

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)

**ДИАГНОСТИКА И БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ
И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ**
DIAGNOSTICS AND SAFETY OF TECHNICAL AND ENVIRONMENT SYSTEMS

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-2-151-165>
УДК 536.468;544.454.3;621.039.587



Оригинальная статья

Д. Л. Третинников, А. В. Дойникова*, П. К. Нагула

*Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны
Национальной академии наук Беларуси,
Луговослободской с/с, р-н д. Прилесье, 47/22, 223063, Минский район,
Минская область, Республика Беларусь*

**АНАЛИЗ ВОДОРОДНОЙ ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ АЭС С РЕАКТОРОМ ТИПА
ВВЭР-1200/В-491 ПРИ ПРОТЕКАНИИ ТЯЖЕЛОЙ ЗАПРОЕКТНОЙ АВАРИИ**

Аннотация. Представлены результаты расчетного анализа с помощью программного средства COCOSYS возможных режимов горения водородсодержащей паровоздушной смеси в объеме, ограниченном герметичным ограждением, при протекании тяжелой запроектной аварии (ЗПА). В качестве объекта исследования рассмотрена защитная оболочка энергоблока АЭС с реакторной установкой типа ВВЭР-1200/В-491. Исходным событием исследуемой тяжелой запроектной аварии (ЗПА) с течью теплоносителя принят отрыв трубопровода впрыска системы компенсации давления (Ду179), при этом накладывалось условие одновременного отказа всех активных каналов системы аварийного охлаждения активной зоны реактора. Рассчитаны параметры термодинамического состояния (давление и температура) газовой смеси, а также значения концентрационного распределения водорода в атмосфере под защитной оболочкой. Полученные результаты расчета распространения, накопления водорода и изменения параметров среды использованы для анализа возможных режимов горения в помещениях с использованием трехкомпонентной диаграммы Шапиро–Моффетти. Результаты показали, что при исследуемой тяжелой ЗПА детонация водородсодержащей смеси исключается, а дефлаграция возможна только в боксе парогенераторов, в котором происходит разрыв трубопровода. Таким образом, водородная взрывобезопасность на атомной станции согласно «Правилам обеспечения водородной взрывозащиты на атомных электростанциях с реакторами типа ВВЭР» считается обеспеченной. Эффективность функционирования системы удаления водорода из защитной оболочки с помощью каталитической рекомбинации для рассматриваемой ЗПА принимается достаточной.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, атомная электростанция, защитная оболочка, тяжелая авария, водородная безопасность, горение, пассивный каталитический рекомбинатор водорода

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: *Третинников Денис Леонидович* – старший научный сотрудник Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси. E-mail: trdl@list.ru; *Дойникова Анастасия Вячеславовна** – научный сотрудник Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси. E-mail: sirius1991dav_asa@mail.ru; *Нагула Петр Константинович* – кандидат технических наук, заведующий лабораторией Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси. E-mail: nagulapk@mail.ru

Вклад авторов: *Третинников Денис Леонидович* – проведение вычислений, компьютерное моделирование, графическое представление результатов, интерпретация результатов расчетов, формулировка выводов, редактирование текста рукописи; *Дойникова Анастасия Вячеславовна* – сбор данных литературы, сбор и систематизация данных, создание расчетной модели, проведение вычислений, написание и оформление текста рукописи; *Нагула Петр Константинович* – постановка исследовательских целей и задач, планирование вычислений, обсуждение результатов и выводов, критический пересмотр текста рукописи.

Для цитирования: Третинников, Д. Л. Анализ водородной взрывобезопасности АЭС с реактором типа ВВЭР-1200/491 при протекании тяжелой запроектной аварии / Д. Л. Третинников, А. В. Дойникова, П. К. Нагула // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2024. – Т. 69, № 2. – С. 151–165. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-2-151-165>

Поступила в редакцию: 17.07.2023

Доработанный вариант: 03.06.2024

Утверждена к публикации: 06.06.2024

Подписана в печать: 12.06.2024.

Original article

Denis L. Tretinnikov, Anastasiya V. Doinikova*, Petr K. Nagula

*Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny
of the National Academy of Sciences of Belarus,
47/22, Lugovoslobodskaya village, 223063, District of the Prilesye village, Minsk District,
Minsk Region, Republic of Belarus*

ANALYSIS OF THE HYDROGEN SAFETY OF THE NPP WITH A VVER-1200/V-491 REACTOR IN A SEVERE BEYOND DESIGN BASIS ACCIDENT

Abstract. The results of a computational analysis of possible modes of combustion of a hydrogen-air mixture in containment during the evolution of a severe beyond design basis accident (BDBA) with the COCOSYS code are presented. The containment of the NPP with a VVER-1200/V-491 reactor was selected as the object of study. BDBA with loss of coolant occurs due to a break of the injection pipeline of the pressurizer system (LOCA DN179) and the simultaneous failure of all active channels of the emergency core cooling system (ECCS). The calculated parameters of the thermodynamic state (pressure and temperature) of the gas mixture are given, and the values of the concentration distribution of hydrogen inside the containment are presented. After calculating the hydrogen distribution and mixing in all compartments of the containment, an evaluation was made of the flammability of the mixture and the potential for self-ignition in the containment by using a three-component Shapiro-Moffette diagram. It was concluded that in BDBA (LOCA DN179 with failure of active ECCS) detonation of the hydrogen-containing mixture is excluded, and deflagration is possible only in the emergency compartment of steam generators with a pipeline break. Thus, the hydrogen risk mitigation has been achieved in accordance with the standards established by the Belarusian regulator, provided that the localization safety systems are operational in the event of hydrogen deflagration. And the efficiency of the hydrogen removal system from the containment using catalytic recombination is considered sufficient for the considered BDBA.

Keywords: computer simulation, nuclear power plant, containment, severe accident, hydrogen safety, combustion, passive autocatalytic hydrogen recombiner

Conflict of interest: the authors declare that there is no conflict of interest.

Information about the authors: *Denis L. Tretinnikov* – Senior Researcher at Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Science of Belarus. E-mail: trdl@list.ru; *Anastasiya V. Doinikova** – Researcher at Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Science of Belarus. E-mail: sirius-1991dav_asa@mail.ru; *Petr K. Nagula* – Cand. Sci. (Engineering), Head of the Laboratory at Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny. E-mail: nagulapk@mail.ru

Contribution of the authors: *Denis L. Tretinnikov* – performing calculations, computer modelling, graphical representation of the results, interpretation of calculation results, formulation of conclusions, editing the text of the manuscript; *Anastasiya V. Doinikova* – collection of literature data, collection and systematization of data, creation of a calculation model, performing calculations, writing and formatting the text of the manuscript; *Petr K. Nagula* – setting research goals and objectives, planning calculations, discussion of results and conclusions, critical revision the text of the manuscript.

For citation: Tretinnikov D. L., Doinikova A. V., Nagula P. K. Analysis of the hydrogen safety of the NPP with a VVER-1200/V-491 reactor in a severe beyond design based accident. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2024, vol. 69, no. 2, pp. 151–165 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-2-151-165>

Received: 17.07.2023

Modified: 03.06.2024

Approved for publication: 06.06.2024

Signed to the press: 12.06.2024.

Введение. В Японии в результате землетрясения 11 марта 2011 г. и вызванного им цунами произошло полное обесточивание АЭС «Фукусима-1», включая потерю работоспособности систем аварийного и резервного электроснабжения. Это привело к отказу систем аварийного охлаждения и расплавлению остановленных реакторов. В результате протекания пароциркониевой реакции и взаимодействия расплава корнума с бетоном в защитную оболочку было выброшено большое количество водорода. Именно произошедшие взрывы водорода на энергоблоках

в итоге определили разрушение последнего защитного барьера безопасности и значительные выбросы радиоактивных продуктов в окружающую среду [1].

Формально на японской атомной станции были предусмотрены системы для минимизации вероятности водородного взрыва. Однако функциональная устойчивость технических средств в условиях тяжелой запроектной аварии оказалась недостаточной для поддержания целостности герметичного ограждения.

Авария на АЭС «Фукусима-1» показала актуальность проблемы обеспечения водородной взрывобезопасности на энергоблоках АЭС для условий тяжелых аварий, а исключение водородного взрыва или смягчение его последствий является одной из приоритетных проблем безопасности АЭС.

Перечень наиболее актуальных научных и технологических проблем обеспечения водородной взрывобезопасности для АЭС с ВВЭР [2] включает задачи обеспечения безопасной работы рекомбинаторов водорода для условий тяжелых аварий, вопросы по достоверному моделированию стратифицированных течений водородсодержащих газовых смесей, проблему уточнения количественных критериев водородной взрывобезопасности. Недостатками применения рекомбинаторов водорода являются риск непреднамеренного воспламенения водородсодержащей смеси и невозможность целенаправленного управления процессом каталитического окисления [3–6]. Изучение теплоизоляционных элементов с каталитическим покрытием, обладающих свойством тепловой самозащитности, было заявлено в качестве задач в европейском проекте THINCAT [7].

Исследование проблемы достоверного моделирования распространения и горения водорода проводилось в таких международных проектах, как SARNET [8], REKO [9], THAI [10], MITHYGENE [11]. Применение компьютерных кодов к анализу водородной взрывобезопасности на АЭС представлено в документе «Status Report on Hydrogen Management and Related Computer Codes» [12].

В связи с вводом в эксплуатацию АЭС решение проблемы безопасности является актуальной задачей и в Беларуси. В настоящий момент специалистами научного учреждения «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» Национальной академии наук Беларуси ведутся работы по проведению детерминистического анализа безопасности АЭС с реакторами типа ВВЭР, включая обоснование водородной безопасности при тяжелых авариях.

Цель работы – используя программное средство COCOSYS, выполнить оценку возможности дефлаграции/детонации водородсодержащей смеси в атмосфере под защитной оболочкой АЭС с реактором типа ВВЭР-1200/В-491 при протекании тяжелой запроектной аварии.

Нормативные требования и критерии водородной взрывобезопасности для АЭС. Водородная взрывобезопасность на атомной станции согласно «Правилам обеспечения водородной взрывозащиты на атомной станции»¹ и аналогичному нормативному документу «Правила обеспечения водородной взрывозащиты на атомных электростанциях с реакторами типа ВВЭР»² считается обеспеченной, если:

- 1) при проектных авариях исключаются детонация и дефлаграция водородсодержащих смесей в помещениях, расположенных в объеме, ограниченном герметичным ограждением;
- 2) при запроектных авариях (ЗПА) детонация исключается, а дефлаграция допускается при условии, если локализирующие системы безопасности выполняют функции, определенные проектом атомной станции.

В «Правилах устройства и эксплуатации локализирующих систем безопасности атомных станций»³ содержится требование о том, что оборудование систем локализации не должно являться источником воспламенения взрывоопасных газов.

¹ Правила обеспечения водородной взрывозащиты на атомной станции (НП-040-02): утв. постановлением Госатомнадзора России от 31 дек. 2002 № 14. URL: https://docs.secnrs.ru/documents/nps/НП-040-02/НП-040-02_conv.pdf (дата обращения: 07.07.2023).

² Правила обеспечения водородной взрывозащиты на атомных электростанциях с реакторами типа ВВЭР: нормы и правила по обеспечению ядерной и радиационной безопасности: постановление М-ва по чрезвычайным ситуациям Респ. Беларусь, 11 мая 2010 г., № 19. URL: https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/upload/iblock/05e/postanovlenie_mchs_19.pdf (дата обращения: 07.07.2023).

³ Правила устройства и эксплуатации локализирующих систем безопасности атомных станций (НП-010-16): утв. приказом Федерал. службы по эколог., технол. и атом. надзору от 24 февраля 2016 г. № 70. URL: https://docs.secnrs.ru/documents/nps/НП-010-16/НП-010-16_conv.pdf (дата обращения: 07.07.2023).

Достаточными условиями дефлаграции и детонации водородсодержащих смесей является критическое сочетание концентраций горючего (водород), окислителя (кислород воздуха) и флегматизатора (водяной пар) при определенном термодинамическом состоянии газовой смеси (давлении и температуре).

При анализе взрывоопасности принято в качестве критерия возникновения условий дефлаграции и детонации использовать трехкомпонентную диаграмму Шапиро–Моффетти (рис. 1) [13], при этом состояние водородсодержащей паровоздушной смеси под защитной оболочке реактора определяется в виде точки текущего состояния в координатах «концентрация пара – концентрация воздуха – концентрация водорода» (с учетом влияния на воспламеняемость смеси горючего угарного газа и других газов).

Тогда критерием водородной взрывобезопасности является:

при проектной аварии – состояние атмосферы под защитной оболочкой, определенное вне области В (рис. 1, *a*) и на бесцветной области (рис. 1, *b*);

при ЗПА – состояние атмосферы под защитной оболочкой, определенное вне области А (рис. 1, *a*) и вне темно-оранжевой области (рис. 1, *b*).

Проектные пределы при проектной аварии устанавливаются следующими: предел составляет не более 2 об.% концентрации водорода в среднем по объему защитной оболочки, то есть 50 % от нижнего концентрационного предела распространения пламени.

В свою очередь, при запроектной аварии эти пределы определяются одним из трех требований:

- 1) не более 4 % объемной концентрации водорода в сухой атмосфере защитной оболочки;
- 2) более 8 % объемной концентрации водорода при концентрациях водяного пара более 60 об.% и воздуха менее 20 об.% (кислорода менее 5 об.%);
- 3) в интервале 4÷8 % объемной концентрации водорода при концентрациях водяного пара менее 60 об.% и воздуха более 20 об.% (кислорода более 5 об.%) должно быть показано отсутствие повреждений систем, важных для безопасности.

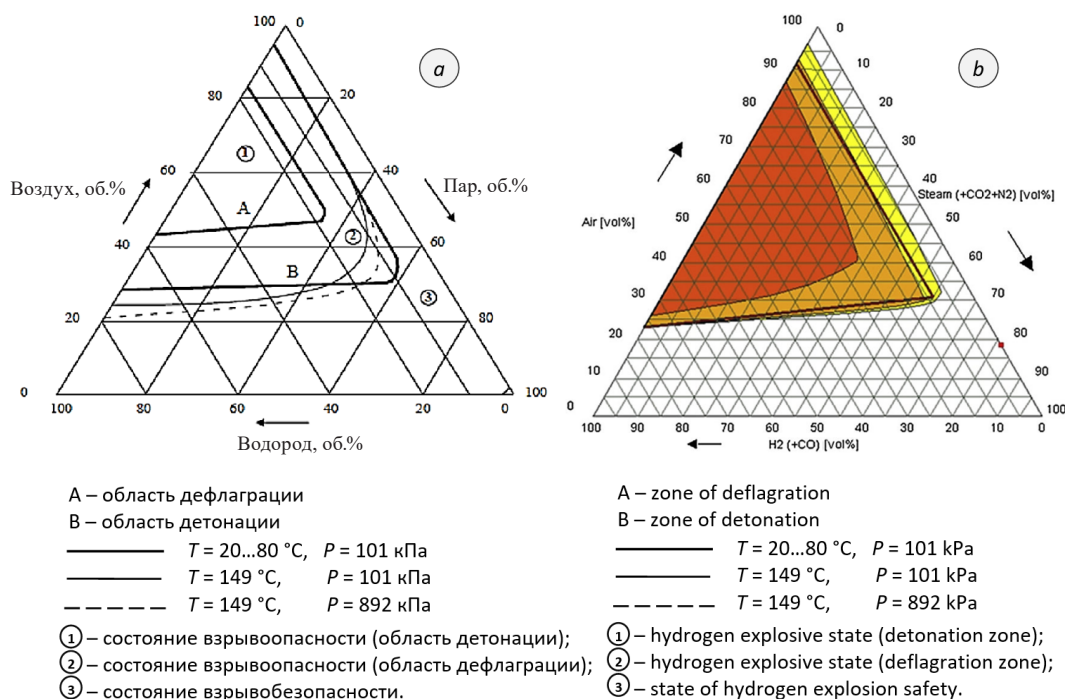


Рис. 1. Треугольная диаграмма Шапиро–Моффетти для смеси водород–пар–воздух (*a*) и для трехкомпонентной смеси с примесями азота и оксидов углерода (*b*); темно-оранжевая область – состояние детонации, светло-оранжевая область – состояние быстрой дефлаграции, желтая область – состояние медленной дефлаграции, бесцветная область – состояние взрывобезопасности

Fig. 1. Shapiro–Moffette ternary diagram for hydrogen-steam-air mixture (*a*) and for a three-component mixture in the presence of nitrogen and carbon oxides in the containment atmosphere (*b*); dark orange area – detonation, light orange area – fast deflagration, yellow area – slow deflagration; colorless area – state of hydrogen explosion safety

Система удаления водорода из защитной оболочки. В настоящий момент в большинстве стран, в том числе в Беларуси и России, обеспечение водородной взрывобезопасности реализуется оснащением АЭС системами удаления водорода при авариях. В составе такой системы, как правило, применяются пассивные каталитические рекомбинаторы водорода (ПКРВ), которые располагаются в местах возможного скопления водорода при авариях.

Принцип действия ПКРВ заключается в рекомбинации водорода с кислородом воздуха на катализаторе, при этом внешний источник энергии не используется. В случае попадания водорода на поверхность катализатора происходит экзотермическая химическая реакция соединения водорода и кислорода, сопровождающаяся выделением водяного пара и тепла.

Энергия, выделяющаяся в ходе реакции, расходуется на нагрев каталитической поверхности и смеси газов внутри бокса. Такой нагрев приводит к возникновению свободно конвективного течения, которое ускоряется в тяговом участке, расположенном над областью рекомбинации. В корпусе ПКРВ возникает устойчивый восходящий поток, обеспечивающий непрерывное поступление газовой смеси к катализатору и отвод образующегося водяного пара через перфорацию, выполненную в верхней части корпуса ПКРВ. Нагретая и обедненная водородом газовая смесь, выходящая из верхней части рекомбинатора, способна частично перемешивать газ внутри помещения, в котором установлены ПКРВ. Тем самым снижается риск локального воспламенения горючей смеси.

Пассивные каталитические рекомбинаторы водорода начинают самостоятельно функционировать при образовании в помещении повышенной концентрации водорода и продолжают работать, пока концентрация водорода не снизится до безопасного значения. В остальное время они находятся в режиме ожидания в состоянии готовности.

В большинстве существующих конструкций ПКРВ каталитические активные материалы (обычно платина или палладий) нанесены на несущие элементы – металлические пластины (Siemens/AREVA (Франция)) или пористые керамические элементы с развитой поверхностью контакта: шарики или цилиндры (NIS Ingenieurgesellschaft mbH (Германия); AECL/CNL (Канада); ЗАО ИНПК «РЭТ» (Россия)).

На Белорусской АЭС первоначально согласно разработанному проекту должны были использоваться 44 рекомбинатора фирмы AREVA двух типоразмеров: FR90/1-750T и FR90/1-1500¹, суммарной производительностью по водороду приблизительно 188 кг/ч при давлении 0,15 МПа и объемной концентрации водорода 4 об.%.

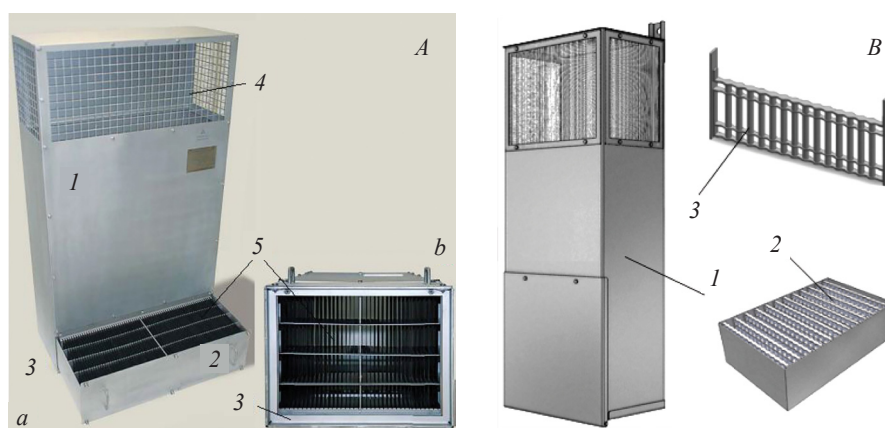


Рис. 2. А – Устройство пластинчатого пассивного каталитического рекомбинатора водорода (FR90/1-1500):

1 – корпус, 2 – кассета, 3 – входное отверстие, 4 – выходное отверстие, 5 – пластины; а – вид сбоку, кассета выдвинута для обслуживания пластин, б – вид снизу, кассета в рабочем положении;

В – устройство цилиндрического пассивного каталитического рекомбинатора водорода (РВК-500): 1 – корпус, 2 – каталитический блок с комплектом рамок, 3 – металлическая рамка с цилиндрическим катализатором

Fig. 2. А – Picture of plate passive autocatalytic hydrogen recombiner (FR90/1-1500): 1 – framework, 2 – catalyst unit (cassette), 3 – inlet, 4 – outlet, 5 – catalytic plates; а – side view, unit extended, б – bottom view; В – picture of cylindrical passive autocatalytic hydrogen recombiner (RVK-500): 1 – framework, 2 – catalyst unit consisting of a set of catalytic frames, 3 – catalyst rods combined in frames

¹ AREVA Passive Autocatalytic Recombiner: Brochure G-008-V3-13-ENGPB / AREVA GmbH, Germany. Erlangen, 2013. 4 p.

Позднее проектировщиком было принято решение использовать ПКРВ производства АО ИНПК «РЭТ» модели РВК-3 и РВК-4, применяемые на российских АЭС с реакторной установкой типа ВВЭР [14]. В нижней части (в зависимости от модели рекомбинатора возможно и в средней части) металлического корпуса установлен блок катализатора, который состоит из комплекта металлических рамок. Катализатор в рекомбинаторах производства этой фирмы представляет собой цилиндрический стержень из пористого оксида алюминия с нанесенным в поверхностные поры платиновым покрытием и устанавливается в металлические рамки. Суммарная производительность 16 рекомбинаторов РВК-3 и 28 РВК-4 при давлении 0,15 МПа и объемной концентрации водорода 4 об.% составляет приблизительно 193 кг/ч.

Технические характеристики рекомбинаторов представлены в табл. 1.

Таблица 1. Технические характеристики рекомбинаторов АЭС
Table 1. Technical characteristics of passive autocatalytic recombiners (PAR) of the NPP

Характеристики рекомбинаторов	AREVA		РЭТ	
	FR90/1-750T	FR90/1-1500	РВК-3	РВК-4
Количество рекомбинаторов, шт.	16	28	16	28
Размеры (длина, ширина, высота), мм	800×326×1400	1550×326×1400	850×530×1650	1720×530×1650
Масса, кг	75	125	175	350
Материал корпуса	Нержавеющая сталь			
Материал основы катализатора	Жаропрочная нержавеющая сталь		Оксид алюминия	
Каталитическое покрытие	Pt/Pd субстрат		Pt	
Количество каталитических пластин для AREVA (рамок каталитических для РЭТ), шт.	75	150	480	960
Размер каталитических пластин для AREVA (рамок каталитических для РЭТ), мм	140 × 290		198 × 13 × 80	
Производительность при давлении 0,15 МПа и концентрации водорода 4 об.%, кг/ч	2,4	5,36	2,68	5,36
Стартовая концентрация водорода, об.%	2,0		0,45	
Время выхода на номинальную производительность, с	Не более 100		Не более 180	

Анализ с использованием программного средства COCOSYS водородной безопасности АЭС при протекании тяжелой запроектной аварии. Начиная с 2021 г. специалистами Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны НАН Беларуси с помощью программного средства (ПС) COCOSYS выполняется расчетная оценка обоснования безопасности АЭС с реактором типа ВВЭР-1200/В-491 при тяжелых запроектных авариях. ПС COCOSYS представляет собой теплогидравлический реалистический код, предназначенный для расчета термодинамических параметров парогазовой среды в объеме под защитной оболочкой реактора при протекании аварийных процессов с учетом работы систем безопасности. Версия v2.4 ПС COCOSYS была официально передана белорусской стороне немецкими разработчиками GRS (Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit) в рамках международной программы BE/RA/07 «Развитие технического сотрудничества в области ядерной безопасности».

Для расчета параметров под защитной оболочкой с использованием ПС COCOSYS необходимо провести дискретизацию пространства, а именно разделить всю расчетную область на контрольные объемы (КО). На рис. 3, а показана разработанная авторами схема дискретизации пространства под защитной оболочкой для проведения анализа тяжелых ЗПА, состоящая из 120 контрольных объемов, 253 атмосферных и 133 дренажных соединений, 204 теплообменных структур. В модели учитываются работа системы пассивного отвода тепла от защитной оболочки (СПОТ 30); тепло- и массообмен в межоболочечном пространстве; функционирование системы удаления водорода из защитной оболочки. Место течи моделируется в парогенераторном боксе (который разбивается на четыре контрольных объема (8-1, 8-2, 8-3, 8-4) и приямок КО 25. Этот бокс имеет связь с отсеком компенсатора давления, который задается контрольными объемами 7-1 и 7-2. Зоной выброса через разрыв трубопровода принимается КО 8-2 (см. рис. 3, а).

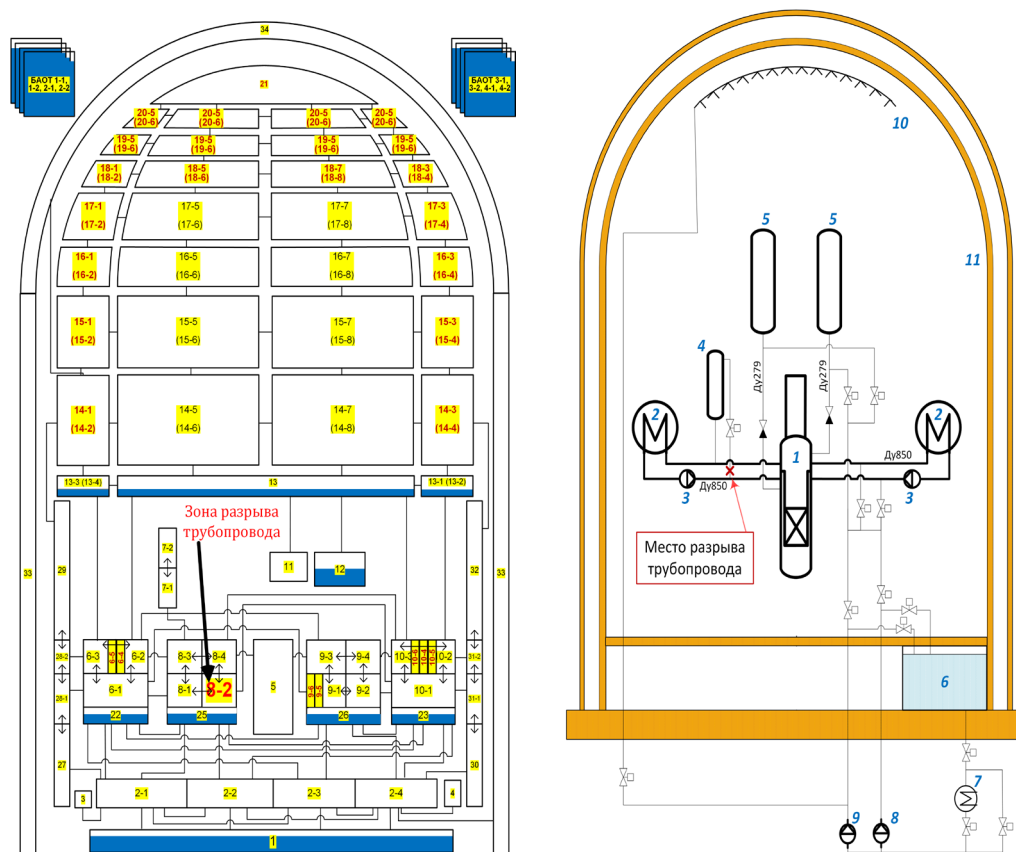


Рис. 3. Схема дискретизации расчетной области защитной оболочки для анализа тяжелых аварий (а) и упрощенная схема реакторной установки АЭС с реактором типа ВВЭР-1200/В-491 (b): 1 – реактор; 2 – парогенератор; 3 – главный циркуляционный насос; 4 – компенсатор давления; 5 – гидроемкость системы аварийного охлаждения активной зоны реактора; 6 – бак-приямok борированной воды; 7 – теплообменник системы аварийного охлаждения активной зоны реактора; 8 – насос системы аварийного впрыска высокого давления; 9 – насос системы аварийного впрыска низкого давления; 10 – спринклерный коллектор с соплами; 11 – защитная оболочка

Fig. 3. Discretization scheme of the estimated containment volume for severe accident analysis (a), and simplified scheme of the reactor system of the NPP with a VVER-1200/V-491 reactor (b): 1 – reactor; 2 – steam generator; 3 – main circulation pump; 4 – pressurizer; 5 – hydraulic vessel of emergency core cooling system; 6 – borated water sump tank; 7 – emergency cooling heat exchanger; 8 – high-pressure safety injection pump; 9 – low-pressure coolant injection pump; 10 – spray header with nozzles; 11 – containment

В качестве исходного события принимается разрыв трубопровода впрыска Ду179 (219 × 20 мм), осуществляющего связь компенсатора давления с напорным участком «холодной» нитки 3-й петли (место разрыва см. рис. 3, b). Место течи находится на расстоянии ~ 12 м от входного патрубка (1,5 м от насоса на горизонтальном участке) «холодной» нитки 3-й петли.

На исходное событие по принятым условиям протекания запроектной аварии накладывается отказ всех каналов активной части системы аварийного охлаждения активной зоны – наносы систем аварийного впрыска высокого и низкого давления (CAOЗ НД и CAOЗ ВД) на рециркуляцию не запускаются.

Тяжелая запроектная авария развивается, когда при проектной аварии из-за дополнительных отказов систем безопасности и/или ошибок операторов нарушается функция отвода тепла от активной зоны реактора, что приводит к разогреву и повреждению элементов активной зоны и внутрикорпусных устройств.

В принятом сценарии протекания аварии полагалось, что на момент наступления исходного события реакторная установка работает на мощности 100 %. Исходное событие происходит в конце кампании 6-й топливной загрузки, при этом конец стационарной кампании соответствует максимальному выгоранию ТВЭЛов в активной зоне и выбран консервативно с точки зрения выхода продуктов деления и аэрозолей в атмосферу.

При расчетах принималось, что стартовая пороговая концентрация водорода для рекомбинаторов системы удаления водорода принималась равной 2 об.%. Для всех рекомбинаторов задавалось снижение производительности на 10 % вследствие возможного отравления каталитических пластин.

В результате выброса теплоносителя в течь происходит уменьшение массы теплоносителя в реакторе и, как следствие, опорожнение компенсатора давления, снижение давления в 1-м контуре и вскипание теплоносителя. Ввиду образования течи из 1-го контура происходит срабатывание аварийной защиты, после чего мощность реактора падает до уровня остаточных энерговыделений.

После остановки турбины отвод тепла осуществляется через 2-й контур системами, сбрасывающими пар в атмосферу: быстродействующей редуцирующей установкой сброса пара в атмосферу (БРУ-А), системой пассивного отвода тепла через парогенераторы (СПОТ ПГ). Предполагается, что работают три канала СПОТ ПГ, подключенные к парогенераторам № 1, 2, 4, при этом канал системы № 3 не работает.

Временное улучшение условий охлаждения активной зоны и рост уровня теплоносителя в реакторе происходит за счет начала подачи относительно холодной борированной воды из гидроемкостей системы аварийного охлаждения активной зоны реактора (САОЗ) в 1-й контур. В расчетах моделируется работа всех четырех гидроемкостей системы. После прекращения подачи воды из гидроемкостей происходит снижение уровня теплоносителя в активной зоне, и по мере выпаривания воды и осушения активной зоны начинается постепенный рост температур оболочек твэлов.

После достижения температуры 650 °С над активной зоной температура оболочек твэлов достигает значения 1200 °С и начинается пароциркониевая реакция с генерацией водорода. Происходит нарушение герметичности циркониевых оболочек и выход летучих продуктов деления в 1-й контур. Далее начинается нагрев и происходит расплавление направляющих каналов и поглощающих стержней. Расплав (сталь, карбид бора, циркониевые оболочки твэлов) стекает в нижнюю часть активной зоны. После этого расплав взаимодействует с остатками воды в нижней части корпуса реактора, происходит диспергирование расплава (на металлический и оксидный слой), его доокисление и дополнительный выход пара и водорода через разрыв в паровоздушную среду под защитной оболочкой.

На рассматриваемом типе АЭС реализована концепция удержания расплава в ловушке тигельного типа, которая размещается под днищем корпуса реактора. Устройство локализации расплава состоит из охлаждаемого водой стального корпуса, внутренний объем которого частично заполнен оксидным и металлическим жертвенным материалом.

После разрушения корпуса реактора расплав порционно поступает в ловушку. Первая порция состоит преимущественно из стальных конструкций активной зоны и внутрикорпусных устройств с примесью циркония и урана. С некоторой задержкой после выхода первых металлических порций начинают поступать порции расплава, содержащие оксиды и корпусную сталь. При этом в устройстве локализации расплава формируется двуслойная ванна расплава. После ряда химических реакций происходит инверсия расплавов, в результате которой слой стали перемещается в донную часть ванны, а расплав тяжелых оксидов, смешавшись со слоем образовавшихся шлаков, образует верхний слой расплава.

Прогнозируется выход практически всего кориума в устройство локализации расплава. Охлаждение кориума обеспечивается теплоотводом от корпуса ловушки к воде, заливаемой в бетонную шахту. После завершения перемещения основной массы кориума из корпуса реактора в устройство локализации вода подается также непосредственно на поверхность расплава.

Использование ловушки расплава исключает взаимодействие кориума с конструкционным бетоном шахты реактора и, следовательно, приводит к уменьшению выбросов водорода под защитную оболочку.

Хронологическая последовательность событий при протекании аварии с течью при отрыве трубопровода впрыска компенсатора давления (Ду179) с отказом активной части САОЗ представлена в табл. 2.

Таблица 2. Хронология протекания рассматриваемой тяжелой запроектной аварии
 Table 2. Chronology of severe beyond design basis accident

Время, с	Событие	Условия запуска, условия блокировки или инициирующее воздействие
–	Конец кампании 6-й топливной загрузки. Реакторная установка работает на номинальной мощности $N_{НОМ}$	Исходное состояние
0,0	Течь Ду179 из холодной нитки 3-й петли	Исходное событие
0,9	Формирование сигнала аварийной защиты	По факту снижения давления на выходе из реактора менее 15,20 МПа и мощности реактора более 75 % от номинальной $N_{НОМ}$
2,9	Переход мощности активной зоны на уровень остаточных энерговыделений	Падение в активную зону всех поглощающих нейтроны стержней, изменение плотности теплоносителя в активной зоне за счет вскипания
5,9	Закрытие стопорных клапанов турбины	Наличие сигнала аварийной защиты
0,9	Отключение всех главных циркуляционных насосов, начало их выбега. Формирование сигнал на: запуск насосов САОЗ ВД и НД (отказ всех насосов по условиям сценария); срабатывание БРУ-А всех парогенераторов в режиме поддержания скорости расхолаживания 30 °С/ч	По факту прохождения сигнала «Уменьшение запаса до кипения в любой из горячих ниток петель ниже 8 °С»
26,0	Опорожнение компенсатора давления	Течь первого контура
38,1	Формирование сигнала на открытие «больших» клапанов СПОТ ПГ	По факту совпадения сигналов: уменьшение запаса до кипения в любой из горячих ниток петель ниже 8 °С; температура теплоносителя в горячих нитках петель более 150 °С; отсутствие расхода в напорных линиях и линиях рециркуляции трех из четырех насосов САОЗ ВД
123,1	Выход СПОТ ПГ на полную мощность	Через 85 с после прохождения сигнала
174,4	Срабатывание клапанов гидроемкостей САОЗ, начало подачи в верхнюю и нижнюю камеры реактора	Сигнал «Давление в реакторе менее 5,9 МПа»
420,3	Отключение гидроемкостей САОЗ	Уменьшение уровня в гидроемкостях менее 1,25 м
457,7	Осушение верхней части реактора – снижение уровня в реакторе ниже уровня входных патрубков	Диагностируется по показаниям датчиков на уровне входных патрубков
1282	Превышение температуры над активной зоной 400 °С	Отсутствие подпитки 1-го контура
1472	Превышение температуры над активной зоной 650 °С	Отсутствие подпитки 1-го контура
1635	Начало генерации водорода	Разогрев активной зоны
1724	Интенсификация парциркулониевой реакции и превышение температуры оболочек твэлов проектного предела	Превышение температуры оболочек твэлов 1200 °С
1912	Открытие оператором всех клапанов импульсно-предохранительных устройств компенсатора давления	Превышение температуры над активной зоной 400 °С
2015	Разрушение пленки ZrO_2 оболочек твэлов	Превышение температуры оболочек 2250 °С
2400	Действия оператора по управлению: закрытие клапанов БРУ-А; отключение работающих СПОТ ПГ	По факту прохождения сигнала «угроза тяжелой аварии» с учетом невмешательства оператора в течение 1800 с и задержкой на действия оператора 600 с
3044	Полное осушение активной зоны	Отсутствие подпитки 1-го контура
3004	Образование в активной зоне локальных ванн расплава. Превышение температуры плавления топлива в разрушенной области активной зоны	Превышение температуры топлива 2840 °С
4266	Поступление материалов разрушенной части активной зоны и элементов внутрикорпусных устройств	Разогрев активной зоны
4495	Обрушение нижней опорной плиты	Плавление и обрушение активной зоны
5695	Выход расплава на корпус реактора	Плавление и обрушение активной зоны
6648	Разрушение корпуса реактора, выход первой порции расплава в устройство локализации расплава	Разрушение корпуса реактора
13 634	Выход более 90 % массы диоксида урана в устройство локализации расплава	Разрушение корпуса реактора

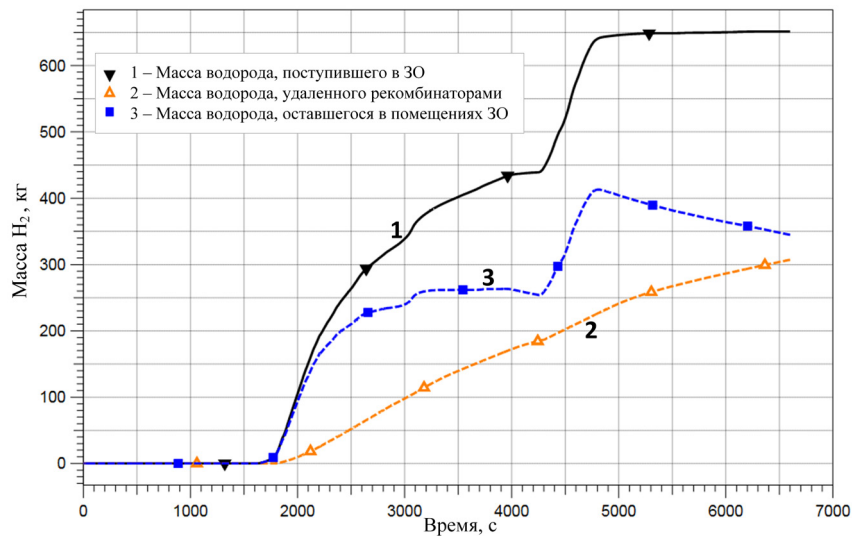


Рис. 4. Масса поступившего (кривая 1), рекомбинированного (кривая 2) и накопленного (кривая 3) водорода в помещениях защитной оболочки

Fig. 4. Mass of released (curve 1), recombined (curve 2) and accumulated (curve 3) hydrogen in the containment compartments

Расчетная эффективность системы удаления водорода из защитной оболочки представлена на рис. 4. На графике показаны интегральные выходы водорода в помещения здания реактора, масса рекомбинированного водорода и масса водорода, оставшегося в помещениях. Видно, что за расчетное время протекания аварии (6 600 с, или 1 ч 50 мин) система рекомбинирует приблизительно около 45 % массы водорода, поступившего под защитную оболочку через разрыв.

Максимальные объемные концентрации водорода (до 17 об.%, см. рис. 5, *a*) достигаются в расчетных объемах аварийного бокса парогенераторов (КО 8-1, 8-2, 8-3 и 8-4) в моменты пиковых выбросов водорода через разрыв, которые соответствуют периодам интенсивного поступления паро-водородной газовой смеси из реакторной установки: временные промежутки, когда в результате протекания парациркониевой реакции происходит разрушение оболочек твэлов (2 000 с, или 33 мин), а также плавление и обрушение активной зоны, выход расплава на корпус реактора (4 500 с, или 1 ч 15 мин). Расчеты показывают, что в другом неаварийном боксе парогенераторов (расположение КО 9-3 см. на рис. 3, *a*) максимальная концентрация водорода составляет 8,8 об.% (рис. 5, *b*). В остальных отсеках защитной оболочки эта величина не превышает 5 об.% за весь расчетный период.

В качестве примера покажем концентрационное распределение водорода в отсеках над баками-прямыми (рис. 5, *c*) и на участке главных циркуляционных насосов (рис. 5, *d*). Видно, что после 5 000 с (1 ч 23 мин) с момента начала аварии в помещениях наблюдается снижение и выравнивание концентраций водорода по всему воздушному объему под защитной оболочкой, происходящее за счет активного перемешивания среды и работы каталитических рекомбинаторов водорода.

Для анализа возможных режимов горения (дефлаграции/детонации) водородсодержащей смеси в атмосфере под защитной оболочкой АЭС с реактором типа ВВЭР-1200/В-491 при протекании рассматриваемой ЗПА нами использовалась программа СОСPLOT (графическая утилита ПС СОСОSYS). На трехкомпонентной диаграмме Шапиро–Моффетти были построены характерные точки объемных концентраций газов в различных отсеках защитной оболочки за все расчетное время. Данные точки показывают объемную долю каждого компонента газовой смеси в конкретном контрольном объеме в фиксированный момент времени.

На рис. 6 приведены полученные в результате анализа характерные точки для различных отсеков: над баками-прямыми (рис. 6, *a*), на участке главных циркуляционных насосов (рис. 6, *b*), в подкупольном пространстве (рис. 6, *c*), в неаварийном (рис. 6, *d*) и в аварийном боксах парогенераторов (рис. 6, *e, f*).

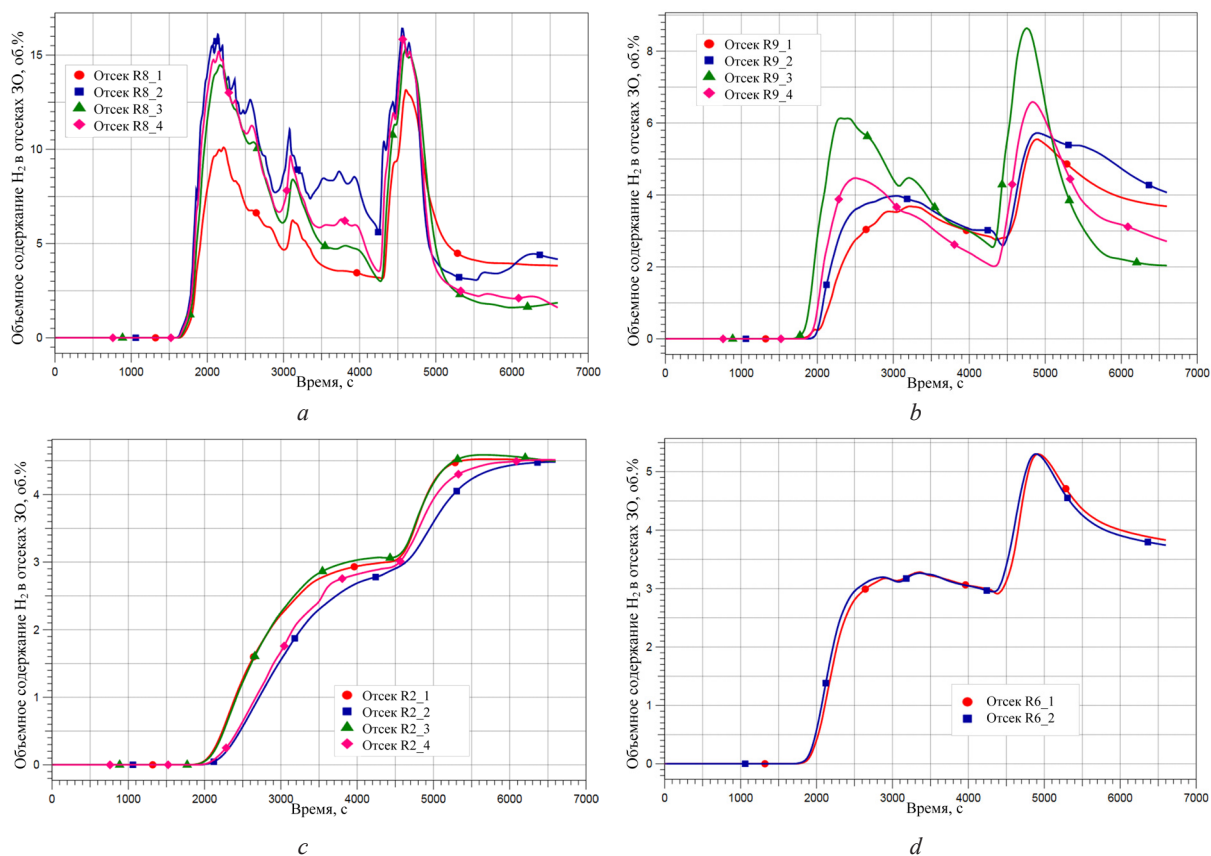


Рис. 5. Объемные концентрации водорода в различных помещениях защитной оболочки:
 а – в аварийном боксе парогенераторов; б – во втором неаварийном боксе парогенераторов;
 с – над баками-приямками; д – на участке главных циркуляционных насосов
 Fig. 5. Volume concentrations of hydrogen mixture in various compartments of the containment:
 а – in the emergency box of steam generators; б – in the second non-emergency box of steam generators;
 с – above sump tanks; д – at the section of the main circulation pumps

На представленных трехкомпонентных графиках видно, что точки, характеризующие состояние атмосферы, для всех рассчитанных контрольных объемов лежат вне области А (см. рис. 1, а), то есть возможность детонации водородсодержащей смеси на протяжении всего расчетного периода исключена. Результаты расчетов показывают, что в область дефлаграции (зона В на рис. 1, а) попадает только КО 8-2 (рис. 6, е), относящийся к аварийному боксу парогенераторов, где происходит разрыв трубопровода и выделяется основная масса пара и водорода. На рис. 6, ф диаграмма Шапиро–Моффетти для указанного контрольного объема увеличена в масштабе и на ней отмечены соответствующие временные точки.

На рис. 7 показаны временные зависимости объемной концентрации пара и водорода в аварийном боксе парогенераторов – в КО 8-2, на рис. 8 – изменение давления и температуры парогазовой среды в данном контрольном объеме.

На начальном этапе развития аварии в КО 8-2 наблюдается резкий рост объемной концентрации пара, давления и температуры, связанный с выбросом через разрыв трубопровода большого количества теплоносителя 1-го контура, который мгновенно вскипает в атмосфере под защитной оболочкой.

Далее количество пара снижается до момента времени $T_8 \sim 4\,250$ с (1 ч 11 мин) за счет конденсации на поверхностях «холодных» строительных конструкций и оборудования, а также вследствие эффективной работы СПОТ ЗО. С учетом того, что спринклерная система имеет общие обеспечивающие системы с активной частью САОЗ, то вероятность того, что спринклерная система сохранит работоспособность при отказе всех четырех каналов САОЗ, крайне мала, поэтому принят отказ на включение спринклерной системы, и конденсации пара на распырскиваемых каплях воды не происходит.

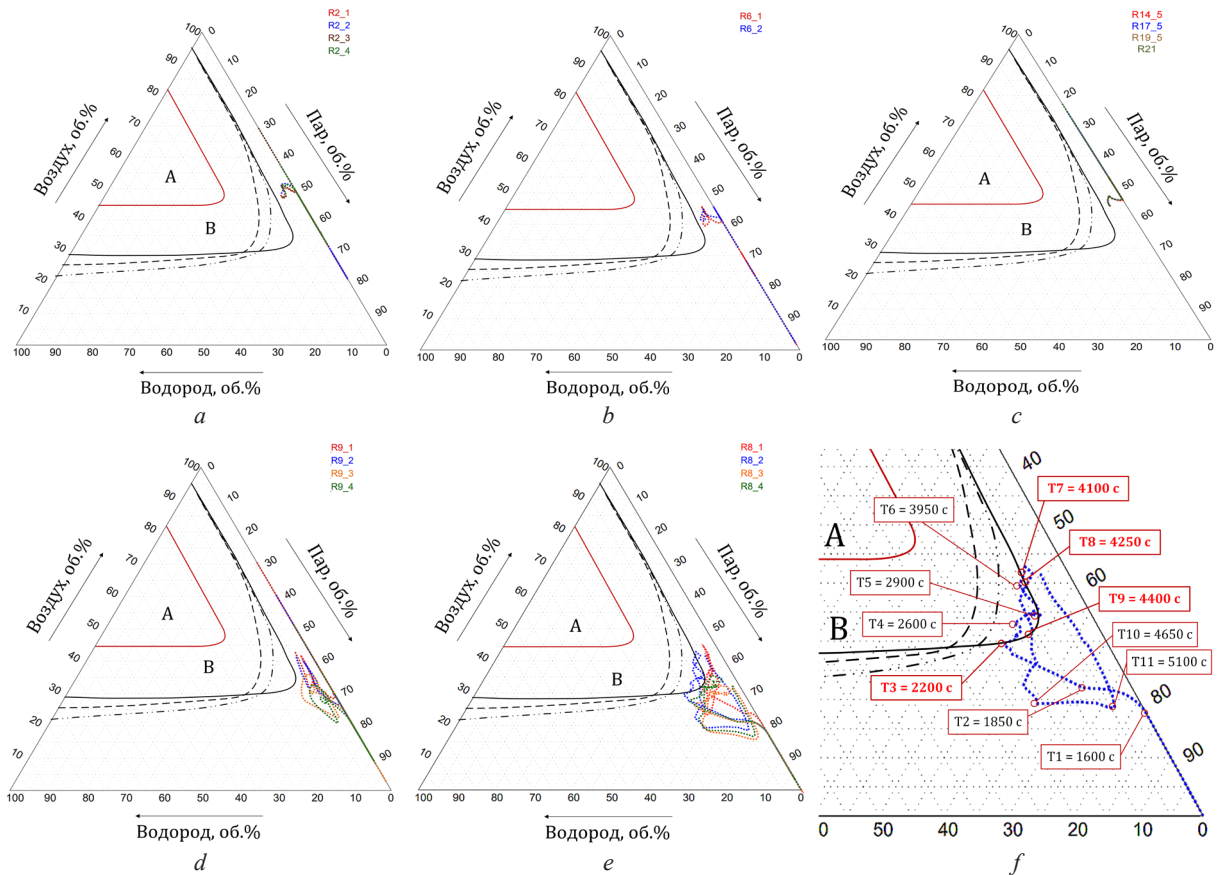


Рис. 6. Изменение во времени на диаграмме горения Шапиро–Мoffette положения точки параметров водородсодержащей смеси в различных помещениях защитной оболочки: *a* – над баками-приямками; *b* – на участке главных циркуляционных насосов; *c* – в подкупольном пространстве; *d* – во втором неаварийном боксе парогенераторов; *e* – во всех контрольных объемах аварийного бокса парогенераторов; *f* – в контрольном объеме аварийного бокса парогенераторов, в котором моделируется выход пара и водорода (КО 8-2)

Fig. 6. Change in time on the Shapiro–Moffette combustion diagram of the points of parameters of hydrogen-containing mixture in various compartments of the containment: *a* – over sump tanks; *b* – at the section of the main circulation pumps; *c* – in dome compartment; *d* – in the non-emergency box of steam generators; *e* – in all control volumes of the emergency box of steam generators; *f* – in the control volume (8-2) of the emergency box of steam generators, in which the release of steam and hydrogen is simulated

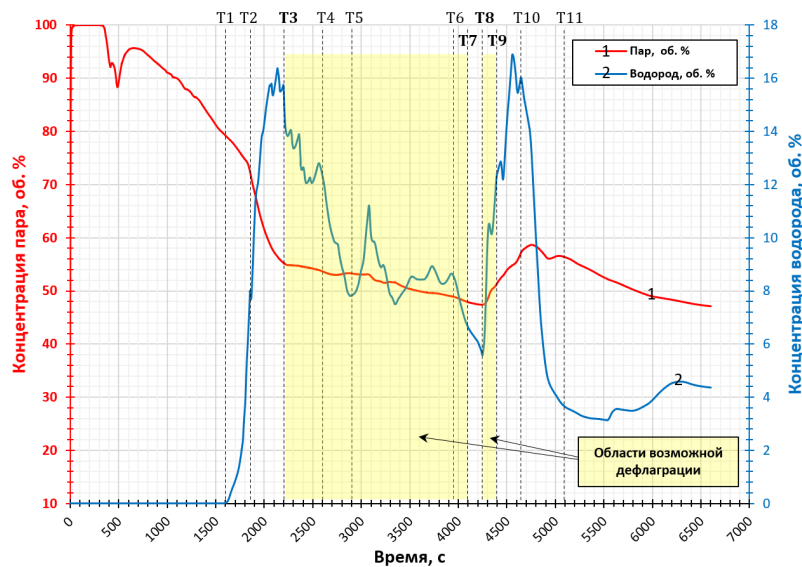


Рис. 7. Концентрации пара (кривая 1) и водорода (кривая 2) в аварийном боксе парогенераторов (контрольный объем 8-2)
 Fig. 7. Steam (curve 1) and hydrogen (curve 2) concentrations in the emergency box of steam generators (control volume 8-2)

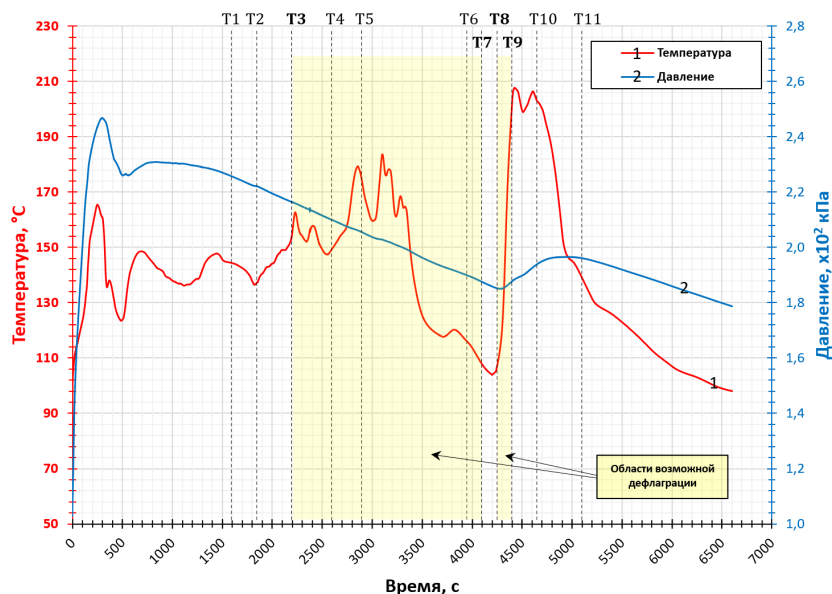


Рис. 8. Температура (кривая 1) и давление (кривая 2) парогазовой среды в аварийном боксе парогенераторов (контрольный объем 8-2)

Fig. 8. Atmosphere temperature (curve 1) and pressure (curve 2) in the emergency box of steam generators (control volume 8-2)

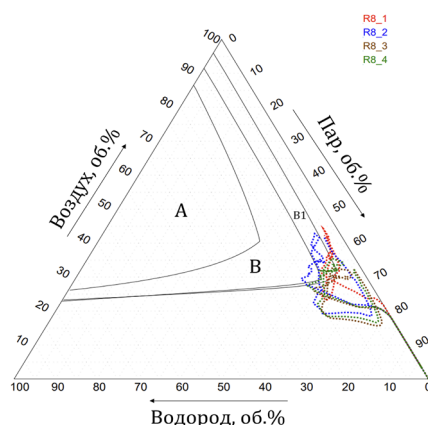


Рис. 9. Изменение во времени положения точки параметров водородсодержащей смеси в аварийном боксе парогенераторов на диаграмме горения Шапиро–Моффетти, используемой в программном средстве COCOSYS

Fig. 9. Change in time of the point of parameters of the hydrogen-containing mixture in the emergency box of steam generators on the Shapiro–Moffette combustion diagram used in the COCOSYS code

В момент времени $T_1 \sim 1\,500$ с (25 мин) начинается интенсивная пароциркониевая реакция, объемная концентрация водорода в КО 8-2 быстро возрастает почти до 17 об.%, однако ввиду большого количества пара (инертизация атмосферы паром) даже при пиковой концентрации водорода дефлаграция исключена.

Область возможной дефлаграции водородсодержащей смеси начинается с момента $T_3 \sim 2\,200$ с (37 мин), так как количество пара становится ниже 55 об.% с концентрацией водорода выше 14 об.%

Первая область возможной дефлаграции заканчивается в точке $T_7 \sim 4\,100$ с (1 ч 8 мин), когда количество водорода за счет активного перемешивания водородсодержащей среды и работы рекомбинаторов водорода опускается ниже 7 об.% с относительно высоким содержанием пара ~ 48 об.%

Вторая область возможной дефлаграции с момента $T_8 \sim 4\,250$ с (1 ч 11 мин) образуется вследствие того, что расплав, образовавшийся в реакторе, стекает в нижнюю часть актив-

ной зоны и взаимодействует с остатками воды в нижней части корпуса реактора, что приводит к повторному быстрому росту количества водорода в КО 8-2. Однако во временной точке T9 ~ 4 400 с (1 ч 13 мин) вторая область заканчивается, так как указанный процесс сопровождается также выделением пара, что снижает возможность попадания в область В диаграммы Шапиро–Моффетти даже в момент пиковой концентрации водорода. После точки T10 ~ 4 650 с (1 ч 18 мин) начинается медленное снижение концентрации пара с существенно более быстрым уменьшением количества водорода, тем самым дальнейшая возможность дефлаграции водородсодержащей смеси в паровоздушной среде аварийного отсека исключается.

Необходимо отметить, что в качестве критериев водородной безопасности и возможных режимов горения смеси в ПС COCOSYS по умолчанию вместо классической диаграммы Шапиро–Моффетти (см. рис. 1, а) [13] используется трехкомпонентная (см. рис. 1, б) [15]. При сравнении данных диаграмм видно, что используемая в ПС COCOSYS диаграмма имеет более консервативную зону детонации, а также в ней присутствует дополнительная зона медленной дефлаграции (желтая зона, см. рис. 1, б).

Если на диаграмме Шапиро–Моффетти, используемой в ПС COCOSYS, построить характерные точки водородсодержащей смеси для аварийного бокса парогенераторов (рис. 9), то в зону быстрой дефлаграции В попадает только КО 8-2 (в котором задается выход водорода и пара через разрыв), все остальные контрольные объемы, моделирующие аварийный бокс парогенераторов, попадают в зону медленной дефлаграции В1. А возможность детонации смеси и при использовании для анализа взрывобезопасности диаграммы горения, применяемой по умолчанию в ПС COCOSYS, отсутствует.

Заключение. С использованием программного средства COCOSYS проведена расчетная оценка водородной безопасности АЭС с реактором типа ВВЭР-1200/В-491 при протекании тяжелой запроектной аварии с течью Ду179 с наложением отказа активной части системы аварийного охлаждения активной зоны реактора.

Результаты расчетов показали, при заданных условиях детонация водородсодержащих смесей под защитной оболочкой исключается, дефлаграция возможна только в боксе парогенераторов, в котором происходит разрыв трубопровода.

Таким образом, эффективность функционирования системы удаления водорода из защитной оболочки в рекомбинаторах с помощью каталитической рекомбинации принимается достаточной. Водородная взрывобезопасность на атомной станции согласно «Правилам обеспечения водородной взрывозащиты на атомных электростанциях с реакторами типа ВВЭР» считается обеспеченной.

Список использованных источников

1. Анализ причин и последствий аварии на АЭС Fukushima как фактор предотвращения тяжелых аварий в корпусных реакторах / В. И. Скалозубов [и др.]; под ред. В. И. Скалозубова. – Чернобыль: Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2012. – 280 с.
2. Обеспечение водородной безопасности на атомных электростанциях с водоохлаждаемыми реакторными установками. Современное состояние проблемы / И. А. Кириллов [и др.] // Ядерная и радиационная безопасность. – 2017. – № 2 (84). – 26–37.
3. Meynet, N. Numerical study of hydrogen ignition by passive autocatalytic recombiners / N. Meynet, A. Bentaib // Nucl. Technol. – 2012. – Vol. 178, № 1. – P. 17–28. <https://doi.org/10.13182/NT12-A13544>
4. Experimental study of effect of ambient flow condition on the performance of as passive autocatalytic recombiner / Z. Liang [et al.] // Nucl. Eng. Design. – 2016. – Vol. 301. – P. 49–58. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2016.03.005>
5. A large-scale study on the effect of ambient conditions on hydrogen recombiner-induced ignition / L. Gardner [et al.] // Int. J. Hydrog. Energy. – 2021. – Vol. 46, iss. 23. – P. 12594–12604. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.06.132>
6. Bentaib, A. Overview on hydrogen risk research and development activities: methodology and open issues / A. Bentaib, N. Meynet, A. Bleyer // Nucl. Eng. Technol. – 2015. – Vol. 47, iss. 1. – P. 25–32. <https://doi.org/10.1016/j.net.2014.12.001>
7. Hydrogen removal from LWR containments by catalytic-coated thermal insulation elements (THINCAT) / K. Fischer [et al.] // Nucl. Eng. Design. – 2003. – Vol. 221, iss. 1–3. – P. 137–149. [https://doi.org/10.1016/S0029-5493\(02\)00348-5](https://doi.org/10.1016/S0029-5493(02)00348-5)
8. Sprays in Containment: Final Results of the SARNET Spray Benchmark / J. Malet [et al.] // Nucl. Eng. Design. – 2011. – Vol. 241, iss. 6. – P. 2162–2171. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2011.03.016>
9. Investigation of PAR Behavior in the REKO-4 Test Facility / B. Simon [et al.] // 20th Int. Conf. on Nuclear Engineering and the ASME Conference. – 2012. – Vol. 2. – P. 345–350. <https://doi.org/10.1115/ICONE20-POWER2012-54234>

10. THAI test facility for experimental research on hydrogen and fission product behavior in light water reactor containments / S. Gupta [et al.] // *Nucl. Eng. Design*. – 2015. – Vol. 294. – P. 183–201. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2015.09.013>
11. Project MITHYGENE [Electronic resource] // IRSN. – Mode of access: <https://www.irsn.fr/recherche/projet-mithygene>. – Date of access: 03.06.2024.
12. Status report on hydrogen management and related computer codes / NEA, OECD Publishing. – Paris, 2015. – 211 p.
13. Shapiro, Z. M. Hydrogen flammability data and application to PWR loss-of-coolant accident: Report WAPD-SC-545 [Electronic resource] / Z. M. Shapiro, T. R. Moffette. – Pittsburgh: Westinghouse Electric Corp., 1957. – Mode of access: https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc1024816/m2/1/high_res_d/4327402.pdf. – Date of access: 07.07.2023.
14. Анализ и устранение замечаний Ростехнадзора к пассивным каталитическим рекомбинаторам водорода для энергоблоков ВВЭР / А.В. Михальчук [и др.] // Краткие результаты научно-технической деятельности ВНИИАЭС за 2016 год: сб. работ / АО «ВНИИАЭС»; редкол.: Л. М. Воронин (гл. ред.) [и др.]. – М.: ВНИИАЭС, 2017. – С. 17–26.
15. Kumar, R. K. Flammability limits of hydrogen-oxygen-diluent mixtures / R. K. Kumar // *J. Fire Sci.* – 1985. – Vol. 3, iss. 4. – P. 245–262. <https://doi.org/10.1177/073490418500300402>

References

1. Skalozubov V. I., Kljuchnikov A. A., Vashhenko V. N., Jarovoj S. S. *Analysis of the Causes and Consequences of the Accident at the Fukushima NPP as a Factor in the Prevention of Severe Accidents in Pressurized Reactors*. Chernobyl, Institute of NPP Safety Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2012. 280 p. (in Russian).
2. Kirillov I. A., Kharitonova N. L., Sharafutdinov R. B., Khrennikov N. N. Hydrogen safety for nuclear power plants with light water reactor units. Current state of the problem. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' = Nuclear and Radiation Safety*, 2017, no. 2, pp. 26–37 (in Russian).
3. Meynet N., Bentaib A. Numerical study of hydrogen ignition by passive autocatalytic recombiners. *Nuclear Technology*, 2012, vol. 178, no. 1, pp. 17–28. <https://doi.org/10.13182/NT12-A13544>
4. Liang Z., Gardner L., Clouthier T., Thomas B. Experimental study of effect of ambient flow condition on the performance of as passive autocatalytic recombiner. *Nuclear Engineering and Design*, 2016, vol. 301, pp. 49–58. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2016.03.005>
5. Gardner L., Liang Z., Clouthier T., MacCoy R. A large-scale study on the effect of ambient conditions on hydrogen recombiner-induced ignition. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021. vol. 46, iss. 23, pp. 12594–12604. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.06.132>
6. Bentaib A., Meynet N., Bleyer A. Overview on hydrogen risk research and development activities: methodology and open issues. *Nuclear Engineering and Technology*, 2015, vol. 47, iss. 1, pp. 25–32. <https://doi.org/10.1016/j.net.2014.12.001>
7. Fischer K., Broeckerhoff P., Ahlers G., Gustavsson V., Herranz L., Polo J., Dominguez T., Royl P. Hydrogen removal from LWR containments by catalytic-coated thermal insulation elements (THINCAT). *Nuclear Engineering and Design*, 2003, vol. 221, iss. 1–3, pp. 137–149. [https://doi.org/10.1016/S0029-5493\(02\)00348-5](https://doi.org/10.1016/S0029-5493(02)00348-5)
8. Malet J., Blumenfeld L., Arndt S., Babic M., Bentaib A., Dabbene F., Kostka P. [et al.]. Sprays in Containment: Final Results of the SARNET Spray Benchmark. *Nuclear Engineering and Design*, 2011, vol. 241, iss. 6, pp. 2162–2171. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2011.03.016>
9. Simon B., Reinecke E. A., Klauck M., Heidelberg D., Allelein H. J. Investigation of PAR Behavior in the REKO-4 Test Facility. *20th International Conference on Nuclear Engineering and the ASME Conference*, 2012, vol. 2, pp. 345–350. <https://doi.org/10.1115/ICONE20-POWER2012-54234>
10. Gupta S., Schmidt E., Laufenberg B. von, Freitag M., Poss G., Funke F., Weber G. THAI test facility for experimental research on hydrogen and fission product behavior in light water reactor containments. *Nuclear Engineering and Design*, 2015, vol. 294, pp. 183–201. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2015.09.013>
11. Project MITHYGENE. IRSN. Available at: <https://www.irsn.fr/recherche/projet-mithygene> (accessed 3 June 2024) (in French).
12. NEA. *Status report on hydrogen management and related computer codes*. Paris, OECD Publishing, 2015. 211 p.
13. Shapiro Z. M., Moffette T. R. *Hydrogen flammability data and application to PWR loss-of-coolant accident: Report WAPD-SC-545*. Pittsburgh, Westinghouse Electric Corp., 1957. Available at: https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc1024816/m2/1/high_res_d/4327402.pdf (accessed 7 July 2023).
14. Mihal'chuk A. V., Solov'jov S. L., Solov'ev B. S., Stepanov V. S., Fedorchenko S. V., Sedov M. K. Analysis and elimination of remarks of Rostekhnadzor to passive catalytic hydrogen recombiners for VVER power units. *Kratkie rezul'taty nauchno-tehnicheskoi deyatel'nosti VNIAES za 2016 god: sb. rabot* [Brief results of scientific and technical activities of VNIAES for 2016: Proc. VNIAES]. Moscow, VNIAES, 2017, pp. 17–26 (in Russian).
15. Kumar R. K. Flammability limits of hydrogen-oxygen-diluent mixtures. *Journal of Fire Science*, 1985, vol. 3, iss. 4, pp. 245–262. <https://doi.org/10.1177/073490418500300402>