

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-2-178-186>

УДК 621.311.25:621.039

Анализ производительности пассивного каталитического рекомбинатора водорода с учетом условий внутри герметичного ограждения локализирующей системы безопасности АЭС с ВВЭР

В. В. Сорокин¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. На современной атомной электростанции предусмотрены локализирующие системы безопасности для удержания при аварии радиоактивных веществ и ослабления ионизирующего излучения. Вместе с радиоактивными веществами удерживается и водород, образующийся при разложении теплоносителя первого контура. Накопление водорода в присутствии кислорода из атмосферы в зоне локализации аварии несет опасность формирования горючих и взрывоопасных концентраций этих компонентов. В проектах АЭС с ВВЭР предусмотрена система удаления водорода, включающая пассивные каталитические рекомбинаторы водорода. Производительность устройств подтверждается экспериментально в эталонных условиях (бедная воздушно-водородная смесь, давление и температура близки к нормальным, отсутствие помех для газообмена). Производительность – важный для безопасности параметр. Внутри герметичного ограждения локализирующей системы безопасности АЭС с ВВЭР при аварии условия могут отличаться от эталонных и влиять на производительность. На основе расчетов исследована работа рекомбинаторов при недостатке кислорода и при затрудненном газообмене. Снижение производительности при недостатке кислорода достигает 50 %, что вызвано в основном ростом недожога. По сравнению с эталонными условиями, при аварии эффект выражен сильнее – 60–70 %. Затрудненный газообмен моделируется уменьшением высоты тягового канала рекомбинатора. К этому случаю можно свести размещение устройства в стесненных условиях и влияние скорости атмосферы внутри ограждения. Независимо от концентрации водорода рабочая характеристика устройства остается линейной, двукратное уменьшение высоты приводит к снижению производительности на 20 %. Результаты могут использоваться при обосновании безопасности АЭС с ВВЭР и экспертизе отчетов по обоснованию безопасности энергоблоков.

Ключевые слова: АЭС, ВВЭР, водородная безопасность, пассивные каталитические рекомбинаторы водорода, герметичная оболочка, недостаток кислорода, условия размещения, расчеты

Для цитирования: Сорокин, В. В. Анализ производительности пассивного каталитического рекомбинатора водорода с учетом условий внутри герметичного ограждения локализирующей системы безопасности АЭС с ВВЭР / В. В. Сорокин // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2021. Т. 64, № 2. С. 178–186. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-2-178-186>

Адрес для переписки

Сорокин Владимир Владимирович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-91-45
sorokin.npp@gmail.com

Address for correspondence

Sorokin Vladimir V.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-91-45
sorokin.npp@gmail.com

Analysis Catalytic Hydrogen Recombiner Capacity Calculation Taking into Account Conditions Inside Sealed Enclosure of Containment Safety System of Nuclear Power Plants with Water-Water Energetic Reactor

V. V. Sorokin¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Localizing safety systems are provided to contain radioactive substances in an accident and attenuate ionizing radiation at a modern nuclear power plant. Together with radioactive substances, hydrogen is also retained, which is formed during the decomposition of the primary coolant. The accumulation of hydrogen in the presence of oxygen from the atmosphere in the accident localization zone carries the danger of the formation of flammable and explosive concentrations of these components. Nuclear power plant (NPP) designs with water-water energetic reactor (WWER) provides for a hydrogen removal system including passive catalytic hydrogen recombiners. The device capacity is confirmed experimentally under reference conditions (lean air-hydrogen mixture, pressure and temperature close to normal, no interference with gas exchange). Capacity is an important safety parameter. In the event of an accident, conditions inside the sealed enclosure of the localizing system of NPP with WWER can differ from the reference ones and affect the capacity. On the basis of calculations, the operation of recombiners with lack of oxygen and with hindered gas exchange has been investigated in the paper. The decrease in capacity with lack of oxygen reaches 50 %, which is mainly caused by an increase in underburning. Compared to the reference conditions, the effect is more pronounced in the event of an accident – 60–70 %. The hindered gas exchange is modeled by a decrease in the height of recombining channel. This case can be reduced to the placement of the device in cramped conditions and the effect of the atmosphere speed inside the enclosure. Regardless of the hydrogen concentration, the operating characteristic of the device remains linear, with a two-fold decrease in height leads to a decrease in capacity by 20 %. The results can be used to substantiate the safety of NPPs with WWER and to review on the safety substantiation of power units.

Keywords: nuclear power plant, water-water energetic reactor, hydrogen safety, passive catalytic hydrogen recombining, hermitically sealed enclosure, lack of oxygen, containment conditions, calculations

For citation: Sorokin V. V. (2021) Analysis Catalytic Hydrogen Recombiner Capacity Calculation Taking into Account Conditions Inside Sealed Enclosure of Containment Safety System of Nuclear Power Plants with Water-Water Energetic Reactor. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 64 (2), 178–186. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-2-178-186> (in Russian)

Введение

В проектах современных АЭС с ВВЭР предусматривается система удаления водорода из зоны локализации аварии, основанная на использовании пассивных каталитических рекомбинаторов водорода [1, 2]. Уточнение параметров активных зон ВВЭР [3] способствует снижению водородной опасности при авариях, но не ослабляет ее до безопасного уровня. Суммарная производительность рекомбинаторов выбирается такой, чтобы концентрация водорода была меньше нижнего концентрационного предела воспламенения, а в случаях тяжелых аварий не произошло взрыва и горение ограничивалось безопасным для ограждения уровнем. Поскольку производительность устанавливается в эталонных условиях, существует известная трудность обоснования достаточности при выборе количества

и мест расположения устройств с учетом условий внутри герметичного ограждения при авариях.

Реакторная установка находится внутри герметичного ограждения, причем части установки размещаются в специальных помещениях или боксах. Типичный бокс – пол, потолок, стены и проемы, через которые боксы сообщаются между собой и с основным объемом под ограждением. После компоновки основного оборудования с выделением площадок для обслуживания, для размещения рекомбинаторов водорода системы аварийного удаления водорода локализирующей системы безопасности энергоблока остается ограниченное число мест. Из них выбирают защищенные при авариях от струй, летящих предметов и затопления, обеспечивающие доступ для обслуживания, размещенные в местах наиболее вероятного появления водорода. В этих условиях обеспечить эталонный монтаж (уединенное место на достаточно протяженной вертикальной стенке со свободным притоком и оттоком рабочей газовой среды) не всегда возможно. В условиях затрудненного газообмена можно ожидать снижения производительности рекомбинатора водорода.

Эталонная рабочая среда для рекомбинатора – это бедная смесь водорода с воздухом, иногда разбавленная водяным паром. В результате скорость реакции на катализаторе лимитируется концентрацией водорода, а кислород имеется в избытке и его концентрация не является значащим фактором. В условиях аварии внутри герметичного ограждения могут формироваться рабочие среды, обедненные кислородом, в которых уже концентрация кислорода на катализаторе ограничивает скорость реакции (oxygen starvation). Дефицит кислорода характерен для финальных стадий аварий, а также наблюдается в боксах, в которые происходит течь. Из таких боксов пароводородная струя выносит воздух и доставляет избыток водорода по отношению к оставшемуся кислороду. Коэффициент диффузии кислорода значительно ниже, чем у водорода, поэтому следует ожидать снижения потока реагента на катализатор и уменьшения производительности рекомбинатора.

Влияние отмеченных условий внутри герметичного ограждения оценивается в научной литературе как важный для безопасности фактор и рассматривается во многих работах [4–16]. Согласно [4–5], дефицит кислорода приводит к снижению степени рекомбинации водорода до уровня 40–70 % при атмосферном давлении. При стехиометрической пропорции кислорода и водорода производительность устройства составляет менее 50 % от номинальной. Экспериментально установлено падение производительности рекомбинатора, превышающей 50 %, при недостатке кислорода. Работа рекомбинатора в типичных для аварий условиях, в частности при недостатке кислорода, противотоке атмосферного газа, не вполне понятна. В [6] внешний массоперенос и химическая реакция учитываются отдельно, установлено влияние концентрации кислорода на дожигание. В начальный период аварии рекомбинаторы, согласно расчетам [7], не смогут справиться с риском достижения водородом горючей концентрации из-за их инерционности и дефицита кислорода. В ходе анализа вопросов водородной безопасности на предмет выявления оставшихся неясностей отмечается работа рекомбинатора при дефиците кислорода [8]. В обобщающей работе [9] обращается внимание на то, что при слепом тестировании расчеты дают заметно различающиеся результаты в условиях нехватки кислорода.

Степень рекомбинации водорода заметно снижается при недостатке кислорода [11]. Оптимальная эффективность рекомбинатора наблюдается при содержании кислорода выше стехиометрического [10]. Недостаток кислорода уменьшает конверсию водорода рекомбинатором и не влияет на конверсию оксида углерода [11]. Дальнейшего изучения требуют вопросы работы при низком содержании кислорода, влияния положения устройства (близость ограждений и местные течения газа) на его производительность [12]. В условиях реальной аварии с течью теплоносителя первого контура и потерей источников переменного тока рекомбинаторы не препятствуют возникновению водородной стратификации [13]. При использовании множества устройств пожароопасная ситуация перестает зависеть от деталей поведения каждого из них. Риск воспламенения заканчивается спустя 15–30 мин с момента пикового выброса.

Отмечено влияние фактора размещения рекомбинатора на его производительность: положение в нижней части контейнента способствует улучшению перемешивания среды и усилению переноса водорода к каталитической поверхности [14]. Остаются вопросы о снижении эффективности рекомбинаторов в условиях внешнего противотока газа, что типично для небольших помещений или узких боксов [15]. Повышение производительности рекомбинатора наблюдалось при дополнительном действии вентилятора в направлении естественной тяги [16].

В данной статье рассматривается влияние места установки и недостатка кислорода на параметры работы рекомбинатора. Как показал анализ научной литературы, поставленные вопросы актуальны и, несмотря на активные исследования, еще не получили общепризнанного решения. Прикладной интерес представляет изучение этих вопросов в характерных для аварии условиях внутри герметичного ограждения локализующей системы безопасности АЭС с ВВЭР (давление 0,3 МПа, температура 100 °С, объемная концентрация водорода 2–4 %). Для исследования выбрано устройство фирмы «Арева» с каталитическим блоком в форме эквидистантных параллельных пластин, покрытых платиновым катализатором, на носителе из оксида алюминия (в гамма-форме). Такими рекомбинаторами могут оснащаться энергоблоки АЭС с ВВЭР [1, 2]. Расчет рекомбинатора ведется на основе подхода, предложенного в [17].

Работа рекомбинатора в условиях недостатка кислорода

В модели [17] принято, что конверсия водорода определяется балансом эффектов разности концентраций компонента между ядром потока и стенкой и сопротивлением переносу. Сопротивление обусловлено ограниченностью скоростей последовательно: диффузии водорода на стенку и химического его превращения в воду на катализаторе. В силу избытка кислорода влияние концентрации этого реагента на скорость реакции не наблюдается. Для расчета работы рекомбинатора при недостатке кислорода в условиях избытка водорода в рамках данной модели водород заменяется кислородом. Коэффициент диффузии кислорода задается выражением $D_{O_2} = 0,182(T/273)^{1,724} p_0/p$ см²/с, где T – температура газа, К; p – давление газа внутри герметичного ограждения, МПа; $p_0 = 0,1$ МПа [18]. Скорость

химической реакции определяется формулой $k_{sO_2} = k_s/2$ в соответствии со стехиометрическим уравнением превращения водорода и кислорода в воду [19], скорость химической реакции для водорода k_s установлена в [17]. Характерные объемные концентрации кислорода по стехиометрии составляют 1 и 2 %.

Данные о производительности рекомбинатора П в условиях недостатка кислорода при прочих равных приводятся на рис. 1 в безразмерной форме, масштабом принята производительность при объемной концентрации водорода 4 %, избытке кислорода, температуре в помещении 25 °С, атмосферном давлении (эталонные условия).

Согласно рис. 1, рабочая характеристика рекомбинатора остается линейной, производительность снижается более чем вдвое. Температура на выходе из устройства составляет 94 °С, средняя температура катализатора 156 °С, недожог 0,57 против параметров 275 °С, 516 °С и 0,24 соответственно в эталонных условиях. Эти величины соответствуют данным [3–4].

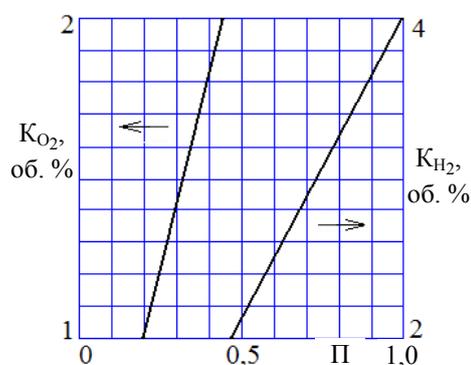


Рис. 1. Изменение производительности рекомбинатора при недостатке кислорода

Fig. 1. Change in capacity of recombiner with lack of oxygen

Рабочие параметры рекомбинатора в условиях аварии на АЭС с ВВЭР приведены в табл. 1, снижение производительности оказывается более сильным, чем в эталонных условиях. Даже двукратное повышение концентрации кислорода несущественно влияет на относительную производительность. На снижении производительности наиболее сказывается уровень недожога.

Таблица 1

Параметры работы рекомбинатора
Recombiner operation parameters

Параметр	Относительная производительность	Недожог	Скорость газа на входе, м/с
Объемная концентрация водорода 4 %, избыток кислорода	1,000	0,345	0,960
Объемная концентрация кислорода 2 %, избыток водорода	0,315	0,690	0,640
Объемная концентрация кислорода 4 %, избыток водорода	0,363	0,711	0,790
Примечание. Давление в зоне локализации аварии 0,3 МПа, температура 100 °С.			

Работа рекомбинатора в условиях затрудненного газообмена

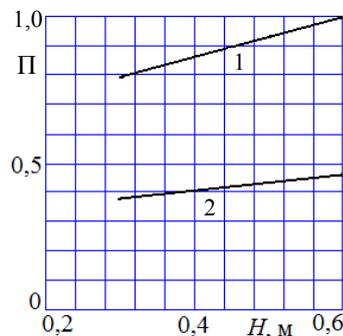
Высота тягового участка рекомбинатора составляет 0,6 м, коэффициент гидравлического сопротивления 3 [17]. Поскольку в уравнении баланса тяги и сопротивления эти величины пропорциональны, достаточно рассмотреть вли-

яние высоты тягового участка на производительность устройства. Сниженные высоты соответствуют затруднению подвода или отвода газа, а также влиянию противотока атмосферы внутри ограждения. Действие сонаправленного тяге движения атмосферы аналогично увеличению высоты. При размещении рекомбинатора на стенке герметичного ограждения сонаправленное движение возникает при работе спринклерной системы: поток капель вызывает нисходящее течение по центру помещения и восходящее по стенке. При отключенной спринклерной системе нисходящий вдоль стенки поток вызывается свободной конвекцией. Отключение системы может произойти как вследствие отказа, так и в рамках действий по сценарию управления запроектной аварией.

Данные о производительности рекомбинатора в условиях уменьшения высоты тягового участка в эталонных условиях при прочих равных приводятся на рис. 2.

Рис. 2. Изменение производительности рекомбинатора в зависимости от высоты тягового участка для объемной концентрации водорода: 1 – 4 %; 2 – 2 %

Fig. 2. Change in recombinder capacity depending on height of traction section for volumetric hydrogen concentration: 1 – 4 %; 2 – 2 %



При обеих концентрациях водорода рабочая характеристика устройства остается линейной, двукратное уменьшение высоты приводит к снижению производительности примерно на 20 %.

Характеристики рекомбинатора в условиях аварии на АЭС с ВВЭР при объемной концентрации водорода 4 % приведены в табл. 2. Производительность, недожог и скорость на входе устройства возрастают с высотой, изменения невелики и сопоставимы с таковыми в эталонных условиях.

Таблица 2

Влияние высоты тягового участка на характеристики рекомбинатора
Influence of traction section on characteristics of recombinder

Параметр	Высота тягового участка, м		
	0,400	0,600	0,800
Относительная производительность	0,910	1,000	1,050
Недожог	0,274	0,345	0,392
Скорость газа на входе, м/с	0,790	0,960	1,090
Температура газа на выходе, °С	338	315	300

Для прикладных оценок эквивалентом уменьшения высоты тягового участка на 0,13 м по балансу тяги и сопротивления является наличие скорости противотока атмосферы 1 м/с.

Рассмотрим также вопрос изменения производительности рекомбинатора при размещении в боксе (рис. 3). Бокс состоит из стенки, потолка и проема. Рекомбинатор размещен на стенке. Горячий газ выходит из рекомбинатора в бокс через окно, собирается у потолка и вытекает в объем герметичного ограждения через проем. Расстояние от потолка до верха рекомбинатора h_1 ,

до проема h_2 . Для рекомбинатора «Арева» FR90/1-1500 $l_1 = 0,3$ м, $l_2 = 1,5$ м. Производительность рекомбинатора при высоте тягового участка 0,6 м составит $Q = 0,96 \text{ м}^3/\text{с} \times 0,45 \text{ м}^2 \times (273 + 315)/(273 + 100) = 0,68 \text{ м}^3/\text{с}$ с учетом данных табл. 2. При сливе через проем длиной l_3 под потолком вдали от слива установится уровень горячего газа $H = 1,5((Q/l_3)^2/g)^{1/3} + h_2$ [20]. Из окна будет вытекать плоская струя горячего газа толщиной $l_1 l_2 / (2l_1 + l_2) = 0,21$ м в объем бокса. Подобные истечения характеризуются балансом сил сопротивления и плавучести, происходят при постоянной скорости [21, 22]; при растекании струи по горизонтали (нижняя граница струи выше верхнего среза окна) баланс также сохраняется [22]. Тогда если $h_1 > 0,21 + H$, то размещение в боксе не повлияет на производительность устройства. Для этого, например, при $h_2 = 0$, $l_3 = 2l_1 + l_2$ следует выбирать $h_1 > 0,54$ м.

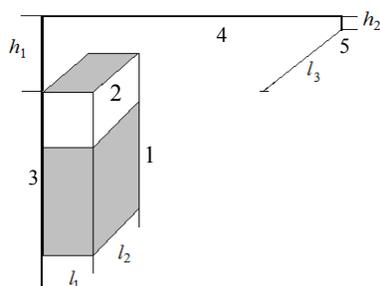


Рис. 3. Рекомбинатор в боксе:
1 – рекомбинатор; 2 – выходное окно;
3 – стенка; 4 – потолок; 5 – проем

Fig. 3. Recombiner in box:
1 – recombiner; 2 – outlet;
3 – wall; 4 – ceiling; 5 – opening

ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ производительности пассивного каталитического рекомбинатора водорода системы удаления водорода локализирующей системы безопасности энергоблока АЭС в условиях недостатка кислорода или затрудненного газообмена. Параметры среды под герметичным ограждением выбраны характерными для аварии на АЭС с ВВЭР (давление 0,3 МПа, температура 100 °С, объемная концентрация водорода 2–4 %).

2. При недостатке кислорода рабочая характеристика рекомбинатора остается линейной, производительность снижается более чем вдвое. Изменение рабочих параметров рекомбинатора при аварии на АЭС с ВВЭР оказывается более значительным, чем в эталонных условиях. На снижение производительности наибольшее влияние оказывает недожог. Расчетные и известные из научно-технической литературы данные совпадают удовлетворительно.

3. Затрудненный газообмен моделируется уменьшением высоты тягового канала рекомбинатора. Независимо от концентрации водорода рабочая характеристика устройства остается линейной, двукратное уменьшение высоты приводит к снижению производительности на 20 %. Результаты могут использоваться при обосновании безопасности АЭС с ВВЭР и экспертизе отчетов по обоснованию безопасности энергоблоков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Проект АЭС-2006. Ленинградская АЭС-2. ОАО «СПбАЭП». СПб.: Ин-т «Атомэнергопроект», 2009. 34 с.
2. AREVA Passive Autocatalytic Recombiner. G-008-V3-13-ENGPB. Erlangen: AREVA GmbH, 2013. 4 p.
3. Исследование локальной гидродинамики теплоносителя в смешанной активной зоне реактора ВВЭР / С. М. Дмитриев [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 2. С. 151–162. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-151-162>.

4. Gupta, S. Passive Autocatalytic Recombiners (PAR) Induced Ignition and the Resulting Hydrogen Deflagration Behaviour in LWR Containments / S. Gupta, T. Kanzleiter, G. Poss // Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-16): Proc. International Topical Meeting. American Nuclear Society. Chicago (USA), 30 Aug. – 4 Sept. 2015. P. 1540–1553.
 5. Gupta, S. Experimental Investigations Relevant for Hydrogen and Fission Product Issues Raised by the Fukushima Accident / S. Gupta // Nuclear Engineering and Technology. 2015. Vol. 47, No 1. P. 11–25. <https://doi.org/10.1016/j.net.2015.01.002>.
 6. Experimental Investigation on the Kinetics of Catalytic Recombination of Hydrogen with Oxygen in Air / K. C. Sandeep [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. 2014. Vol. 39, No 31. P. 17906–17912. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.08.148>.
 7. Lopez-Alonso, E. Hydrogen Distribution and Passive Autocatalytic Recombiner (PAR) Mitigation in a PWR-KWU Containment Type / E. Lopez-Alonso, D. Papini, G. Jimenez // Annals of Nuclear Energy. 2017. Vol. 109, No 11. P. 600–611.
 8. A Review on Hydrogen Generation, Explosion and Mitigation During Severe Accidents in Light Water Nuclear Reactors / R. Gharari [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. 2018. Vol. 43, No 4. P. 1939–1965. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.11.174>.
 9. Status Report on Hydrogen Management and Related Computer Codes. NEA/CSNI/R(2014)8 [Electronic resource] / Nuclear Energy Agency. Mode of access: <https://www.oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2020-01/csni-r2014-8.pdf>.
 10. Meynet, N. Impact of Oxygen Starvation on Operation and Potential Gas-Phase Ignition of Passive Auto-Catalytic Recombiners / N. Meynet, A. Bentaib, V. Giovangigli // Combustion and Flame. 2014. Vol. 161, No 8. P. 2192–2202. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2014.02.001>.
 11. Measurements of the Impact of Carbon Monoxide on the Performance of Passive Autocatalytic Recombiners at Containment-Typical Conditions in the THAI Facility / M. Freitag [et al.] // Annals of Nuclear Energy. 2020. Vol. 141, Art. 107356. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.107356>.
 12. Bentaib, A. Overview on Hydrogen Risk Research and Development Activities: Methodology and Open Issues / A. Bentaib, N. Meynet, A. Bleyer // Nuclear Engineering and Technology. 2015. Vol. 47, No 1. P. 26–32. <https://doi.org/10.1016/j.net.2014.12.001>.
 13. Evaluation of the PAR Mitigation System in Swiss PWR Containment Using the GOTHIC Code / D. Papini [et al.] // Nuclear Technology. 2019. Vol. 205, No 1–2. P. 153–173. <https://doi.org/10.1080/00295450.2018.1505356>.
 14. Affect of Recombiner Location on its Performance in Closed Containment under Dry and Steam Conditions / V. Shukla [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. 2019. Vol. 44, No 47. P. 25957–25973. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.08.015>.
 15. Safety Research Opportunities Post-Fukushima. Initial Report of the Senior Expert Group. NEA/CSNI/R(2016)19 [Electronic resource] / Nuclear Energy Agency. Mode of access: https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_19758/safety-research-opportunities-post-fukushima-initial-report-of-the-senior-expert-group.
 16. Испытания модели пассивного каталитического дожигателя водорода / В. Д. Келлер [и др.] // Теплоэнергетика. 1991. № 3. С. 55–58.
 17. Воробьев, В. В. Расчет влияния отравления на производительность пассивного каталитического рекомбинатора водорода [Электронный ресурс] / В. В. Воробьев, В. А. Немцев, В. В. Сорокин. Режим доступа: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2017/documents/mntk2017-137.pdf>.
 18. Таблицы физических величин / под ред. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.
 19. Бенсон, С. Основы химической кинетики / С. Бенсон. М.: Мир, 1964. 603 с.
 20. Бэтчелор, Д. Введение в динамику жидкости / Д. Бэтчелор. М.: Мир, 1973. 760 с.
 21. Джалурия, Й. Естественная конвекция: тепло- и массообмен / Й. Джалурия. М.: Мир, 1983. 400 с.
 22. Теория турбулентных струй / Г. Н. Абрамович [и др.]. М.: Наука, 1984. 716 с.
- Поступила 14.07.2020 Подписана в печать 03.11.2020 Опубликовано онлайн 30.03.2021

REFERENCES

1. *NPP-2006 Project. Leningrad NPP-2. JSC “SPb Atomenergoproekt”* (2009) St. Petersburg, Atomenergoproekt, 34 (in Russian).
2. *AREVA Passive Autocatalytic Recombiner* (2013) G-008-V3-13-ENGPB. Erlangen: AREVA GmbH, 4.
3. Dmitriev S. M., Gerasimov A. V., Dobrov A. A., Doronkov D. V., Pronin A. N., Ryazanov A. V., Solntsev D. N., Khrobostov A. E. (2020) Investigation of Coolant Local Hydrodynamics in the Mixed Core of the VVER Reactor. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education*

- Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (2), 151–162. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-151-162> (in Russian).
4. Gupta S., Kanzleiter T., Poss G. (2015) Passive Autocatalytic Recombiners (PAR) Induced Ignition and the Resulting Hydrogen Deflagration Behaviour in LWR Containments. *Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-16): Proc. International Topical Meeting Chicago (USA)*, 30 Aug. – 4 Sept. Chicago: American Nuclear Society, 1540–1553.
 5. Gupta S. (2015) Experimental Investigations Relevant for Hydrogen and Fission Product Issues Raised by the Fukushima Accident. *Nuclear Engineering and Technology*, 47 (1), 11–25. <https://doi.org/10.1016/j.net.2015.01.002>.
 6. Sandeep K. C., Bhattacharyya R., Warghat C., Bhanja K., Mohan S. (2014) Experimental Investigation on the Kinetics of Catalytic Recombination of Hydrogen with Oxygen in Air. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39 (31), 17906–17912. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.08.148>.
 7. Lopez-Alonso E., Papini D., Jimenez G. (2017) Hydrogen Distribution and Passive Autocatalytic Recombiner (PAR) Mitigation in a PWR-KWU Containment Type. *Annals of Nuclear Energy*, 109 (11), 600–611. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2017.05.064>.
 8. Gharari R., Kazeminejad H., Mataji Kojouri N., Hedayat A. (2018) A Review on Hydrogen Generation, Explosion and Mitigation During Severe Accidents in Light Water Nuclear Reactors. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43 (4), 1939–1965. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.11.174>.
 9. Nuclear Energy Agency (2014) *Status Report on Hydrogen Management and Related Computer Codes. NEA/CSNI/R(2014)8*. Available at: <https://www.oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2020-01/csni-r2014-8.pdf>.
 10. Meynet N., Bentaib A., Giovangigli V. (2014) Impact of Oxygen Starvation on Operation and Potential Gas-Phase Ignition of Passive Auto-Catalytic Recombiners. *Combustion and Flame*, 161 (8), 2192–2202. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2014.02.001>.
 11. Freitag M., von Laufenberg B., Colombet M., Klauk M. (2020) Measurements of the Impact of Carbon Monoxide on the Performance of Passive Autocatalytic Recombiners at Containment-Typical Conditions in the THAI Facility. *Annals of Nuclear Energy*, 141, 107356. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.107356>.
 12. Bentaib A., Meynet N., Bleyer A. (2015) Overview on Hydrogen Risk Research and Development Activities: Methodology and Open Issues. *Nuclear Engineering and Technology*, 47 (1), 26–32. <https://doi.org/10.1016/j.net.2014.12.001>.
 13. Papini D., Andreani M., Steiner P., Ničeno B., Klügel J.-U., Prasser H.-M. (2019) Evaluation of the PAR Mitigation System in Swiss PWR Containment Using the GOTHIC Code. *Nuclear Technology*, 205 (1–2), 153–173. <https://doi.org/10.1080/00295450.2018.1505356>.
 14. Shukla V., Ganju S., Varma S., Sengupta S., Maheshwari N. K. (2019) Affect of Recombiner Location on its Performance in Closed Containment under Dry and Steam Conditions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44 (47), 25957–25973. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.08.015>.
 15. Nuclear Energy Agency (2016) *Safety Research Opportunities Post-Fukushima. Initial Report of the Senior Expert Group. NEA/CSNI/R(2016)19*. Available at: https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_19758/safety-research-opportunities-post-fukushima-initial-report-of-the-senior-expert-group.
 16. Keller V. D., Shebeko U. N., Shelepin V. A., Serkin M. A., Eremenko O. J., Dzisyak A. P., Shcherbakova M. V. (1991) Tests of Passive Catalytic Hydrogen Recombiner. *Teploenergetika = Thermal Engineering*, (3), 55–58 (in Russian).
 17. Vorobyev V., Nemcev V., Sorokin V. *Calculation of the Effect of Poisoning on the Performance of a Passive Catalytic Hydrogen Recombiner*. Available at: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2017/documents/mntk2017-137.pdf> (in Russian).
 18. Kikoin I. K. (ed.). (1976) *Tables of Physical Quantities: Reference Book*. Moscow, Atomizdat Publ. 1008 (in Russian).
 19. Benson S. W. (1960) *The Foundations of Chemical Kinetics*. NY, McGraw-Hill. 490.
 20. Batchelor G. K. (1973) *An Introduction to Fluid Dynamics*. Cambridge, Cambridge Univ. Press. 615.
 21. Jaluria Y. (1980) *Natural Convection Heat and Mass Transfer*. Oxford, Oxford Pergamon Press. 326.
 22. Abramovich G. N. (2003) *The Theory of Turbulent Jets*. Cambridge, MIT Press. 671. <https://doi.org/10.7551/mitpress/6781.001.0001>.

Received: 14 July 2020

Accepted: 3 November 2020

Published online: 30 March 2021