

**В. И. Скалозубов, И. Л. Козлов\*, Т. В. Габлая, К. В. Скалозубов**

*Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, ул. Лысогорская, 12, корп. 106, Киев, 03028, Украина  
\*Одесский национальный политехнический университет, просп. Шевченко, 1, Одесса, 65044*

## **АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РУКОВОДСТВ ПО УПРАВЛЕНИЮ ТЯЖЕЛЫМИ АВАРИЯМИ НА ВВЭР С УЧЕТОМ УРОКОВ ФУКУСИМСКОЙ АВАРИИ**

Проведен анализ разрабатываемых проектов по управлению тяжелыми авариями украинских ВВЭР с учетом уроков Фукусимской аварии. На основе проведенного анализа установлена необходимость расширения перечней симптомов условий возникновения тяжелых аварий, а также учета возможных отказов систем контроля и пассивных систем безопасности. Установлена ограниченность независимой реализации отдельных стратегий по управлению тяжелыми авариями. Необходима комплексная реализация стратегий руководств по управлению тяжелыми авариями, в том числе с учетом относительно маловероятных событий (например, паровые взрывы).

*Ключевые слова:* управление тяжелыми авариями, Фукусимская авария.

В атомной энергетике Украины руководства по управлению тяжелыми авариями на ВВЭР (РУТА ВВЭР), разработка которых была начата в еще «дофукусимский» период [1], основываются на подходе концерна Westinghouse (США) и российском опыте его адаптации к условиям ВВЭР. Основные положения разрабатываемых РУТА ВВЭР заключаются в следующем.

Для предотвращения перехода запроектной аварии в тяжелую стадию оперативный персонал блочного щита управления (БЩУ) использует инструкцию по ликвидации аварий (ИЛА) в формате симптомно-ориентированные инструкции. При возникновении условий перехода запроектной аварии в тяжелую стадию выполнение ИЛА прекращается и оперативным персоналом задействуются руководство по управлению тяжелой аварией (РУТА).

Цели управления тяжелой аварией (УТА) состоят в обеспечении следующих трех главных целей безопасности, достижение которых гарантирует успех управления аварией:

прекращение повреждения топлива в активной зоне и бассейне выдержки на ранней стадии развития;

поддержание локализующей способности гермообъема (ГО) настолько долго, насколько это возможно;

минимизация радиационного выброса как на площадке, так и за ее пределами.

Предписываемые РУТА реакторной установки (РУ) действия персонала направлены на:

прекращение повреждения топлива в активной зоне на ранней стадии развития;

управление аварией с целью ослабления последствий тяжелой аварии;

восстановление стабильного состояния РУ, нарушенных функций и барьеров безопасности;

сохранение целостности физических барьеров на пути распространения радиоактивного загрязнения;

поддержание локализующей способности ГО настолько долго, насколько это возможно;

минимизацию радиационного выброса как на площадке, так и за ее пределами;

долгосрочный контроль стабильного состояния РУ;

организацию выполнения работ по ликвидации последствий аварии;

определение и использование соответствующих стратегий действий персонала по ликвидации нарушений с учетом прогнозирования возможных путей развития нарушений, аварийных ситуаций и аварий для минимизации их последствий.

При выполнении условий входа в РУТА персонал БЩУ переходит к УТА в соответствии с процедурой БРАТ-1, которое предписывает немедленное выполнение основных стратегий УТА (сброс давления и подпитка первого контура).

Активация группы инженерной поддержки (ГИП) осуществляется по приказу руководителя аварийными работами на площадке (РАРП). После активации ГИП обеспечивает УТА в соответствии с предписанными в РУТА стратегиями, выдает указания персоналу БЩУ по применению оборудования и систем АЭС, которые могут быть использованы для управления аварией вне зависимости от установленных проектом назначения, пределов и условий безопасной эксплуатации. При этом персонал БЩУ использует процедуру БРАТ-2.

© В. И. Скалозубов, И. Л. Козлов, Т. В. Габлая, К. В. Скалозубов, 2015

Персонал БЩУ должен организовать непрерывную диагностику состояния энергоблока в соответствии с руководством «ДБС» и ее передачу ГИП.

В основу разработки руководства «ДБС» положена таблица мониторинга состояния основных параметров энергоблока (симптомов), контроль которых позволяет полностью охватить как выход энергоблока из диапазона стабильного контролируемого состояния, так и возникновение серьезных угроз.

На основании указанной диагностики ГИП выполняет оценку необходимости задействования того или иного РУТА или руководства серьезных угроз (РСУ) и осуществляет УТА до момента достижения стабильного и контролируемого состояния энергоблока.

Под стабильным контролируемым состоянием энергоблока подразумевается такое состояние, при котором:

восстановлено стабильное охлаждение активной зоны;

снята угроза разрушения либо дальнейшего разрушения барьеров на пути распространения продуктов деления;

прекращен (либо ограничен насколько это возможно) выброс продуктов деления и снята угроза возобновления существенных выбросов;

обеспечен мониторинг параметров, позволяющих контролировать состояние активной зоны, барьеров безопасности, радиационной обстановки, а также оборудования энергоблока либо привлеченных в процессе УТА дополнительных средств, работа которых обеспечивает достижение указанных целей.

Использование руководств УТА завершается одним из следующих результатов:

энергоблок находится в стабильном контролируемом состоянии и выполняется устранение серьезных угроз в соответствии с ДЕДОК-1;

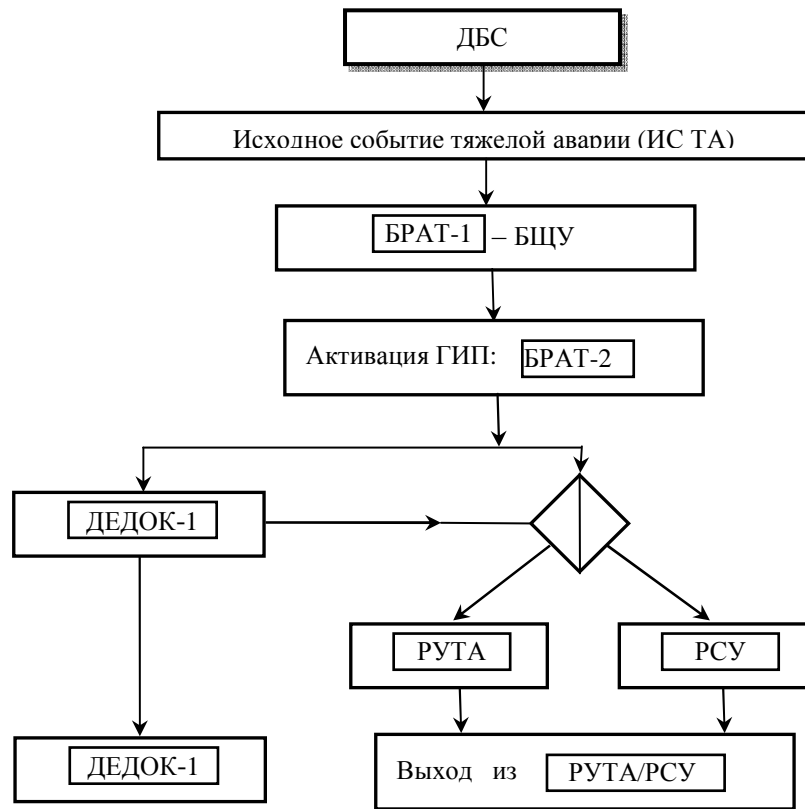
энергоблок находится в стабильном контролируемом состоянии, все серьезные угрозы устранены и получено распоряжение РАРП о прекращении процесса УТА.

Содержание стратегий и процедур РУТА приведено в табл.1.

Таблица 1. Состав РУТА ВВЭР

Идентификатор	Наименование составляющих мероприятий РУТА
ДБС	Контроль состояния и критериев входа в руководства по УТА
<b>Руководства БЩУ</b>	
БРАТ-1	Процедура по УТА для операторов БЩУ до активации ГИП
БРАТ-2	Процедура по УТА для операторов БЩУ после активации ГИП
<b>Руководства по действиям долгосрочного контроля</b>	
ДЕДОК-1	Руководство по мерам долгосрочного контроля
ДЕДОК-2	Выход из РУТА
<b>Руководства по УТА</b>	
РУТА-1	Снижение давления в первом контуре
РУТА-2	Подача теплоносителя в первый контур
РУТА-3	Подача воды в парогенераторы (ПГ)
РУТА-4	Снижение радиоактивного выброса в окружающую среду
РУТА-5	Контроль давления в ГО
РУТА-6	Снижение концентрации водорода в ГО
<b>Руководства дерева серьезных угроз (ДСУ)</b>	
РСУ-1	Снижение давление в ГО
РСУ-2	Предотвращение взрыва водорода
РСУ-3	Смягчение выброса продуктов деления в окружающую среду
РСУ-4	Контроль разрежения в ГО

Общую структуру и последовательность активации процедур РУТА ВВЭР можно представить на рисунке.



Структура РУТА ВВЭР.

- Шаг 1 – проверка и восстановление (в случае необходимости) работоспособности системы сжатого воздуха;
- Шаг 2 – проверка и восстановление локализации ГО;
- Шаг 3 – проверка наличия аварийных ПГ и их отключение по питательной воде;
- Шаг 4 – проверка необходимости и реализация снижения давления в 1-м контуре;
- Шаг 5 – обеспечение подпитки 1-го контура насосами штатных систем безопасности;
- Шаг 6 – проверка уровня и подпитка (в случае необходимости) баков гидроемкостей;
- Шаг 7 – контроль и сброс (в случае необходимости) давления в ГО;
- Шаг 8 – переход к процедуре БРАТ-1.

Условиями дальнейшего ввода в действие процедуры БРАТ-1 на БЩУ является активация ГИП и, по сути, продолжение выполнения стратегий по УТА, начатых на этапе БРАТ-1: проверка и восстановление напряжения на секциях систем безопасности; проверка и восстановление локализации ГО; проверка и отключение аварийных ПГ; мониторинг параметров на энергоблоке и т.п.

На основе анализа проектов РУТА ВВЭР с учетом уроков Фукусимской аварии (табл. 2) можно сделать следующие основные выводы.

1. Необходимо расширение симптомов условий возникновения тяжелых аварий на основе принципов минимальной достаточности и дублирования возможных отказов систем мониторинга, а также идентификации «предыстории» запроектных аварийных процессов.
2. В моделируемых сценариях развития тяжелых аварий необходимо учитывать также относительно маловероятные события (отказы пассивных систем безопасности и систем контроля, паровые взрывы и т.п.).
3. Необходим комплексный подход формирования стратегий УТА, учитывающий взаимозависимость отдельных мероприятий (например, стратегий по снижению давления, предотвращению детонации водорода, смягчению радиоактивных выбросов, охлаждению топливосодержащих материалов и т.д.). «Независимая» реализация отдельных стратегий УТА неэффективна.

Для достижения основных целей должна быть реализована единая стратегия регулирования охлаждения, давления, взрывобезопасности и радиоактивных выбросов. Различия таких стратегий

могут быть связаны с «предысторией» возникновения тяжелой аварии и фактическим состоянием систем, обеспечивающих выполнение необходимых (критических) функций безопасности.

4. Необходим пересмотр и совершенствование методического обеспечения РУТА ВВЭР в части идентификации исходных событий тяжелых аварий на основе симптомно-ориентированных подходов, а также эффективности стратегий предотвращения парогазовых взрывов.

Таблица 2. Уроки Фукусимской аварии для проектов РУТА ВВЭР

№	Ограничения/недостатки РУТА ВВЭР	Уроки Фукусимской аварии
1	Не определено в качестве одной из основных целей и стратегий УТА сохранение целостности/локализирующей способности корпуса реактора и защитных барьеров безопасности отработавшего ядерного топлива	1. В процессе тяжелых аварий на 1 – 3-м блоках произошло разрушение нижней части корпусов реакторов и поступление поврежденного ядерного топлива в контейнмент 2. Одна из возможных причин тяжелой аварии и взрыва в приреакторном бассейне выдержки отработавшего ядерного топлива (БВ ОЯТ) 4-го блока – потеря герметичности бассейна (возможно под воздействием сейсмических нагрузок)
	Исходное событие тяжелой аварии (ИС ТА) в реакторе при начальных процедурах БРАТ идентифицируется только по одному параметру (температура на выходе из активной зоны) и без учета «предыстории» аварийного процесса: первичное исходное событие аварии; фактическое состояние работоспособности и доступности систем безопасности, обеспечивающих выполнение необходимых функций безопасности; состояние защитных барьеров безопасности и условий мониторинга на момент возникновения ИС ТА	1. В процессе тяжелых аварий были установлены отдельные отказы и нарушения условий мониторинга состояния аварийных энергоблоков. В частности, факт возникновения тяжелых аварий на 1-м блоке был фактически идентифицирован по появлению высокорadioактивных изотопов уже на промплощадке 2. На всех аварийных энергоблоках было общее исходное запроектное событие с полной потерей длительного электроснабжения, однако сценарии развития тяжелых аварий и разрушения защитных барьеров безопасности существенно отличались в зависимости от состояния систем безопасности и противоаварийных мероприятий
2		3. В процессе развития тяжелых аварий были обнаружены отдельные отказы систем контроля и мониторинга
3	Не учитываются возможные отказы пассивных систем безопасности и, в частности систем, регулирующих давление в 1-м и 2-м контурах	1. В процессе аварий были обнаружены отказы отдельных пассивных систем безопасности (в частности, конденсатора-барботера на 1-м блоке) 2. Недостаточная надежность предохранительных клапанов реактора были одной из основных причин тяжелых аварий на АЭС ТМІ-2 и инцидента на 4-м блоке Ровенской АЭС в 2009 г.
4	Отсутствует комплексный подход реализации основных стратегий УТА, учитывающий взаимосвязь и необходимость совместной реализации отдельных мероприятий	1. Реализация стратегии дополнительной аварийной подпитки на 1 – 3-м блоках существенно зависела от регулирования давления в реакторах и контейнментах. Именно неэффективность реализации этих стратегий была одной из основных причин возникших тяжелых аварий и разрушений на 1 – 3-м блоках 2. Реализация независимых стратегий регулирования давления, охлаждения, предотвращения парогазовых взрывов, снижения радиоактивных выбросов и т.п. недопустима. В частности, разрушительный взрыв на 1-м блоке произошел практически сразу после превентивной вентиляции контейнмента
5	РУТА ВВЭР не учитывают возможность возникновения паровых энергетических взрывов, и эффективных мероприятий по их предотвращению Применение диаграммы Шапиро - Моффетти для оценки условий водородной детонации обосновано для квазистатических процессов развития тяжелой аварии	1. Детонации на 2-м и 3-м блоках могли быть инициированы паровыми взрывами, что косвенно подтверждается результатами последующего моделирования тяжелых аварий [2, 3] 2. Исключение из рассмотрения паровых взрывов как крайне маловероятных событий недопустимо. Этот вывод является следствием общего урока Фукусимской аварии

Стратегії охолодження пошкодженого ядерного палива в реакторі, в захисній оболочці або в БВ ОЯТ повинні також враховувати можливість негативних ефектів для взривобезпечності та цілості захисних бар'єрів поза залежності від ймовірності їх виникнення.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Скалозубов В. І., 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.
2. *Supper* provided by the SARNET in the Framework Programmes of Research of the European Commission // SARNET. – 6<sup>th</sup> European Review meeting on severe Accident Research (ERMSAR-2013). – Avignon (France), Palais des Papes. – 2 - 4 October, 2013.
3. Скалозубов В. І., Ключников А. А., Ващенко В. Н., Яровой С. С. Анализ причин и последствий аварии на АЭС Fukushima как фактор предотвращения тяжелых аварий в корпусных реакторах. – Чернобыль: ИПБ АЭС НАН Украины, 2012. – 280 с.

### АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ КЕРІВНИЦТВ З УПРАВЛІННЯ ВАЖКИМИ АВАРІЯМИ НА ВВЕР З УРАХУВАННЯМ УРОКІВ ФУКУСІМСЬКОЇ АВАРІЇ

**В. І. Скалозубов, І. Л. Козлов\*, Т. В. Габляя, К. В. Скалозубов**

*Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Лисогірська, 12, корп. 106, Київ, 03028, Україна*  
*\*Одеський національний політехнічний університет, просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна*

Проведено аналіз проектів, що розробляються з управління важкими аваріями українських ВВЕР з урахуванням уроків Фукусімської аварії. На основі проведеного аналізу встановлено необхідність розширення переліку симптомів умов виникнення важких аварій, а також обліку можливих відмов систем контролю і пасивних систем безпеки. Установлено обмеженість незалежної реалізації окремих стратегій з управління важкими аваріями. Необхідна комплексна реалізація стратегій керівництв з управління важкими аваріями, у тому числі з урахуванням відносно малоімовірних подій (наприклад, парові вибухи).

*Ключові слова:* управління важкими аваріями, Фукусімська аварія.

**V. I. Skalozubov, I. L. Kozlov\*, T. V. Gablaia, K. V. Skalozubov**

*Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants NAS of Ukraine, Lysogirska str., 12, building 106, Kyiv, 03028, Ukraine*  
*\*Odessa national polytechnic university, boulevard Shevchenko, 1, Odessa, 65044, Ukraine*

### EFFECTIVENESS ANALYSIS MANAGEMENT GUIDE SEVERE ACCIDENTS ON WWER BASED ON LESSONS FUKUSHIMA ACCIDENT

The article analyzes being developed projects for severe accident management on Ukrainian WWER based on lessons Fukushima accident. Based on the analysis, identified the need to expand the list of symptoms of severe accident conditions, and taking into account possible failures of control systems and passive safety systems. Limitations established independent implementation of individual strategies for managing severe accidents. Require a comprehensive strategy implementation guidelines for severe accident management, including the relatively rare events (for example, steam explosions).

*Keywords:* severe accidents management, Fukushima accident.

## REFERENCES

1. Skalozubov V. I., Kliuchnykov O. O., Kolihanov V. N. Management basics beyond design basis accidents with loss heat transfer agent on NPP's with WWER – Chernobyl: Institute for safety problems of NPPs of Ukraine's NAS, 2010. – 400 p. (Rus)
2. *Supper* provided by the SARNET in the Framework Programmes of Research of the European Commission //SARNET. – 6<sup>th</sup> European Review meeting on severe Accident Research (ERMSAR-2013). – Avignon (France), Palais des Papes. – 2 - 4 October, 2013.
3. Skalozubov V. I., Kliuchnykov A. A., Vashenko V. N., Yarovoy S. S. Analysis of the causes and consequences of the accident at the NPP Fukushima as a factor in the prevention of severe accidents in tank reactors. – Chernobyl: Institute for safety problems of NPPs of Ukraine's NAS, 2012. – 280 p. (Rus)

Надійшла 03.06.14

Received 03.06.14