimates are preliminary and require further monitoring and analysis of issues on ecological security and elimination of consequences of accidents at NPPs.

*Keywords:* Fukushima accident; ecological consequences; radioactive emissions.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Максимов М.В.

Поступила в редакцию 24 марта 2014 г.

UDC 534.222.2+536.46+662.215.1

V.E. Volkov, DSc, Department Chairman, Odessa  
National Academy of Food Technologies

## DEFLAGRATION-TO-DETONATION TRANSITION AND THE DETONATION INDUCTION DISTANCE ESTIMATION

**Introduction.** Turbojet and turbofan engines at flight Mach numbers exceeding 3 are very expensive. In particular, pulse detonation engine (PDE) is more attractive energetically for flight Mach numbers of about 3...4 [1]. But in order to use detonations for propulsion and to realize the corresponding thermodynamic advantages (they lead to reduced fuel consumption) some problems must be resolved. These problems deal mainly with achievement and control of detonations in a propulsion device. Among these problems are [1]:

- necessity of low-energy source for the detonation initiation;
- knowledge of geometry of the combustion chamber to promote detonation initiation and survival at lowest possible pressure lost.

Both problems are related to fundamental problem of deflagration-to-detonation transition and calculating of the detonation induction distance. Calculating of the detonation induction distance (and the detonation wave formation time) is also very important for explosion safety. And yet there are no reliable analytical methods for such calculating.

DOI: 10.15276/opus.1.43.2014.21

© V.E. Volkov, 2014