

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-1-67-75>

УДК 621.311.25:621.039

## Расчет времени пуска пассивного каталитического рекомбинатора водорода локализующей системы безопасности АЭС с ВВЭР

В. В. Сорокин<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2022  
Belarusian National Technical University, 2022

**Реферат.** Система удаления водорода обеспечивает водородную безопасность. На АЭС с ВВЭР она состоит из пассивных каталитических рекомбинаторов водорода. Расчет устройств имеет большое значение для обоснования безопасности, поскольку сложные условия аварии на энергоблоке невоспроизводимы в экспериментах. Рекомбинатор состоит из корпуса и кассеты с каталитическими элементами, конструкция которых обеспечивает прохождение газообразной среды через устройство. При контакте с катализатором происходит химическая реакция соединения водорода и кислорода, сопровождающаяся выделением теплоты, в результате концентрация водорода под оболочкой снижается. Проблемой является пуск из холодного состояния: активность холодного катализатора низка, а тяга не наблюдается до нагрева катализатора и формирования столба теплого газа внутри устройства. Переход из холодного состояния в рабочее занимает определенное время, в течение которого производительность рекомбинатора меньше номинальной. Время пуска – важный для безопасности параметр. В статье проведен расчет времени пуска рекомбинатора водорода с каталитическим блоком в форме эквидистантных параллельных каталитических пластин. Используются средние по местному сечению величины и коэффициенты передачи, последние учитывают влияние свободной конвекции и химической реакции. Скорость газа определяется по балансу сил плавучести и сопротивления. Расчетные и известные из научно-технической литературы данные совпадают удовлетворительно. В качестве консервативной оценки времени пуска рекомбинатора рекомендуется использовать величину 300 с. Рост температуры практически не влияет на запуск рекомбинатора с активным катализатором, повышение концентрации водорода ускоряет запуск, понижение давления его замедляет. Полученные 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, время пуска, расчеты

**Для цитирования:** Сорокин, В. В. Расчет времени пуска пассивного каталитического рекомбинатора водорода локализующей системы безопасности АЭС с ВВЭР / В. В. Сорокин // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2022. Т. 65, № 1. С. 67–75. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-1-67-75>

---

### 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

---

## Calculation of Start-Up Time of Passive Catalytic Hydrogen Recombiner of Localization Safety System of a Nuclear Power Plant Equipped with VVER

V. V. Sorokin<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The hydrogen removal system ensures hydrogen safety. At a VVER nuclear power plant, it consists of passive catalytic hydrogen recombiners. The calculation of devices is of great importance for safety justification, since the complex conditions of an accident at a power unit are not reproducible in experiments. The recombiner consists of a casing and a cassette with catalytic elements, the design of which ensures the passage of a gaseous medium through the device. Upon contact with the catalyst, a chemical reaction of hydrogen and oxygen compounds occurs, accompanied by the release of heat; as a result, the concentration of hydrogen under the shell decreases. The problem is starting from a cold state since the activity of the cold catalyst is low, and the thrust is not observed until the catalyst is heated and a column of warm gas is formed inside the device. The transition from the cold state to the working state takes a certain time, during which the recombiner performance is below nominal. The start-up time is a parameter that is important in terms of safety. The article calculates the start-up time of a hydrogen recombiner with a catalytic block in the form of equidistant parallel catalytic plates. Local cross-sectional averages and transmission coefficients are used, the latter taking into account the influence of free convection and chemical reaction. The gas velocity is determined by the balance of buoyant and resistance forces. The calculated data and the data known from the scientific and technical literature coincide satisfactorily. As a conservative estimate of the start-up time of the recombiner, it is recommended to use the value of 300 s. An increase in temperature practically does not affect the start of the recombiner with an active catalyst, an increase in the concentration of hydrogen accelerates the start, and a decrease in pressure slows it down. The results obtained in the study can be used in the justification of the safety of VVER nuclear power plants and the examination of reports on the justification of the safety of power units.

**Keywords:** nuclear power plant, VVER, hydrogen safety, passive catalytic hydrogen recombiner, start-up time, calculations

**For citation:** Sorokin V. V. (2022) Calculation of Start-Up Time of Passive Catalytic Hydrogen Recombiner of Localization Safety System of a Nuclear Power Plant Equipped with VVER. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 65 (1), 67–75. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-1-67-75> (in Russian)

### Введение

На современной атомной электростанции предусмотрены локализирующие системы безопасности для удержания при аварии радиоактивных веществ и ионизирующего излучения в определенных проектом границах. Границу образует герметичное ограждение (ГО). Согласно нормативным требованиям НП-001-15, безопасность атомной электростанции должна обеспечиваться за счет последовательной реализации концепции глубоко эшелонированной защиты, основанной на применении системы физических барьеров на пути распространения ионизирующего излучения и радиоактивных веществ в окружающую среду и системы технических и организационных мер по защите барьеров и сохранению их эффективности. ГО рассматривается как четвертый физический барьер. Уточнение параметров активных зон ВВЭР [1] способствует повышению надежности первых трех барьеров (топливная матрица, оболочка твэла, граница первого контура), но роль четвертого барьера в обеспечении радиационной безопасности насе-

ления и окружающей среды остается ключевой. При выявлении неработоспособности любого из предусмотренных физических барьеров или неготовности мер по его защите следует остановить реакторную установку и привести блок атомной электростанции в безопасное состояние.

Вместе с радиоактивными веществами ГО удерживает и водород, выделяющийся при аварии. Накопление водорода в присутствии кислорода из состава атмосферы в зоне локализации аварии несет опасность формирования горючих и взрывоопасных концентраций этих компонентов. Вероятная последующая реакция водорода с кислородом внутри ГО способна критически увеличить нагрузки на ограждение и вызвать его разрушение. Для защиты ГО и поддержания его работоспособности необходимо решить проблему, связанную с выходом водорода при авариях, особенно при тяжелой аварии с течью и плавлением топлива. В проектах АЭС с ВВЭР предусмотрена система удаления водорода, включающая пассивные каталитические рекомбинаторы водорода [2].

Рекомбинатор состоит из корпуса и кассеты с каталитическими элементами, конструкция которых обеспечивает проход газообразной среды через устройство [2–5]. При контакте с катализатором протекает химическая реакция соединения водорода и кислорода, сопровождающаяся выделением теплоты. Под ее действием возникает конвективный поток, обеспечивающий непрерывное поступление реагентов к катализатору и отвод продукта (водяного пара) из устройства. Вход и выход среды осуществляются через окна в корпусе. Концентрация водорода под оболочкой снижается.

Пассивный принцип действия рекомбинатора основан на свойствах энергонезависимости (для ведения каталитического окисления не нужен источник энергии, эта особенность позволяет использовать устройства в сценариях с полным обесточиванием АЭС) и самозапуска (гетерогенное каталитическое окисление не требует внешних команд и средств иницирования реакции) [5]. Это в совокупности с независимостью элементов системы сжигания водорода друг от друга и от других систем энергоблока обеспечивает высокую степень надежности [2–8].

Одна из проблем при использовании рекомбинаторов – пуск из холодного состояния. Активность холодного катализатора низка, а тяга не наблюдается до его нагрева и формирования столба теплого газа внутри устройства. Переход из холодного состояния в рабочее занимает определенное время (время пуска), в течение которого производительность рекомбинатора меньше номинальной. Время пуска является важным для безопасности параметром, учитывается при расчетах, обосновывающих безопасность [9–11]. По данным научно-технической литературы, оно в основном укладывается в интервал от 100 до 1000 с и зависит от множества параметров. Так, время пуска может составлять 100 с (при объемной концентрации водорода 4 % и температуре 25 °С) [3], несколько сотен секунд [9], 10 мин после начала выхода водорода [10], 100–300 с [11]. Время выхода на рабочий режим в зависимости от температуры парогазовой смеси и объемной концентрации водорода составляет: не более 10 мин при

температуре до 60 °С и концентрации водорода менее 2 %; не более 3 мин при температуре выше 60 °С и концентрации водорода более 2 % [12]. На практике время пуска однотипных устройств в однотипных условиях может отличаться. Так, самый быстрый старт рекомбинатора «Арева» занял 4 мин после начала подачи водорода, к этому времени молярная доля водорода в воздухе возле устройства составила 0,2 %, а самый медленный – 24 мин при 4,4 % [11].

Время пуска возрастает, если в атмосфере присутствуют специфические химические вещества, снижающие активность катализатора. Их целесообразно делить на яды и блокираторы, но пока некоторые авторы рассматривают эти термины как синонимы. В [11] отмечено, что температура активного катализатора поднимается выше 100 °С за 2–3 мин, тогда как для отравленного катализатора требуется 30 мин. Отмечается увеличение времени пуска рекомбинатора под действием яда или блокиратора [13]. Известным примером блокиратора является монооксид углерода [14], примером каталитического яда – теллур [15]. Молекулы блокиратора адсорбируются катализатором и мешают доступу водорода, при повышении температуры происходит десорбция и активность катализатора восстанавливается. При отравлении ядом активность катализатора снижается необратимо. В ходе эксплуатации рекомбинаторов производится регламентный отжиг каталитических элементов. Если активность элемента не восстанавливается до проектной, его заменяют новым.

Определяющими параметрами времени пуска являются температура катализатора и концентрация водорода, с их увеличением время уменьшается [12]. Старт при пониженном содержании кислорода происходит с задержкой 1–5 мин [4]. Отмечен замедленный старт при давлении ниже 0,75 атм [16].

В научно-технической литературе приводятся различные данные о времени пуска рекомбинаторов, что вызывает затруднения при выборе этой величины для расчетов по обоснованию безопасности, в частности при составлении или экспертизе отчета по обоснованию безопасности энергоблока АЭС. Особенно остро неопределенность проявляется при моделировании проектных аварий, для которых нормы безопасности рекомендуют использовать консервативные оценки и выбирать из имеющегося поля параметров величины, приводящие к самым неблагоприятным реализациям сценариев аварии.

Целью настоящего исследования является расчет времени пуска пассивного каталитического рекомбинатора водорода локализующей системы безопасности АЭС с ВВЭР для уточнения времени пуска и влияния на процесс следующих параметров: начальной концентрации водорода, начальной температуры, давления под оболочкой. В качестве конкретного рекомбинатора 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 [2].

### Модель и алгоритм расчета рекомбинатора

В рекомбинаторе выделяют элементарную ячейку в составе плоского канала, образованного двумя соседними пластинами, вводят направленную вверх ось координат  $Ox$ , совпадающую с осью канала и началом на входе в канал. Ширина канала 20 мм, длина 140 мм. Источником теплоты является реакция окисления водорода на поверхности пластины, водород поступает из потока за счет диффузии. Теплота идет на повышение температуры пластины и подогрев потока. В начале пуска основная доля теплоты аккумулируется в пластинах, в конце – в потоке газа. Пластина имеет сложное строение, основу из двухмиллиметровой жаростойкой стали (лист), воспринимающей механические нагрузки, и тонкий слой из пористой керамики с платинированной поверхностью. Термическое сопротивление слоя и контакта с металлом существенно меньше, чем сопротивление в сторону газа, поэтому всей пластине приписывают температуру  $\Delta T_w(x)$ . Изменение температуры поверхности  $\Delta T_w(x)$  за промежуток времени  $\tau$  составляет

$$\Delta T_w(x) = [h\alpha_D C - \alpha(T_w - T_g)]\tau / c_M \rho_M \delta_M,$$

где  $h$  – теплота сгорания водорода;  $C$  – концентрация водорода,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $T_g$  – температура газа,  $^\circ\text{C}$ ;  $c_M$  – теплоемкость стали,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ ;  $\rho_M$  – плотность стали,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\delta_M$  – толщина пластины, м;  $\alpha_D, \alpha$  – диффузионный и тепловой коэффициенты передачи, определены в [15].

Свойства материалов приведены в [17].

Изменение температуры газа  $\Delta T_g(x)$  составляет

$$\Delta T_g = \alpha(T_w - T_g)(4dx/D)c_p \rho w,$$

где  $D$  – гидравлический диаметр канала, м;  $c_p$  – теплоемкость газа,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ ;  $\rho$  – плотность газа,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $w$  – скорость газа (местная средняя по сечению), м/с.

В начале расчета принимают скорость газа на входе 0,1 м/с [18] с направлением вверх, затем по балансу сил плавучести и сопротивления [15]. В качестве газа выбирают воздух.

Алгоритм расчета состоит в определении  $\Delta T_w(x)$ , причем используют  $T_g$  с предыдущего шага по времени, затем вычисляют  $\Delta T_g(x)$  и  $T_g(x)$ . Рассчитывают температуру газа на выходе для корректировки  $w$  и среднюю  $T_w$  для поправки  $\alpha$  и свойств газа. Подогревы стенки суммируют по времени. Близость окончания пуска связывают с приближением расчетных величин температур к стационарным значениям, определенным по [15, 19].

### Результаты расчета

Результаты расчета базового режима пуска рекомбинатора, характеризующегося температурой внутри ГО  $25^\circ\text{C}$ , давлением 1 атм и объемной концентрацией водорода 4 %, представлены на рис. 1, где  $G$  – производительность устройства, отнесенная к стационарной производительности;  $w$  – скорость газа, отнесенная к стационарной скорости;  $T$  – температура газа на выходе из устройства, отнесенная к стационарной температуре;

$t$  – время от начала работы, отнесенное к 500 с;  $n$  – недожог водорода, отношение концентраций на выходе и входе в устройство.

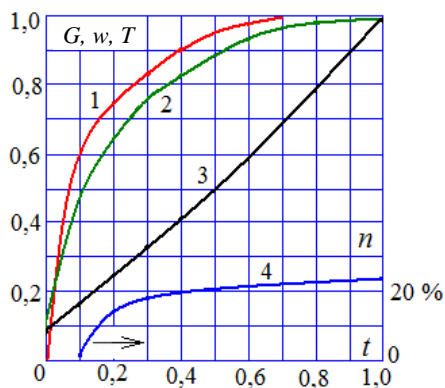


Рис. 1. Изменение характеристик рекомбинатора в процессе пуска:  
1 – производительность; 2 – скорость газа;  
3 – температура на выходе; 4 – недожог  
Fig. 1. Start-up recombiner characteristics alterations: 1 – capacity;  
2 – gas velocity; 3 – outlet temperature;  
4 – hydrogen combustible loss

С течением времени характеристики рекомбинатора водорода стремятся к своим стационарным значениям (рис. 1). Быстрее всего растет производительность, потом скорость газа (или тяга), затем температура газа на выходе. Недожог быстро нарастает с 50 по 100 с, затем увеличивается незначительно. Он обусловлен высокой скоростью газа, вследствие которой водород проскакивает через устройство, не успев прореагировать.

Согласно рис. 1, к 100 с температура устройства существенно возрастает, возникшая тяга приводит к заметному росту скорости газа в устройстве; к 200 с производительность составляет 90 % от номинальной; к 300 с расход газа и производительность практически не отличаются от номинальных. Исключением является температура на выходе, которая растет до 500 с. Этот факт имеет методическое значение: если стоит задача экспериментального определения температуры выхлопной струи рекомбинатора, то время испытания должно быть обоснованно продолжительным. Температура выхлопной струи важна для оценки теплового воздействия на стенки ГО и оборудование, имеющие ограничения по допустимой температуре эксплуатации. В целом время пуска одинаково оценивается источниками [3, 9, 11, 12] в рамках неопределенности данного термина, и эта оценка подтверждается нашими расчетами. В качестве консервативной оценки времени пуска следует использовать величину 300 с, когда производительность устройства практически равна номинальной.

Расчеты влияния начальной температуры, концентрации водорода, пониженного давления на время пуска приведены в табл. 1–3, характеристики рекомбинаторов отнесены к стационарным значениям.

Таблица 1

**Влияние начальной температуры на время пуска рекомбинатора**  
**The effect of the initial temperature on the start-up time of the recombiner**

Температура в герметичном ограждении, °С	Температура газа на выходе	Скорость газа на входе	Производительность	Время, с
125	0,60	0,87	0,89	250
	0,91	1,00	0,96	500
25	0,49	0,89	0,95	250
	0,98	0,99	1,00	500

Таблица 2

**Влияние начальной концентрации водорода на время пуска рекомбинатора****Effect of the initial hydrogen concentration on the start-up time of the recombiner**

Объемная концентрация водорода, %	Температура газа на выходе	Скорость газа на входе	Производительность	Время, с
4	0,49	0,89	0,95	250
	0,98	0,99	1,00	500
2	0,47	0,76	0,83	250
	0,75	0,93	0,98	500
	0,99	1,00	1,00	750

Таблица 3

**Влияние пониженного давления в герметичном ограждении****на время пуска рекомбинатора****Effect of reduced pressure in a sealed enclosure on the start-up time of the recombiner**

Давление, атм	Температура газа на выходе	Скорость газа на входе	Производительность	Время, с
1,0	0,49	0,89	0,95	250
	0,98	0,99	1,00	500
0,5	0,40	0,88	0,73	250
	0,73	1,00	0,85	500
	0,96	1,00	0,95	700

Согласно табл. 1, повышение температуры практически не влияет на запуск рекомбинатора с активным (неблокированным) катализатором. Наблюдаемые на практике ускорения запуска при высоких температурах [12] могут быть связаны с десорбцией мешающих запуску веществ (блокираторы). Повышение концентрации водорода в ГО ускоряет запуск (табл. 2), что соответствует данным [12]. Понижение давления в ГО замедляет запуск (табл. 3), что соответствует данным [16].

**ВЫВОД**

Проведен расчет времени пуска пассивного каталитического рекомбинатора водорода системы удаления водорода локализирующей системы безопасности энергоблока АЭС. В качестве конкретного рекомбинатора выбрано устройство с каталитическим блоком в форме эквидистантных параллельных пластин, покрытых платиновым катализатором, которыми могут оснащаться энергоблоки АЭС с ВВЭР. Расчетные и известные из научно-технической литературы данные совпадают удовлетворительно. В качестве консервативной оценки времени пуска рекомендуется использовать величину 300 с, так как к этому моменту производительность устройства практически равна номинальной. Повышение температуры почти не влияет на запуск рекомбинатора с активным (неблокированным) катализатором, повышение концентрации водорода ускоряет запуск, понижение давления его замедляет. Полученные результаты могут использоваться при обосновании безопасности АЭС с ВВЭР и экспертизе отчетов по обоснованию безопасности энергоблоков.

## ЛИТЕРАТУРА

1. 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>.
2. Проект АЭС-2006. Ленинградская АЭС-2 / ОАО «СПбАЭП». СПб.: Ин-т «Атомэнергопроект», 2009. 34 с.
3. AREVA Passive Autocatalytic Recombiner. G-008-V3-13-ENGPB. Erlangen: AREVA GmbH. 2013. 4 p.
4. State of the Art on Hydrogen Passive Autocatalytic Recombiner (European Union Parsoar Project) [Electronic Resource] / F. Arnould [et al.]. Mode of access: [https://inis.iaea.org/collecion/NCLCollectionStore/\\_Public/33/020/33020098.pdf](https://inis.iaea.org/collecion/NCLCollectionStore/_Public/33/020/33020098.pdf). Date of access: 09.02.2018.
5. Обеспечение водородной безопасности на атомных электростанциях с водоохлаждаемыми реакторными установками. Современное состояние проблемы / И. А. Кириллов [и др.] // Ядерная и радиационная безопасность. 2017. Вып. 84, № 2. С. 1–12.
6. Mitigation of Hydrogen Hazards in Water Cooled Power Reactors: IAEA-TECDOC-1196 / International Atomic Energy Agency. Vienna, 2001. 48 p.
7. Mitigation of Hydrogen Hazards in Severe Accidents in Nuclear Power Plants: IAEA-TECDOC-1661 / International Atomic Energy Agency. Vienna, 2011. 174 p.
8. Национальный доклад Республики Беларусь о целевой переоценке безопасности (стресс-тесты) Белорусской АЭС [Электронный ресурс]. Минск, 2017. Режим доступа: <https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/upload/iblock/88c/national-report-on-belarusian-npp-stress-tests.pdf>.
9. Investigation of a Hydrogen Mitigation System During Large Break Loss-Of-Coolant Accident for a Two-Loop Pressurized Water Reactor / M. Dehjourian [et al.] // Nuclear Engineering and Technology. 2016. Vol. 48, Iss. 5. P. 1174–1183. <https://doi.org/10.1016/j.net.2016.04.002>.
10. Reinecke, E.-A. Studies on Innovative Hydrogen Recombiners as Safety Devices in the Containments of Light Water Reactors / E.-A. Reinecke, I. M. Tragsdorf, K. Gierling // Nuclear Engineering and Design. 2004. Vol. 230, Iss. 1–3. P. 49–59. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2003.10.009>.
11. Rozeń, A. Simulation of Start-Up Behaviour of a Passive Autocatalytic Hydrogen Recombiner / A. Rozeń // Nukleonika. 2018. Vol. 63, Iss. 2. P. 27–41. <https://doi.org/10.2478/nuka-2018-0004>.
12. Пассивные каталитические рекомбинаторы водорода PBK-500, PBK-1000. Технические условия: РЭТ-111.00.000 ТУ. Москва, 2007.
13. Ensuring the Long-Term Functionality of Passive Autocatalytic Recombiners under Operational Containment Atmosphere Conditions – an Interdisciplinary Investigation / S. Kelm [et al.] // Nuclear Engineering and Design. Vol. 239, Iss. 2. P. 274–280. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2008.10.029>.
14. 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, Iss. 1. P. 26–32. <http://doi.org/10.1016/j.net.2014.12.001>.
15. 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>.
16. Operational Behavior of a Passive Auto-Catalytic Recombiner under Low Pressure Conditions / P.-M. Steffen [et al.] // Fusion Engineering and Design. 2017. Vol. 124. P. 1281–1286. <http://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.02.019>.
17. Кириллов, П. Л. Теплофизические свойства материалов ядерной техники / П. Л. Кириллов, М. И. Терентьева, Н. Б. Денискина. М.: ИздАт, 2007. 200 с.
18. Маркус, Т. А. Здания, климат, энергия / Т. А. Маркус, Э. Н. Моррис. Л.: Гидромет, 1985. 543 с.
19. Сорокин, В. В. Анализ производительности пассивного каталитического рекомбинатора водорода с учетом условий внутри герметичного ограждения локализующей 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>.

Поступила 14.07.2021 Подписана в печать 21.09.2021 Опубликована онлайн 31.01.2022



## REFERENCES

1. 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).
2. “SPb Atomenergoproekt” JSC (2009) *NPP-2006 Project. Leningrad NPP-2*. St. Petersburg, Atomenergoproekt Instiute. 34 (in Russian).
3. *AREVA Passive Autocatalytic Recombiner* (2013) G-008-V3-13-ENGPB. Erlangen: AREVA GmbH. 4.
4. Arnould F., Bachellerie E., Auglaire M., De Boeck B., Braillard O., Eckardt B., Ferroni F., Moffett R., Van Goethem G. (2001) *State of the Art on Hydrogen Passive Autocatalytic Recombiner (European Union Parsoar Project)*. Available at: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/33/020/33020098.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/33/020/33020098.pdf) (Accessed 9 February 2018).
5. Kirillov I., Kharitonova N., Sharafutdinov R., Krenniikov N. (2017) Hydrogen Safety for Nuclear Power Plants with Light Water Reactor Units. Current State of the Problem. *Yadernaya i Radiatsionnaya Bezopasnost' = Nuclear and Radiation Safety Journal*, 84 (2), 1–12 (in Russian).
6. International Atomic Energy Agency (2001). *Mitigation of Hydrogen Hazards in Water Cooled Power Reactors: IAEA-TECDOC-1196*. Vienna, 2001. 48.
7. International Atomic Energy Agency (2011). *Mitigation of Hydrogen Hazards in Severe Accidents in Nuclear Power Plants: IAEA-TECDOC-1661*. Vienna, 2011. 174.
8. *National Stress-Test Report of the Republic of Belarus on Belarusskaya NPP Targeted Safety Reassessment* (2016). Minsk. Available at: [https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/upload/iblock/88c/national-report-on-belarusian-npp-stress\\_tests.pdf](https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/upload/iblock/88c/national-report-on-belarusian-npp-stress_tests.pdf) (in Russian).
9. Dehjourian M., Sayareh R., Rahgoshay M., Jahanfarnia G., Shirani A. S. (2016) Investigation of a Hydrogen Mitigation System During Large Break Loss-Of-Coolant Accident for a Two-Loop Pressurized Water Reactor. *Nuclear Engineering and Technology*, 48 (5), 1174–1183. <https://doi.org/10.1016/j.net.2016.04.002>.
10. Reinecke E.-A., Tragsdorf I. M., Gierling K. (2004) Studies on Innovative Hydrogen Recombiners as Safety Devices in the Containments of Light Water Reactors. *Nuclear Engineering and Design*, 230 (1–3), 49–59. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2003.10.009>.
11. Rozeń A. (2018) Simulation of Start-Up Behaviour of a Passive Autocatalytic Hydrogen Recombiner. *Nukleonika*, 63 (2), 27–41. <https://doi.org/10.2478/nuka-2018-0004>.
12. Technical Specifications: RET-111.00.000 TU. *Passive Hydrogen Catalytic Recombiners RVK-500, RVK-1000*. Moscow, 2007 (in Russian).
13. Kelm S., Schoppe L., Dornseiffer J., Hofmann D., Reinecke E.-A., Leistner F., Jühe S. (2009) Ensuring the Long-Term Functionality of Passive Autocatalytic Recombiners under Operational Containment Atmosphere Conditions – an Interdisciplinary Investigation. *Nuclear Engineering and Design*, 239 (2), 274–280. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2008.10.029>.
14. 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. <http://doi.org/10.1016/j.net.2014.12.001>.
15. Vorob'ev V. A., Nemtsev V. A., Sorokin V. 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).
16. Steffen P.-M., Reinecke E.-A., Meynet N., Bentaib A., Chaumeix N., Allelein H.-J. (2017) Operational Behavior of a Passive Auto-Catalytic Recombiner under Low Pressure Conditions. *Fusion Engineering and Design*, 124, 1281–1286. <http://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.02.019>.
17. Kirillov P. L., Terentjeva M. I., Deniskina N. B. (2007) *Thermo Physical Properties of Materials of Nuclear Power Technology*. Moscow, Izdat Publ. 200 (in Russian).
18. Markus T. A., Morris E. N. (1980) *Buildings, Climate and Energy*. London, Pitman Publ. 540.
19. 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. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (2), 178–186. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-2-178-186> (in Russian).