

А. А. Ключников, Г. М. Федоренко, Я. С. Буева

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, ул. Лысогорская, 12, корп. 6, Киев, 03028, Украина

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ВОДОРОДНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ, НАДЕЖНОСТИ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ БЛОКОВ АЭС

Приведены основы водородной безопасности, надежности и энергоэкологической эффективности блоков и машинных залов АЭС, что является важной частью обеспечения безопасности АЭС. Рассмотрены основные источники водорода на АЭС, такие как радиационно-химическое образование водорода в теплоносителе 1-го контура (радиолиз внутриконтурного теплоносителя; разложение гидразина и аммиака; коррозии нержавеющих и углеродистых сталей радиолиза пара в герметичных помещениях); пароциркониевая реакция; окисление металла; СО эффект. Составлен список возможных примесей, что могут попасть в корпус генератора, показано их влияние на чистоту и суммарные механические потери. Основными примесями, попадающими в корпус генератора, являются вода, турбинное масло, кислород, водомасляная аэрозоль. Повышение чистоты водорода в турбогенераторах уменьшает механические потери на трение ротора и бандажа, на трение в подшипниках, а также на вентиляцию. Рассмотрена возможность использования металлгидридов для обеспечения чистоты, очистки, сорбции и хранения водорода. Разработаны основы концепции и стратегии безопасности АЭС.

Ключевые слова: водородная безопасность, вероятностный анализ безопасности, система охлаждения генератора, чистота водорода, использование металлгидридов.

Общие положения безопасности устанавливают, что основной целью безопасности АЭС является защита персонала, населения и охрана окружающей среды от вредного воздействия ионизирующего излучения при вводе в эксплуатацию, эксплуатации и снятии с эксплуатации АЭС. Необходимо стремиться к тому, чтобы вероятность тяжелых аварий была наименьшей и соответствовала установленным критериям, а именно не превышению частоты тяжелого повреждения активной зоны, которая должна быть не больше 10^{-5} на реактор в год. Международной консультативной группой по ядерной безопасности предоставлено требование по обеспечению безопасности реакторов третьего поколения выше по сравнению с показателями, установленными для действующих реакторов. Необходимо разработать и обосновать использование системного подхода для обеспечения надежной и эффективной эксплуатации АЭС [1]. В большинстве стран цели безопасности начали определять с 1980-х годов и они были весьма ограничены по объему. К настоящему времени ограничивались выполнением вероятностного анализа безопасности (ВАБ) первого уровня, который выполнен для большинства реакторных установок, основным его вероятностным показателем безопасности является частота повреждения активной зоны (ЧПАЗ) реакторной установки.

ЧПАЗ - это уровень опасности, выраженный как среднее ожидаемых повреждений активной зоны во времени, расчетное (или ожидаемое) количество случаев повреждений активной зоны реактора на календарный год эксплуатации энергоблока.

Пример результатов выполнения ВАБ первого уровня для 1-го блока ЮУАЭС (2001) приведен в табл. 1 [2].

Суммарная ЧПАЗ для аварий с потерей теплоносителя составляет $8,173 \cdot 10^{-5}$, что вносит самый большой вклад. Аварии с потерей теплоносителя для ЮУАЭС возглавляют перечень доминантных аварийных последовательностей. Суммарная ЧПАЗ ЮУАЭС-1 составила $1,515 \cdot 10^{-4}$ (см. табл. 1).

Риски от АЭС (ЧПАЗ) могут быть рассчитаны с достаточной уверенностью до значений 10^{-6} - 10^{-7} реакторо-год⁻¹, что является границей получения достоверных оценок [3]. Неполнота аварийных последовательностей, а также многочисленные не поддающиеся учету факторы создают слишком большие неопределенности, которые довольно затруднительно рассчитать. Особенно трудно задать связь между частотой и тяжестью последствий внешних или других единичных событий. В общем случае [4]

$$ЧПАЗ = \Phi \{КИУМ(t), K_c(t), K_o(t)\}, \quad (1)$$

где $КИУМ(t)$ – коэффициент использования установленной мощности; $K_c(t)$ – коэффициент готовности блока; $K_o(t)$ – коэффициент безотказной работы персонала.

© А. А. Ключников, Г. М. Федоренко, Я. С. Буева, 2013

Таблица 1

Исходное событие аварии (ИСА)	Условная вероятность	Частота ИСА	ЧПАЗ	% от группы ИСА	% от ЧПАЗ
Аварии с потерей теплоносителя					
А «Большие течи 1-го контура»	$6,541 \cdot 10^{-4}$	$3,000 \cdot 10^{-4}$	$1,977 \cdot 10^{-5}$	24,2	13,1
S1 «Средние течи 1-го контура»	$4,199 \cdot 10^{-3}$	$1,261 \cdot 10^{-4}$	$5,242 \cdot 10^{-7}$	0,6	0,3
S2 «Малые некомпенсируемые течи 1-го контура (Ду30-50 мм)»	$3,675 \cdot 10^{-3}$	$6,594 \cdot 10^{-2}$	$6,594 \cdot 10^{-2}$	4,8	2,6
S3 «Малые течи 1-го контура (Ду 14 - 30 мм), компенсируемые системой ТК»	$1,288 \cdot 10^{-3}$	$3,000 \cdot 10^{-3}$	$3,841 \cdot 10^{-6}$	4,7	2,5
S4 «Малые течи 1-го контура (Ду < 14 мм), компенсируемые системой ТК»	$2,193 \cdot 10^{-4}$	$2,451 \cdot 10^{-1}$	$5,367 \cdot 10^{-5}$	65,7	35,4
ЧПАЗ, для аварий с потерей теплоносителя			$8,173 \cdot 10^{-5}$	100	54,0
Переходные процессы					
T1 «Потеря электроснабжения от всех секций 6 кВ собственных нужд»	$1,572 \cdot 10^{-3}$	$1,000 \cdot 10^{-2}$	$1,570 \cdot 10^{-5}$	38,0	10,4
T2 «Полная потеря основной питательной воды в результате разрыва/течи линии подпитки парогенераторов»	$8,446 \cdot 10^{-4}$	$5,000 \cdot 10^{-3}$	$4,223 \cdot 10^{-6}$	10,2	2,8
T31 «Переходные процессы, ведущие к срабатыванию аварийной защиты»	$9,006 \cdot 10^{-6}$	$1,327 \cdot 10^{-3}$	$1,984 \cdot 10^{-5}$	29,0	7,9
T32 «Потеря вакуума конденсаторов турбин»	$7,761 \cdot 10^{-5}$	$1,224 \cdot 10^{-1}$	$9,463 \cdot 10^{-6}$	22,9	6,2
Всего, для переходных процессов			$4,136 \cdot 10^{-5}$	100	27,3
Специальные инициаторы					
T41 «Малая течь 1-го контура во 2-й»	$1,983 \cdot 10^{-4}$	$4,550 \cdot 10^{-2}$	$8,983 \cdot 10^{-6}$	31,1	5,9
T42 «Средняя течь 1-го контура во 2-й по парогенераторах»	$8,039 \cdot 10^{-3}$	$2,000 \cdot 10^{-3}$	$1,607 \cdot 10^{-5}$	56,6	10,6
T5/T7 «Разрыв трубопроводов питательной воды/пара в пределах гермообъема»	$1,724 \cdot 10^{-4}$	$7,100 \cdot 10^{-3}$	$1,222 \cdot 10^{-6}$	4,3	0,8
T61 «Неизолируемый разрыв паропровода за пределами гермообъема между парогенератором и быстродействующим запорным клапаном»	$1,275 \cdot 10^{-5}$	$5,800 \cdot 10^{-3}$	$7,119 \cdot 10^{-8}$	0,3	0,0
T62 «Изолируемый разрыв паропроводов за пределами»	$4,592 \cdot 10^{-3}$	$4,400 \cdot 10^{-4}$	$2,021 \cdot 10^{-6}$	7,1	1,3
V «Неизолируемые течи 1-го контура за пределы гермообъема в системе продувки-подпитки»	$1,404 \cdot 10^{-2}$	$3,640 \cdot 10^{-7}$	$5,064 \cdot 10^{-9}$	0,02	0,003
Всего, для специальных инициаторов			$2,837 \cdot 10^{-5}$	100	18,7
Итого			$1,515 \cdot 10^{-4}$	100 %	

При этом КИУМ рассчитывается по формуле [5]

$$КИУМ = \frac{W}{N_y \cdot T_k} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где W - фактическая выработка электроэнергии за отчетный период, МВт-ч; N_y - установленная мощность энергоблока, МВт; T_k - календарное время, ч.

КИУМ учитывает недовыработку электроэнергии, фактическое использование возможностей энергоблока. Представляет собой коэффициент использования реакторной установки на протяжении определенного периода времени и также характеризует техническое состояние оборудования и уровень подготовки персонала.

Коэффициент готовности показывает отношение времени исправной работы к сумме времени исправной работы и вынужденных простоев устройств, взятых за один и тот же календарный срок:

$$K_g = \frac{t_p}{t_p + t_n}, \quad (3)$$

где t_p - время работы, ч; t_n - время вынужденного простоя, ч.

Безопасность работы АЭС напрямую зависит от надежности техники и персонала. Одним из определяющих параметров надежности персонала является безошибочность действий человека. На АЭС по вине персонала, по разным оценкам, происходит от 15 до 40 % всех аварий и от 20 до 80 % всех нарушений на АЭС [2]. Человеческий фактор является одним из важных факторов, который всегда необходимо учитывать, для поддержания и обеспечения высокого уровня культуры безопасности на блоках АЭС. Основы концепции обеспечения безопасности блоков АЭС представлены на рис. 1 [4 - 7]. В центре концепции лежит система знаний необходимая не только для безопасной эксплуатации блока, но и для предотвращения и уверенного управления аварией. Также одним из важных элементов концепции безопасности является законодательный блок, который состоит из законов, норм и правил на государственном, местном и международном уровнях. Другим важным элементом есть реализация стратегии глубокошелонированной защиты на всех пяти уровнях и поддержание высокой культуры безопасности, что непосредственно можно проконтролировать с помощью индикаторов представленных на рис. 1.

Посмотрим, как изменились значения ЧПАЗ для украинских АЭС за последние 10 лет (рис. 2) [8].

ЧПАЗ некоторых украинских АЭС составляет: блок № 1 ЮУАЭС (2011) (точка 19, см. рис. 2) – $1,77 \cdot 10^{-5}$; блок № 2 ЮУАЭС (2011) – $3,42 \cdot 10^{-5}$; блок № 3 ЮУАЭС (2011) (точка 21, см. рис. 2) – $7,82 \cdot 10^{-5}$; блок № 5 ЗАЭС (2009) – $1,03 \cdot 10^{-5}$; блок № 1 РАЭС (2010) (точка 20, см. рис. 2) – $1,75 \cdot 10^{-5}$; блок № 2 РАЭС (2010) – $1,69 \cdot 10^{-5}$. Для примера в 2001 ЧПАЗ для блока № 1 ЮУАЭС – $1,515 \cdot 10^{-5}$; блока № 3 РАЭС – $8,6 \cdot 10^{-5}$; блока № 5 ЗАЭС – $4,7 \cdot 10^{-5}$, которые обозначены точками 13, 14, 15.

За последние 20 - 30 лет достигнут значительный прогресс в области безопасности АЭС. Частота разрушения активной зоны уменьшилась с 10^{-3} до 10^{-5} , т.е. в $10^{-3}/10^{-5} = 100$ раз и постоянно стремится к усовершенствованию. Для новейших типов реакторов, прогресс в которых будет достигнут за счет эволюционных усовершенствований и внедрения инноваций, вероятность разрушений активной зоны составит 10^{-7} .

Комплексная (сводная) программа повышения безопасности энергоблоков АЭС Украины (КСППБ) включает более 800 мероприятий по повышению безопасности, среди которых немало было выполнено за несколько последних лет на АЭС Украины. Среди них большое внимание уделяется экологической, противопожарной и водородной безопасности.

Одной из актуальных проблем повышения пожарной безопасности АЭС является снижение взрывоопасности процессов, протекающих с участием водорода. Водород образуется как при нормальной эксплуатации блока, так и при определенных нарушениях правил эксплуатации АЭС [9].

В табл. 2 приведены основные физико-химические свойства водорода, воздуха и гелия.

Основными источниками водорода на АЭС являются: радиационно-химическое образование водорода в теплоносителе 1-го контура (радиолиз внутриконтурного теплоносителя; разложение гидразина и аммиака; коррозии нержавеющей и углеродистых сталей радиолиза пара в герметичных помещениях) [10]; парциркуниевая реакция; окисление металла; СО эффект.

В аварийных процессах при расплавлении активной зоны вода начинает кипеть и возникающая при этом пленка препятствует теплопередаче и ведет тем самым в первые секунды с начала аварии к повышению температуры топливных сборок. Если в ходе этого процесса температура оболочки

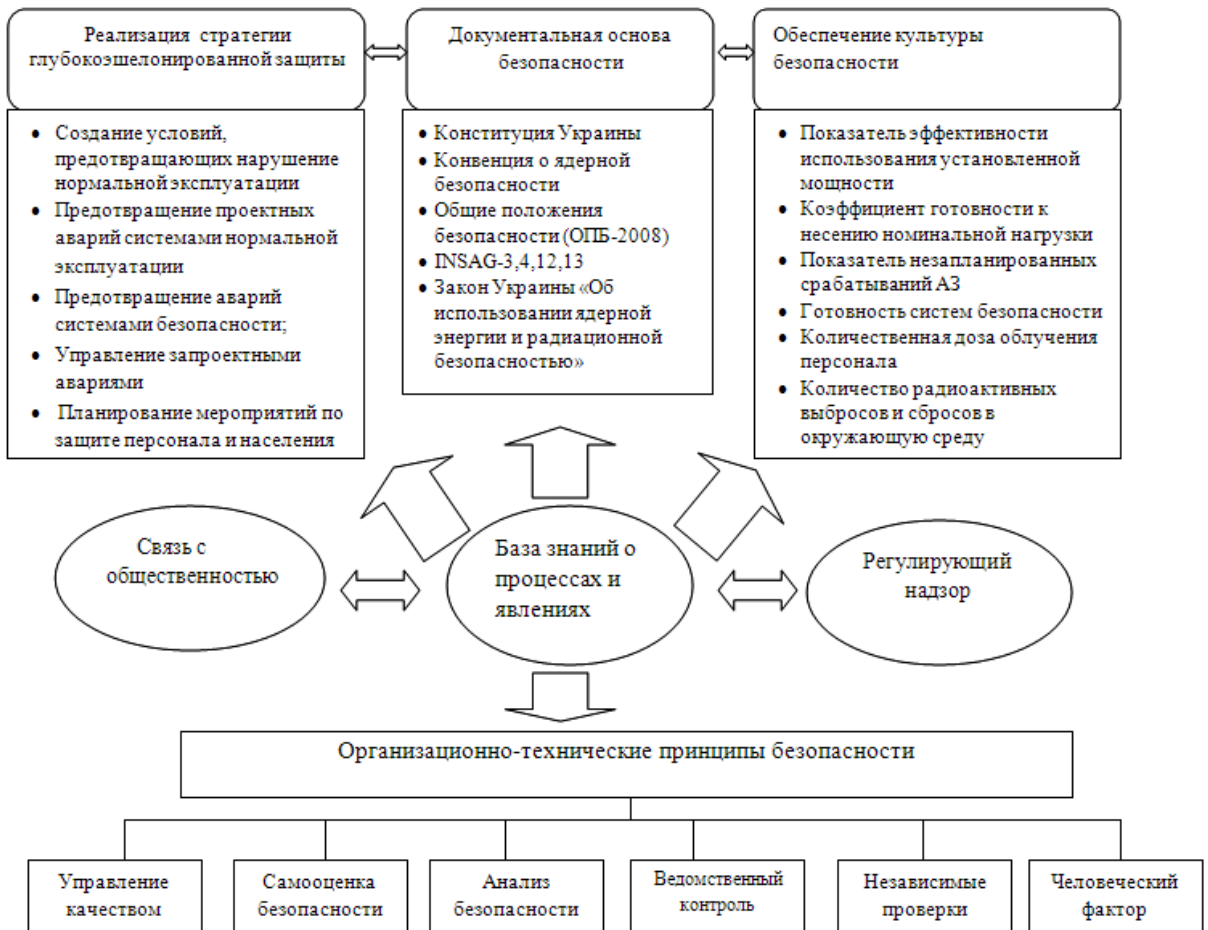


Рис. 1. Основы концепции и стратегии безопасности.



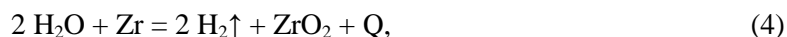
Рис. 2. Основные тренды в обеспечении безопасности ядерных реакторов:

1 - Sizewell B; 2 - N4; 3 - Biblis B; 4 - Konvoj; 5 - EPR; 6 - P-Bottom; 7 - Zion; 8 - Surry; 9 - AP-600; 10 - ABWR; 11 - CANDU; 12 - Sys80+; 13, 19 - ВВЭР-1000 (блок № 1 ЮУАЭС); 14 – ВВЭР-1000 (блок № 3 РАЭС); 15, 21 - блок № 5 ЗАЭС); 16 - APR-1400 (АЭС Shin-Kori, Корея); 17, 18 - ВВЭР-440 (АЭС Богунце, Словакия); 20 - ВВЭР-440 блок № 2 РАЭС.

Таблица 2

Параметр	Водород	Воздух	Гелий
Агрегатное состояние	Газ, жидкость, твердое состояние, металлическое состояние	Смесь газов	Газ, жидкость, твердое состояние
Химический состав	H ₂	N ₂ , O ₂ , Ar, CO ₂ , Ne, CH ₄ , He, Kr, H ₂ , Xe	He
Молекулярная масса	2,016	28,98	4,0026
Плотность (газ, при 20 °С), кг/м ³	0,0695	1,2047	0,1785
Вязкость (газ, при 20 °С), мкПа·с	8,8	17,2	-
Плотность (жидкость), кг/м ³	(при -253 °С) 0,0708	-	(при -268 °С) 0,131
Плотность (твердое состояние), кг/м ³	(при -262 °С) 0,0807	-	(при -273 °С) 0,187
Теплопроводность, Вт/м °С	0,1815	0,02485	0,1437
Удельная теплоемкость, кДж/кг °С	14,208	1,006	5,23
Растворимость в воде, мг/г	0,0188	0,0291	0,0088
Температура кипения, °С	-252,8	-	-268,8
Температура замерзания, °С	-259,14	-	-272,4
Температура самовоспламенения, °С	510	-	-
Молярная теплоемкость, Дж/моль °С	14,2	21,1	20,8
Теплота сгорания, кДж/моль	241,6	-	-
Теплотворная способность (газ), ккал/кг	28900	-	-
Теплотворная способность (жидкость), ккал/кг	28660	-	-
Минимальная энергия зажигания, МДж	0,017	-	-

тепловыделяющего элемента превышает 900 °С, тогда следует учитывать интенсивное образование водорода в результате реакции циркония оболочки с водой и паром. Реакция циркония с водой может быть представлена с помощью уравнения [11]



где теплота реакции $Q = 6280,5$ кДж/кг; интенсивность выделения водорода $0,044$ H₂/кг.

В конструкции реакторов типа ВВЭР не предусмотрено использование системы удаления водорода для тяжелых запроектных аварий. Концентрация водорода, образующегося в течение аварии, может достигнуть уровня детонации, что может привести к разрушению оболочки. Самовоспламенение водородно-воздушных смесей в присутствии водяного пара происходит при температуре 540 - 820 °С [12].

Большая концентрация водорода в теплоносителе 1-го контура отрицательно влияет на материалы корпусного оборудования. Работоспособность корпусного оборудования реакторов АЭС определяется механическими свойствами сталей и влиянием на них рабочих сред. Особенное внимание стоит обратить на циклическую трещиностойкость основного металла и его сварных соединений. При переходных режимах работы коррозионные процессы могут активизироваться, и может произойти наводородообразование металла корпуса реактора, которое интенсифицируется еще и нейтронным облучением.

Необходимо учитывать водородную опасность машинных залов АЭС, а именно наличие водорода в системах охлаждения генератора.

Общий объем водорода в наиболее распространенных турбогенераторах ТЭС и АЭС представлен в табл. 3 [13].

На блоках АЭС Украины используются турбогенераторы ТВВ-220-2УЗ (РАЭС-1, 2), ТВВ-1000-2УЗ (РАЭС-3, 4; ХАЭС-1, 2; ЮУАЭС-3), ТВВ-1000-4УЗ (ЮУАЭС-1,2; ЗАЭС-1, 2, 3, 4, 5, 6) с H₂/H₂O охлаждением [14]. Для генератора типа ТВВ-1000-2УЗ используется водород с чистотой не менее 98 %, с содержанием кислорода не более 1,2 % и относительной влажностью (при температуре +40 °С) не более 20 % [15].

Таблица 3

Тип турбогенератора	Активная мощность, МВт	Напряжение статора, кВ	Система охлаждения	Газовый объем, м ³
ТВВ-220-2А	220	15,75	H ₂ / H ₂ O	56
ТГВ-200-2	200	15,75	H ₂	70
ТГВ-500	500	20,0	H ₂ / H ₂ O	73
ТВВ-500-2	500	20,0	H ₂ / H ₂ O	100
ТВВ-800-2	800	24,0	H ₂ / H ₂ O	126
ТВВ-1000-2Е	1000	24,0	H ₂ / H ₂ O	126
ТВВ-1200-2	1200	24,0	H ₂ / H ₂ O	160

Основными примесями, попадающими в корпус генератора, являются: вода (с максимальной концентрацией при эксплуатации 25 - 30 г/м³), турбинное масло (5,0 г/м³), кислород (0,2 г/м³), водомасляная аэрозоль (0,15 г/м³) [16].

Повышение чистоты водорода в турбогенераторах уменьшает механические потери, к которым относятся: потери на трение ротора Q_{рот} и бандажа Q_б, потери на трение в подшипниках, потери на вентиляцию Q_{вент}. В общем виде их можно записать как [16]

$$\sum Q = Q_{рот} + Q_{б} + Q_{вент}; \tag{5}$$

$$Q_{рот} = 57,3 \cdot 10^{-5} \frac{1}{r^2} (D_p) \gamma \cdot l_p P_{H_2}; \tag{6}$$

$$Q_{б} = 57,3 \cdot 10^{-5} \frac{1}{r^2} (D_b) \gamma \cdot l_b P_{H_2}; \tag{7}$$

$$Q_{вент} = \frac{q H_{вент}}{\eta_{вент}} 10^{-3}, \tag{8}$$

где D_p, l_p – диаметр и длина бочки ротора и бандажного кольца соответственно, м; r – число пар полюсов; P_{H₂} – давление газа (водорода) в корпусе, Па; γ – плотность охлаждающего газа в корпусе относительно плотности воздуха, кг/м³; z – доля содержания водорода в хладагенте, о.е.; q – расход газа, м³/с; H_{вент} – напор вентилятора, Па; η_{вент} – КПД вентилятора.

Так же определены условия флегматизации водородсодержащих смесей инертными разбавителями. Кривые флегматизации для ряда разных составов показаны на рис. 3 [9]. По этим кривым могут быть вычислены безопасные концентрации водорода, где φ_r – концентрация водорода при разбавлении смеси химически инертным флегматизатором (% объема); φ_ф – концентрация разбавителя в смеси (% объема).

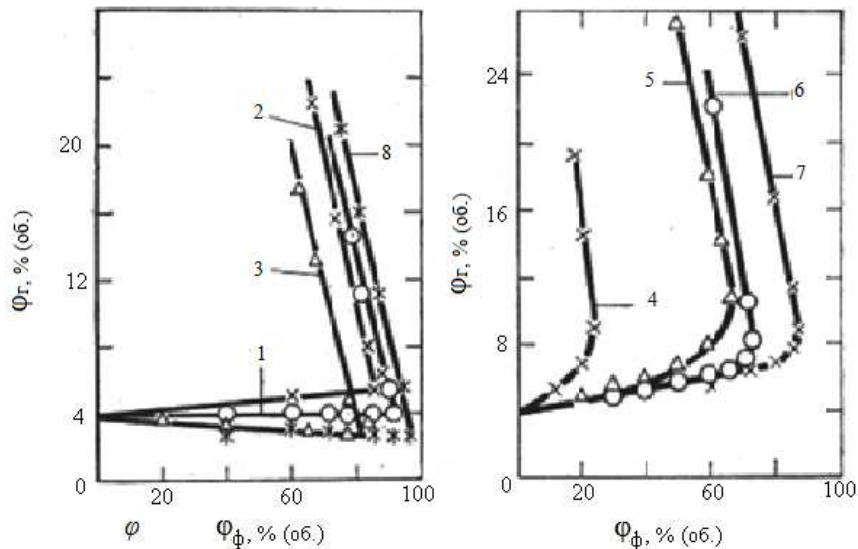


Рис. 3. Зависимость концентрационных пределов воспламенения водорода от содержания разбавителя в смесях:

- 1 - H₂—N₂—O₂; 2 - H₂—CO₂—O₂; 3 - H₂—Ar — воздух; 4 - H₂—C₂F₅Cl — воздух; 5 - H₂—C₂F₅Cl—O₂;
- 6 - H₂—He — воздух; 7 - H₂—He—O₂; 8 - H₂—Ar—O₂.

В табл. 4 приведены результаты расчета механических потерь для разных значений давлений [17]. Видим, что присутствие примесей увеличивает суммарные механические потери не меньше чем в 1,25 - 1,45 раза.

Таблица 4

Потери, кВт	P _{H2} , МПа	0,2		0,3		0,4		0,5	
		γ (чистый водород)	γ (водород + примеси)	γ (чистый водород)	γ (водород + примеси)	γ (чистый водород)	γ (водород + примеси)	γ (чистый водород)	γ (водород + примеси)
Плотность, кг/м ³		0,09	0,1203	0,09	0,1203	0,09	0,1203	0,09	0,1203
Q _{рот}		153,98	517,99	384,96	414,39	307,97	414,39	384,96	517,99
Q _б		26,46	89,01	66,15	71,21	52,92	71,21	66,15	89,01
Q _{вснт}		374,4	1259,22	936	1007,55	748,8	1007,55	936	1259,22
ΣQ		554,85	1866,45	1387	1493,16	1109,70	1493,16	1387	1866,45

Для обеспечения чистоты водорода можно использовать металлогидриды [18]. Наиболее практическую пригодность имеют такие гидриды, как LaNi₅H_x, FeTiH_x, ZrNiH_x. Основным преимуществом металлогидридного способа очистки является значительное сокращение количества стадий очистки. Проведение цикла сорбций водорода металлогидридом позволяет совершить эти процедуры в одну стадию, в зависимости от загрязненности водорода объемная доля примесей в водороде будет составлять 10⁻⁴-10⁻² % (об.). В ходе исследований было показано, что наиболее устойчивыми к действию примесей являются интерметаллиды на основе редкоземельных металлов, с высоким содержанием негидридообразующего компонента, в первую очередь LaNi₅ и его производные.

Важным вопросом является хранение запаса водорода. Металлогидридные водородохранилища обладают большей емкостью и более высокой взрывобезопасностью, чем традиционные газобаллоны. При этом избыточное давление не будет превышать 1-2 атм при комнатной температуре.

Выводы

1. Все задачи ВАБ АЭС решаются в рамках ВАБ первого уровня. В большинстве случаев вероятностный анализ безопасности АЭС ограничивается этим уровнем. К настоящему времени ВАБ - 1 выполнен для большинства ядерных установок мира.
2. В связи с уникальными горючими свойствами и характеристиками водорода необходимо изучение его взрывоопасных параметров, условий образования взрывоопасных смесей водорода с воздухом, разработки и внедрение систем контроля концентрации водорода, разработка и внедрение мероприятий по снижению концентрации водорода, предупреждения загорания водородовоздушных смесей и их тушения.
3. Водород на АЭС появляется как результат нормального или аварийного функционирования ядерного блока. К основным источникам генерации взрывоопасного водорода на АЭС с ВВЭР являются: пароциркониевая реакция; радиационно-химическое образование водорода в теплоносителе 1-го контура (вследствие радиолиза, разложения гидразина и аммиака); окисление металла; СО эффект.
4. При переходных процессах возможно наводородораживание корпуса реактора и его сварных соединений, что снижает его физико-механические характеристики и приводит к охрупчиванию металлов и коррозионному растрескиванию.
5. Большую опасность представляет водород в системах охлаждения генераторов. Водород имеет ряд преимуществ по сравнению с другими хладагентами. Плотность водорода в 14,3 раза меньше, чем воздуха (при 3 % примеси воздуха - в 10 раз) и потери на трение вращающегося ротора генератора в водороде в 10 раз меньше, чем в воздухе; теплоемкость водорода в 14 раз больше, чем воздух; теплоотдача в 3,6 раза больше; КПД машины с водородным охлаждением на 1 % больше, чем с воздушной системой.
6. Основными примесями, попадающими в корпус генератора, являются: вода, турбинное масло, кислород, водомасляная аэрозоль. Снижение чистоты водорода приводит к росту потерь мощности в генераторе. Присутствие примесей увеличивает суммарные механические потери в 1,25 - 1,45 раза.

7. Для обеспечения чистоты водорода, очистки от газовых примесей либо селективного извлечения из водородсодержащих газов, компримирования, сорбций целесообразно использовать металлогидриды. Наиболее практическую пригодность имеют такие гидриды, как LaNi_5H_x , FeTiH_x , ZrNiH_x , что позволяет сократить объемную долю примесей в водороде до 10^{-4} - 10^{-2} % (об).

8. Наиболее устойчивыми к действию примесей являются интерметаллиды на основе редкоземельных металлов, с высоким содержанием негидридообразующего компонента, в первую очередь LaNi_5 и его производные.

9. Возможно использование воздуха и гелия в системах охлаждения генератора вместо водорода. Замена турбогенераторов типа ТВВ-220-2УЗ 1-го и 2-го блоков РАЭС на турбогенераторы завода «Электротяжмаш» мощностью 250 МВт с воздушным охлаждением значительно увеличит взрыво- и пожаробезопасность машинных залов, повисит надежность и энергоэкологическую эффективность 1-го и 2-го блоков РАЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ключников О.О.* У зоні підвищеної відповідальності (Алгоритм забезпечення надійності атомних електростанцій) // Вісник НАН України. – 2010. - № 4. – С. 41 - 47.
2. *Бегун В.В., Горбунов О.В., Каденко І.М.* Імовірносний аналіз безпеки атомних станцій: Навч. посібник. – К., 2000. – 568 с.
3. *Громов Г.В., Севбо А.Е.* К вопросу определения интегральной частоты повреждения активной зоны // Ядерна та радіаційна безпека. – 2009. Вип. 4. - С. 23 - 26.
4. *Кенсицький О.Г., Ключников А.А., Федоренко Г.М.* Безопасность, надежность и эффективность эксплуатации электротехнического и электроэнергетического оборудования блоков АЭС. – Чернобыль: Ин-т проблем безопасности АЭС, 2009. – 240 с.
5. *Бегун В.В., Бегун С.В., Широков С.В.* Культура безопасности на ядерных объектах Украины: Учебное пособие – К., 2009. – 363 с.
6. *Асмалов В.Г., Сидоренко В.А.* Безопасность ядерной энергетики: настоящее и гарантии на будущее // Атомная энергия. - 2004. - Т. 96, вып. 1. - С. 3 - 23.
7. *Загальні положення безпеки атомних станцій.* Затверджено наказом Державного комітету ядерного регулювання України № 162 від 19 листопада 2007 р. Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 25 січня 2008 р. за № 56/14747.
8. *Catastrophe-free Nuclear Technology for the Future World (Безопасная ядерная технология для производства энергии).* Kugeler, Kurt; Phlippen, Peter-W; Research Centre Germany. Word Energy Council, 16 th CONGRESS TOKYO '95.
9. *Микеев А.К.* Противопожарная защита АЭС - М.: Энергоатомиздат, 1990. - 432 с.
10. *Семашко С.Е., Безлепкин В.В.* Мероприятия по обеспечению водородной взрывобезопасности для энергоблоков № 1, 2 Кольской АЭС ВВЕР-440/230. – Подольск: ФГУП ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 2005.
11. *Теплофизика безопасности электростанций: монография / А. А. Ключников, И. Г. Шараевский и др.–* Чернобыль: Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2010. – 484 с.
12. *INTERNETIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Mitigation of Hydrogen hazards in severe accidents in nuclear power plants, IAEA-TECDOC-1661.* - Vienna, 2011.
13. *Науково-технічний звіт «Підвищення енергоефективності, пожежо- та вибухобезпеки турбогенераторів ТЕС та АЕС з водневими системами охолодження».* ДР 0107110065.07 / ІЕД НАН України. – К., 2008.
14. *Счастливый Г.Г., Федоренко Г.М., Выговский В.И.* Турбо- и гидрогенераторы при переменных графиках нагрузки. – К.: Наук. думка, 1985. – 208 с.
15. *Федоренко Г.М., Давидов О.М., Дудченко М.В.* Моделювання впливів параметрів чистоти водню на механічні втрати в турбогенераторі з безпосереднім водневим охолодженням типу ТВВ-1000-2УЗ // Праці інституту електродинаміки НАН України. – 2011. – Вип. 28. – С. 76 - 81.
16. *Федоренко Г.М., Остапчук Л.Б., Кенсицький Г.О.* Безпека, надійність потужних генераторів та шляхи їх підвищення // Там же. – Вип. 30. – С. 39 - 42.
17. *Дайджест научно-технических разработок ИПМаш им. А. Н. Подгорного НАН Украины / Под ред. В. В. Соловьева.* – 2008. – Вип. Металлогидридные технологии. – 36 с.
18. *Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідковий посіб. / Під заг. ред. В. В. Панасюка. Т. 8. Міцність матеріалів та довговічність елементів конструкцій атомних електростанцій / О. О. Балицький, В. А. Грабовський.* – К.: ВД «Академперіодика», 2005. - 378 с.

О. О. Ключников, Г. М. Федоренко, Я. С. Буева

Институт проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Лисогірська, 12, корп.106, Київ, 03028, Україна

НАУКОВІ ОСНОВИ ВОДНЕВОЇ БЕЗПЕКИ, НАДІЙНОСТІ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ БЛОКІВ АЕС

Наведено основи водневої безпеки, надійності та енергоефективності блоків і машинних залів АЕС, що є важливою частиною забезпечення безпеки АЕС. Розглянуто основні джерела водню на АЕС: радіаційно-хімічне утворення водню в теплоносії 1-го контуру (радіоліз внутрішньоконтурного теплоносія; розклад гідрозину та аміаку; корозії нержавіючих і вуглецевих сталей, радіолізу пари в герметичних приміщеннях); парцирконієва реакція; окислення металу; СО ефект. Складено список можливих домішок, що можуть потрапити в корпус генератора, показано їхній вплив на чистоту і сумарні механічні втрати. Основними домішками, що потрапляють у корпус генератора, є вода, турбінне масло, кисень, водомасляний аерозоль. Підвищення чистоти водню в турбогенераторах зменшує механічні втрати, до яких відносяться: втрати на тертя ротора і бандажа, втрати на тертя в підшипниках, втрати на вентиляцію. Розглянута можливість використання металогідридів для забезпечення чистоти, очищення, сорбції та зберігання водню. Розроблено основи концепції і стратегії безпеки АЕС.

Ключові слова: воднева безпека, імовірнісний аналіз безпеки, система охолодження генератора, чистота водню, використання металогідридів.

O. O. Kliuchnykov, G. M. Fedorenko, Ya. S. Bueva

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

SCIENTIFIC BASIS OF HYDROGEN SAFETY, RELIABILITY AND ENERGY EFFICIENCY NUCLEAR POWER PLANTS

The basis of hydrogen safety, reliability and energy efficiency blocks and turbine building nuclear power plants are presented. The fundamentals of vision and strategy for nuclear security were developed. We have reported the main sources of hydrogen from nuclear power. Radiation-chemical formation of hydrogen in the coolant of the 1st contour (the radiolysis of the coolant; decomposition of hydrazine and ammonia, corrosion of stainless and carbon steel, steam radiolysis in the containment), the high-temperature reaction of zirconium and steam, oxidation of the metal, CO effect. The compiled a list of possible admixtures that can get into the body of the generator, showed their influence on the purity and total mechanical losses. The main admixtures that get into the body of the generator are: water, turbine oil, oxygen, water-oil spray. Therefore, the increase the purity of the hydrogen in turbogenerators have reduces mechanical losses, such as losses due to friction of the rotor and the tie, friction losses in the bearings, the losses on ventilation. In conclusion, the ensure the cleanliness the hydrogen gas removal of admixtures or selective extraction of hydrogen gas is possible of using metal hydrides.

Keywords: hydrogen safety, probabilistic safety analysis, the cooling system of the generator, cleanliness hydrogen, the use of metal hydrides.

REFERENCES

1. *Kluchnikov O.O.* In the area of the high responsibility (The algorithm of ensure the reliability of nuclear power plants) // *Visnuk NAN Ukrainy*. – 2010. - № 4. – P. 41 - 47. (Ukr)
2. *Begun V.V., Gorbunov O.V., Kadenko I.M.* A probabilistic Safety Analysis of nuclear power stations: Training guide.– Kiev, 2000. – 568 p. (Ukr)
3. *Gromov G.V., Sevbo A.E.* On the determination of the integral core damage frequency // *Yaderna ta radiatsiyna bezpeka*. – 2009. Iss. 4. - P. 23 - 26. (Rus)
4. *Kensytskiy O.G., Kluchnikov A.A., Fedorenko G.M.* Safety, reliability and efficiency exploitation of electrical power equipment and nuclear power units. – Chernobyl: Institute for safety problems of nuclear power plants, 2009. – 240 p. (Rus)
5. *Begun V.V., Begun S.V., Shyrokov S.V.* Culture of Security at nuclear facilities in Ukraine: Training guide – Kiev, 2009. – 363 p. (Rus)
6. *Asmalov V.G., Sydorenko V.A.* Nuclear Power: the present and the guarantee for the future // *Atomnaya energiya*. - 2004. - T. 96, Iss. 1. - P. 3 - 23. (Rus)
7. *General position of the safety of nuclear power stations.* Approved by the State Nuclear Regulatory Committee of Ukraine № 162 on November 19, 2007. Registered in the Ministry of Justice of Ukraine on January 25, 2008 under number 56/14747 (Ukr)
8. *Catastrophe-free Nuclear Technology for the Future World (The safety of nuclear technology for energy production).* Kugeler, Kurt; Phlippen, Peter-W; Research Centre Germany. Word Energy Council, 16 th CONGRESS TOKYO '95.

9. *Mikeev A.K.* Fire protection of the nuclear power plant. - Moskva: Energoatomizdat, 1990. - 432 p. (Rus)
10. *Semashko S.E., Bezlepkin V.V.* The measures to ensure the hydrogen explosion protection for power units №1, 2 Kola NPP VVER-440/230. – Podolsk: FGYP OKB «GIDROPRESS», 2005. (Rus)
11. *Thermophysics* security stations: Monograph / A. A. Kluchnikov, I.G. Sharaevskiy. – Chornobyl: Institute for safety problems of nuclear power plants, 2010. – 484 p. (Rus)
12. *INTERNETIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY*, Mitigation of Hydrogen hazards in severe accidents in nuclear power plants, IAEA-TECDOC-1661. - Vienna, 2011.
13. *The scientific and technical report of "Improving energy efficiency, fire and explosion safety turbogenerators of the thermal and nuclear power plants with hydrogen cooling systems".* DR 0107110065.07 / IED NAN Ukrainy. – Kyiv, 2008. (Ukr)
14. *Schaslyviy G.G., Fedorenko G.M., Vygovskiy V.I.* Turbo and hydro generators at variable load schedule. – Kiev: Naykova dumka, 1985. – 208 p. (Rus)
15. *Fedorenko G.M., Davydov O.M., Dudchenko M.V.* Modelling of the influence of parameters cleanliness hydrogen on the mechanical losses in turbogenerator with direct hydrogen cooling type TVV-1000-2UZ // Pratsi instytutu elektrodunamiky NAN Ukrainy. – 2011. – Iss. 28. – P. 76 - 81. (Ukr)
16. *Fedorenko G.M., Ostapchuk L.B., Kensytskiy O.G.* Safety and reliability of power generators and ways of there improve // Pratsi instytutu elektrodunamiky NAN Ukrainy. – Iss. 30. – P. 39 - 42. (Ukr)
17. *Digest of Scientific and Technical razrobotok IPMash im. A.N. Podgornogo NAN Ukrainy / Edit. V. V. Solov'ev.* – 2008. – Iss. Metallogudrydnye tehnologii. – 36 p. (Rus)
18. *Fracture mechanics and strength of materials: Help important among / Edit. V. V. Panasuk. T. 8. Strength of materials and longevity of structural elements of nuclear power plants / O. O. Balytskiy, V. A. Grabovskiy.* – Kyiv: V.D. “Akadempriodyka”, 2005. - 378 p. (Ukr)

Надійшла 12.06.2012
Received 12.06.2012