

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

УДК 621.311.25:621.039
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-496-505>

Поступила в редакцию 15.04.2020
Received 15.04.2020

В. В. Сорокин

*Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны, Национальной академии наук
Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

**РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ПАССИВНОГО КАТАЛИТИЧЕСКОГО РЕКОМБИНАТОРА
ВОДОРОДА В УСЛОВИЯХ АВАРИИ НА АЭС-2006**

Аннотация. Выполнен расчет параметров работы системы удаления водорода в условиях тяжелой аварии на АЭС-2006. Система включает пассивные автокаталитические рекомбинаторы водорода, которые превращают водород в воду в ходе реакции с кислородом воздуха на катализаторе и обеспечивают подвод реагентов и отвод продуктов за счет естественной конвекции. Разработана расчетная модель рекомбинатора с блоком катализатора (основной материал катализатора – платина с долей палладия) в форме пластин. Два свободных параметра модели – скорость реакции на катализаторе и гидравлическое сопротивление – устанавливаются на основе экспериментальных данных. Определены характеристики пассивного каталитического рекомбинатора водорода в условиях аварии. Производительность устройства в условиях аварии соответствует заявленной производителем. Температура катализатора, даже средняя по поверхности, выше 500 °С, температура выхлопной струи превышает 150 °С, содержание водорода в выхлопной струе значительно. Производительность рекомбинатора водорода линейно увеличивается с ростом объемного содержания водорода в газовой смеси, поступающей в устройство. Суммарная производительность рекомбинаторов водорода в составе локализующей системы безопасности постоянна в условиях как равномерной, так и неравномерной концентрации водорода под герметичным ограждением. Влияние температуры атмосферы на производительность незначительно. Данные расчетов могут использоваться для оценки работы рекомбинаторов водорода при аварии на АЭС-2006.

Ключевые слова: АЭС, ВВЭР, тяжелые аварии, водородная безопасность, локализующая система безопасности, система удаления водорода, каталитические рекомбинаторы, пластинчатые каталитические элементы, производительность, расчеты

Для цитирования: Сорокин, В. В. Расчет характеристик пассивного каталитического рекомбинатора водорода в условиях аварии на АЭС-2006 / В. В. Сорокин // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, №4. – С. 496–505. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-496-505>

Vladimir V. Sorokin

Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

**PASSIVE AUTOCATALYTIC RECOMBINER CHARACTERISTICS CALCULATION DURING SEVERE
ACCIDENT ON AES-2006 NPP**

Abstract. A modern NPP is equipped by containment to hold radioactive substances and ionizing radiation bounded as design margins prescribe. Hydrogen mitigation system is used to protect containment against hydrogen fire and detonation. The system includes a scope of passive autocatalytic recombiners. Hydrogen is transformed into water, passing through said recombiners. The reaction occurs on catalyst surface. The main catalyst material is a palladium doped platinum. Hydrogen mitigation system parameters during severe accident are of interest. Wise admitted for NPP full scale tests are impossible, so the main analysis are calculations. Recombiner consists of catalytic block and stuck. The stuck provides reagents feeding and products evacuation enhancing natural convection transport. A model for calculations is suggested for recombinder with a plate-type catalyst block. The two free parameters of the model are chemical reaction intensity on catalyst and unit drag. Said parameters are estimated experimental data based on. Passive autocatalytic recombinder characteristics during severe accident on AES-2006 NPP are calculated. The unit capacity is found not less that specification points. Catalyst temperatures, even the mean one, are above 500 °С, exhaust jet temperature exceeds 150 °С. Hydrogen content is high in the jet. Capacity

increases linearly with hydrogen concentration at the unit entrance. Atmospheric temperature influence is low. Hydrogen mitigation system overall capacity is constant for uniform or not uniform hydrogen distribution in the containment. The calculated data may be used for recombiner work estimation during accident on AES-2006 NPP.

Keywords: NPP, WWER, severe accidents, hydrogen mitigation system, containment, passive autocatalytic recombiner, plate-type catalytic elements, capacity, calculations

For citation: Sorokin V. V. Passive autocatalytic recombiner characteristics calculation during severe accident on AES-2006 NPP. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 4, pp. 496–505 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-496-505>

Введение. На современной атомной электростанции предусмотрена локализирующая система безопасности для удержания при аварии радиоактивных веществ и ионизирующего излучения в установленных проектом границах. Границу системы образует герметичное ограждение (ГО). Для защиты ГО от разрушения и поддержания его работоспособности необходимо решить проблему, связанную с выходом и накоплением водорода под ограждением при тяжелой аварии. Масса водорода может превышать 1 т, а концентрация и объем достаточны для горения или детонации [1]. При поджигании водорода сопутствующие эффекты роста давления и температуры способны разрушить ограждение.

На АЭС-2006 с ВВЭР-1200 по сравнению с другими ВВЭР опасность потенциально выше вследствие большой массы и значительной степени выгорания топлива в активной зоне. В проекте «АЭС-2006» предусматривается система удаления водорода, включающая пассивные автокаталитические рекомбинаторы водорода. Пассивный принцип действия, а также независимость функциональных элементов системы от других систем энергоблока и друг от друга обеспечивают ей высокую степень надежности ([2]; AREVA Passive Autocatalytic Recombiner. AREVA GmbH, 2013. G-008-V3-13-ENGPB). Обоснование водородной безопасности излагается оператором блока АЭС в отчете по обоснованию безопасности (ООБ).

Как правило, при проектной работе рекомбинаторов опасные концентрации водорода не достигаются. При экспертизе ООБ и в ходе проверки перед выдачей лицензии на эксплуатацию возникает вопрос о достоверности соответствия параметров работы системы удаления водорода проектным значениям в условиях тяжелой аварии. Принятые в атомной энергетике полномасштабные экспериментальные и натурные испытания системы в таких условиях невозможны, основная часть анализа приходится на расчетные исследования.

В поддержку расчетных исследований реализуется ряд экспериментальных программ. После аварии на АЭС «Фукусима-1» в марте 2011 г. усилился интерес к изучению рекомбинаторов и процесса сжигания водорода на атомных электростанциях [3]. В Европе подобные исследования активно велись и до этого, например в рамках Severe Accident NETwork (SARNET). Улучшение понимания процессов, происходящих внутри рекомбинатора, остается вызовом для исследователей. Важные экспериментальные данные получены на установке REKO в Юлихском исследовательском центре (Forschungszentrum Jülich GmbH, Германия). REKO-3 представляет серию испытаний отдельных каталитических пластин в условиях вынужденной конвекции. В ходе испытаний определены температуры газа и катализатора при разных составах и скоростях атмосферы для катализаторов четырех типов. REKO-4 представляет испытания в условиях естественной конвекции.

В 2007 г. под руководством Агентства по ядерной энергии (OECD Nuclear Energy Agency) при поддержке семи европейских стран-партнеров, а также Канады и Республики Корея на установке OECD-THAI (Thermal-hydraulics, Hydrogen, Aerosols, Iodine) началось исследование, в рамках которого изучается взаимодействие рекомбинатора с атмосферой большого замкнутого объема в присутствии пара, при нехватке кислорода, при разных абсолютных давлениях, при наличии продуктов деления, включая воздействие на продукты деления.

Продолжается анализ технических аспектов развития аварийного процесса на АЭС «Фукусима-1» [4, 5]. Осуществляется международный проект BSAF (Benchmark Study of the Accidents at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant), действует международная группа экспертов ОЭСР (Senior Expert Group on Safety Research Opportunities post-Fukushima (SAREF)). Ведутся исследования, нацеленные на устранение выявленных проблем водородной безопасности ([6]; Документация по запросу предложений на НИОКР по реализации мероприятий обеспечения

водородной взрывобезопасности и управлению тяжелыми авариями на АЭС с ВВЭР в рамках устранения замечаний Ростехнадзора, см.: <https://zakupki.kontur.ru/31705778561>).

Для оценки водородной безопасности АЭС устанавливается производительность рекомбинатора, определяются его температурные характеристики в предполагаемых условиях аварии. Эти данные, необходимые для анализа безопасности, в литературе обычно не приводятся. *Цель настоящего исследования* заключалась в разработке простой и действенной расчетной модели для определения характеристик пассивного каталитического рекомбинатора водорода в условиях аварии на АЭС-2006.

Особенности горения и детонации водорода. Смеси водорода и воздуха воспламеняются в диапазоне концентраций водорода 4–75 об.% и детонируют при 18,3–74 об.% [7]. Энергия зажигания, необходимая для воспламенения, составляет величину $E = 19 \cdot 10^{-6}$ Дж (для углеводорода $E = 280 \cdot 10^{-6}$ Дж). Энергия, инициирующая реакцию водорода с кислородом, настолько мала, что воспламенение может произойти даже за счет заряда электростатического электричества, накопившегося на одежде. Подожженный водород горит невидимым спокойным пламенем при температуре 2200 К, пламя распространяется со скоростью 2,7 м/с. Интенсивность теплового излучения водородного пламени почти на порядок меньше, чем при горении углеводородов. Для стехиометрических смесей водорода с воздухом тротиловый эквивалент составляет 10,6 кг на 1 кг H_2 (для метана – 4,8 кг). Детонация водорода, приводящая к разрушению ГО, возможна при минимальной массе водорода 22,8 кг [8].

Устройство рекомбинатора водорода. В большинстве стран, в том числе в Беларуси и России, принято и реализуется решение об оснащении действующих и строящихся АЭС системами удаления водорода при авариях ([9]; Техническое задание на закупку системы аварийного удаления водорода из ГО РУ для энергоблоков №3 и №4 Нововоронежской АЭС. Утв. 04.07.2013. Нововоронеж: НВАЭС, 2013. 10 с.). Основу системы составляют рекомбинаторы. Рекомбинатор состоит из корпуса и кассеты. Кассета содержит каталитические элементы, установленные с образованием каналов для прохода газообразной среды. Катализатор наносится в форме покрытия на поверхности элементов. При контакте с катализатором происходит химическая реакция соединения водорода и кислорода, сопровождающаяся выделением тепла. Возникает устойчивый конвективный поток, который обеспечивает непрерывное поступление газовой смеси к катализатору и отвод пара через перфорацию, выполненную в верхней части корпуса. В результате концентрация водорода в ГО снижается. Рекомбинаторы должны включиться в работу только в случае аварии на блоке АЭС и надежно отработать в ГО от ста до нескольких сотен часов. Состояние ожидания в готовности устройств длится десятки лет. Работоспособность рекомбинаторов в условиях аварий гарантирована их устойчивостью к воздействию высоких температур, агрессивных сред, ударных нагрузок, высоких уровней радиации. Исходя из этого формулируются необходимые требования к системам водородной безопасности: термостабильность, термостойкость, коррозионная и радиационная стойкость, механическая прочность, регенерируемость.

Известны несколько типов катализатора, которые применяются в рекомбинаторах.

Зернистый катализатор. В катализаторе, описанном в [10], засыпка алюминиевых таблеток диаметром 4 и 6 мм размещена в кассете размером 45 × 20 см с проницаемой стенкой. Поверхность таблеток покрыта палладием на глубину до 0,5 мм и гидрофобизирована. 88 кассет расположены с образованием щелей шириной 1 см для прохода газа. Также известны зернистый катализатор с частицами из керамики [11]; катализатор, нанесенный на стержни из оксида алюминия диаметром 5,8 мм [12]. Стержни последнего размещены в трубках диаметром 20 мм, которые собраны в пакет с треугольной компоновкой и образуют блок катализатора. Такая конструкция обеспечивает повышение производительности за счет интенсификации конвективных движений от нагретой поверхности.

Катализатор на носителе в форме пластин. Пример использования в устройстве рекомбинатора водорода данного типа катализатора приведен на рис. 1. Кассета 2, состоящая из пластин, размещена в нижней части корпуса 1. Газовая смесь через входное отверстие и кассету 2 попадает внутрь корпуса 1 и выходит в котайнмент через выходное отверстие 4. Рекомбинация идет на поверхности пластин 5 кассеты 2. За счет высоты корпуса рекомбинатора, значительно превышающей длину пластин, развивается дополнительная тяга и интенсифицируется подвод и преобразование состава газовой смеси в устройстве. Для обслуживания кассета извлекается из корпуса.

Периодически активность катализатора проверяется и восстанавливается путем отжига. Температура отжига ограничена термостойкостью гидрофобного покрытия.

Количество гетерогенного катализатора пропорционально площади поверхности, на которой он размещен. Поэтому обычно поверхность пластины покрывают высокопористой основой, на которую наносят каталитическое покрытие. Материал основы должен быть прочным, работоспособным при высоких температурах, технологичным и недорогим, желателен влагостойким и иметь показатель доступной площади пор на уровне порядка 200 м²/г. Такими свойствами обладает гамма-форма оксида алюминия.

Толщина каталитического покрытия, состоящего из субстрата платины (Pt/Pd), имеет субмикронный порядок. Плотность покрытия платиной составляет 5 г на 1 м² пластины (Passive Autocatalytic Recombiner, см.: www.us.aveva.com). Технология изготовления включает в себя следующие этапы: термообработка алюмосодержащего сырья до формирования высокопористого оксида, пропитка его соединениями платины, обжиг до выпадения частиц металла на поверхности пор. Такой катализатор использовать неудобно, поскольку оксид алюминия адсорбирует воду (даже из практически сухого воздуха). Вода занимает часть поверхности, доступ реагентов к катализатору затрудняется. Типичное соотношение масс: 10 г воды на 100 г оксида (адсорбент гамма-оксид алюминия модифицированный, см.: <http://eksytech.ru/adsorbent-gamma-oksidi-aluminiya.html>). В рабочем процессе катализатор нагрет и продувается реагентами, влияние воды может быть незаметно. При пуске из холодного состояния влажного катализатора потребуется дополнительное время, пока вода испарится и производительность достигнет номинального уровня.

Для адаптации к работе во влажных условиях применяется гидрофобизация катализатора. Например, осуществляется продувка катализатора фторсодержащим углеводородом-мономером с последующим формированием полимерного покрытия на поверхности. В результате влагоемкость снижается до 5 г воды на 100 г оксида (аторское свидетельство 1780828 СССР, МПК5 В 01 J 23/42, 34/37 «Катализатор для дожигания водорода и способ его получения», авторы – В.Н. Новгородов, М.В. Шмыгова, Н.Б. Коваленко, В.А. Жеребцов).

Расчет элементарной ячейки рекомбинатора водорода. В составе рекомбинатора (см. рис. 1) выделим элементарную ячейку (рис. 2), которая представляет собой щелевой канал, ограниченный стенками. Стенки образованы пластинами с каталитическим покрытием.

На рис. 2 используются следующие обозначения: δ – расстояние между пластинами, 10 мм; L – длина пластин, 140 мм; T_w – местная температура стенки пластины; T – местная температура газа; T_0 и T_L – температура среды соответственно на входе и на выходе; V – скорость среды; g – ускорение свободного падения, 9,8 м/с². Размеры канала приняты по [22].

Течение носит ламинарный характер, пограничные слои смыкаются на половине длины ячейки. Эквивалентный диаметр щели $D = 2\delta$.

Число Рэлея определяется согласно выражению $Ra = gL^3\beta\langle\Delta T\rangle/\nu\alpha$. Здесь: $\langle\Delta T\rangle = \langle T_w \rangle - T_0$, где $\langle T_w \rangle$ – средняя температура стенки;

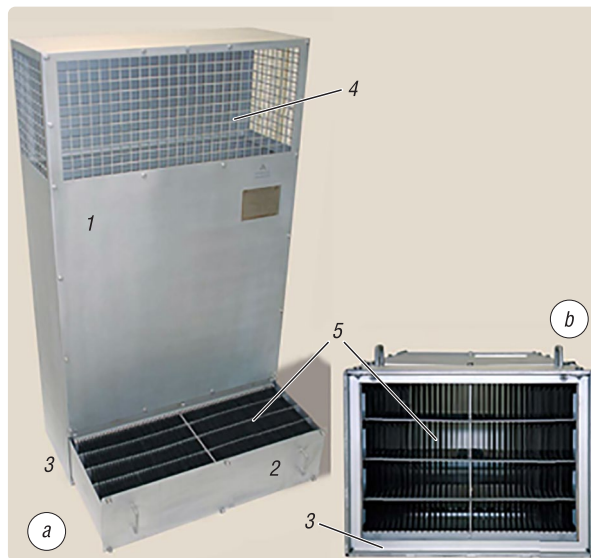


Рис. 1. Устройство рекомбинатора водорода [16]: 1 – корпус, 2 – кассета, 3 – входное отверстие, 4 – выходное отверстие, 5 – пластины; а – вид сбоку, кассета выдвинута для обслуживания пластин; б – вид снизу, кассета в рабочем положении

Fig. 1. Passive autocatalytic recombiner design [16]: 1 – vessel, 2 – cassette, 3 – inlet window, 4 – outlet window, 5 – catalytic plates; a – side view, cassette is moved out to serve plates; b – bottom view, cassette is ready to work

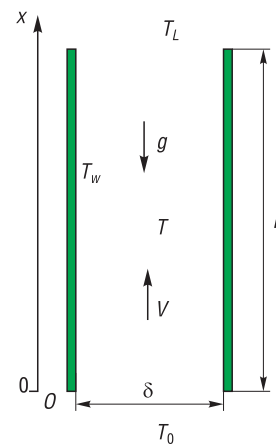


Рис. 2. Элементарная ячейка

Fig. 2. Elementary catalytic cell

β – коэффициент объемного расширения; a – температуропроводность; ν – кинематическая вязкость среды. При $Ra/X > 1,5 \cdot 10^4$, $X = L/D$ коэффициент теплоотдачи α составит [19]

$$\alpha/\alpha(Ra = 0) \approx 0,17(Ra/X)^{0,18}. \quad (1)$$

$Nu(Ra = 0) = 8,24$; $\alpha(Ra = 0) = \lambda Nu(Ra = 0)/D$, λ – теплопроводность среды. Параметры атмосферы выбираются при температуре $T_{cp} = (\langle T_w \rangle + T_0)/2$.

Источником поддержания температуры пластин выступает каталитическое превращение водорода в водяной пар. Водород поступает на стенку за счет диффузии из потока среды. Далее следуют адсорбция, поверхностная диффузия, реакция и десорбция, диффузия продуктов реакции в поток. Кинетические характеристики процессов приведены, например, в [14]. Поскольку до появления водорода пластина находится в контакте с воздухом, платиновые структуры оказываются предварительно насыщенными кислородом.

Платина хорошо адсорбирует водород. Энергия адсорбции двух атомов водорода на платине близка к энергии связи водород–водород, поэтому реакция $H_2 \leftrightarrow 2H_{ад}$ протекает относительно легко. Адсорбированные на платине атомы окисляются с большой скоростью [15].

В атмосфере герметичной оболочки наиболее вероятный состав газов – это бедная водородно-кислородная смесь с большим количеством разбавителей, в основном азота и водяного пара. В таких условиях реакция превращения водорода в воду имеет первый порядок по водороду и мало зависит от присутствия других веществ [14, 16–20].

Скорость реакции r_{H_2} на поверхности, $кг/(м^2 \cdot с)$ задается выражением

$$r_{H_2} = 5,56 \cdot 10^{-3} (T_w)^{1/2} C_{H_2}, \quad (2)$$

где C_{H_2} – концентрация водорода, $кг/м^3$. В качестве концентрации водорода выбирается местная средняя по сечению щели величина.

Константа поверхностной реакции K_s , $м/с$, связана с r_{H_2} выражением $r_{H_2} = K_s C_{H_2}$. Форма $K_s \sim (T_w)^{1/2}$ предлагалась в [21]. Коэффициент перед формой определяется по данным [22]. Уравнение $r_{H_2} = 14 \exp[-14,9 \cdot 10^3 / (RT_w)] C_{H_2}$, в котором R – универсальная газовая постоянная, $R = 8,3$ Дж/(моль · К), рекомендовано для расчетов в [23]. По нашему мнению, выражение переоценивает наблюдаемое влияние температуры на скорость реакции по сравнению с экспериментальными данными [22], полученными в лабораторном щелевом канале.

Будем представлять рабочую среду ячейки рекомбинатора водорода как смесь водорода с воздухом. Коэффициент диффузии водорода в воздухе D определяется формулой $D = D_i (T/T_i)^2 (p_i/p)$, где $D_i = 7,4 \cdot 10^{-5}$ $м^2/с$ при $T_i = 300$ К и $p_i = 0,1$ МПа, T и p – соответственно температура и давление среды. Далее в расчетах в качестве T берется местная средняя по сечению температура газа в щели.

В силу подобия процессов тепло- и массоотдачи в ячейке можно принять $Nu = Sh (K_s = \infty)$, где Sh – число Шервуда, $Sh = \alpha_M D/D$; α_M – коэффициент массоотдачи пластины. Запишем выражение для реакции первого порядка [24]

$$Sh = 1/[1/k_s + 1/Sh(K_s = \infty)], \quad (3)$$

где k_s – безразмерная скорость реакции, $k_s = K_s D/D$. Эффект реакции сводится к дополнительному сопротивлению диффузионному переносу массы. Поток массы водорода на пластину q_M задает тепловой поток от пластины к газу в щели q_T , связанный с местной температурой стенки T_w :

$$hq_M = h (DSh/D) C_{H_2} = q_T = \alpha (T_w - T), \quad (4)$$

где h – теплота горения водорода, $h = 121$ МДж/кг; T – местная средняя по сечению температура газа в щели.

Система уравнений (1)–(4) замкнута. Концентрация водорода массовая C_{H_2} , $кг/м^3$, связана с объемной концентрацией водорода ε , об.%, формулой $C_{H_2} = 2\varepsilon\rho/29(1-\varepsilon)$, в которой ρ – плотность воздуха; коэффициент объемного расширения $\beta = 1/(T_{cp} + 273)$, $К^{-1}$; $\Delta T = T_w - T_0$; коэффициент массоотдачи пластины $\alpha_M = D(1/Nu + 1/k_s)/D$; $T_w = T_0 + hC(\alpha_M/\alpha)$.

В ходе расчета ячейки выбирается шаг по длине пластины $dx \ll L$, вычисляются приращения на шаге $dC_{H_2} = -(\alpha_d C_{H_2}/V)(dx/D)$, $dT = -(h/c_p \rho) dC_{H_2}$, по приращениям dC_{H_2} и dT определяется убыль концентрации водорода и возрастание температуры по ходу течения среды.

Результаты расчетов для смеси воздуха и водорода при $T_0 = 25\text{ }^\circ\text{C}$, $p = 0,1\text{ МПа}$ и $V = 0,8\text{ м/с}$ представлены на рис. 3 и 4.

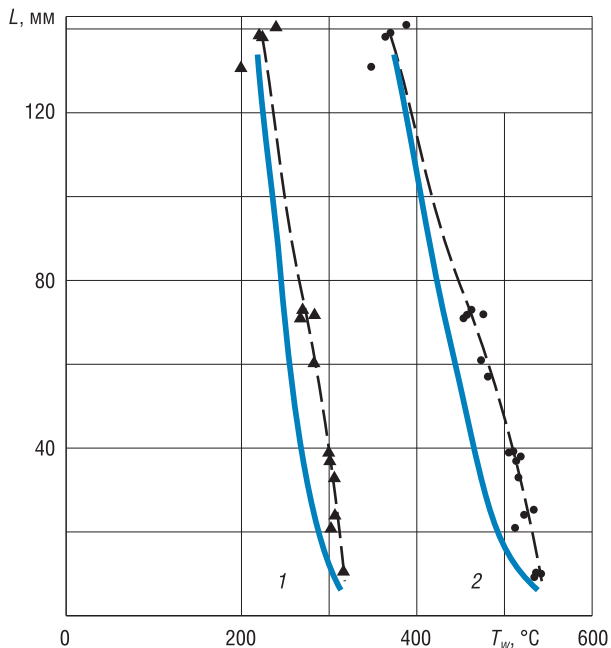


Рис. 3. Изменение температуры катализатора по длине канала: концентрация водорода: 1 – 2 об.%, 2 – 4 об.%; сплошная линия – расчет, пунктирная – эксперимент [22]

Fig. 3. Catalyst temperature variation vs channel length: hydrogen concentration: 1 – 2 vol.%, 2 – 4 vol.%; solid line – calculations, dashed – experiment [22]

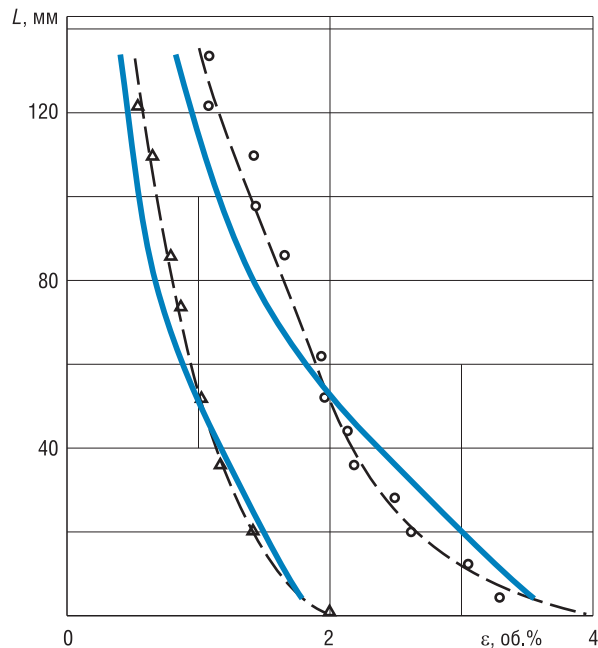


Рис. 4. Изменение концентрация водорода по длине канала: сплошная линия – расчет, пунктирная – эксперимент [22]

Fig. 4. Hydrogen concentration vs channel length: solid line – calculations, dashed – experiment [22]

Расчеты нескольких рабочих режимов для лабораторного канала представлены в табл. 1, где ϵ_L/ϵ_0 – относительная концентрация водорода на выходе («недожег»), Nu/k_s – отношение сопротивлений диффузионного к дополнительному, связанному с конечностью скорости реакции на катализаторе, p_0 – давление в контейнменте, ϵ_0 , ϵ_L – концентрация водорода на входе и выходе соответственно, T_w^{\max} – максимальная температура катализатора.

Расчет рекомбинатора водорода. Определим характеристики пассивного каталитического рекомбинатора водорода для устройства FR90/1-1500 (AREVA).

В отличие от экспериментов, где скорость газа является заданной, в рекомбинаторе водорода скорость устанавливается балансом подъемной силы тягового участка $(\rho_{\text{вход}} - \rho_{\text{выход}})gH$ и сопротивления устройства $\zeta \rho_{\text{выход}} (W_{\text{выход}})^2/2$, где H – высота тягового участка, ζ – коэффициент гидравлического сопротивления.

Из описания рекомбинатора FR90/1-1500 (AREVA Passive Autocatalytic Recombiner. AREVA GmbH, 2013. G-008-V3-13-ENGPB) известно, что его производительность при концентрации водорода в воздухе 4 об. % и давлении 0,15 МПа составляет 5,36 кг/ч. Предположив, что начальная температура при определении производительности составляла 25 °С, с использованием рассчитанных температур и скоростей вычислим $\zeta = 2,88$ (в дальнейшем принимается $\zeta = 3$). Высота тягового участка определена величиной 0,6 м как расстояние от верха пластин с катализатором до низа фронтального выхлопного окна. Скорость $W_{\text{выход}}$ подбирается по условию баланса с учетом температуры на выходе из элементарных ячеек.

Т а б л и ц а 1. Расчеты лабораторного канала
T a b l e 1. Laboratory channel parameters calculated

p_0 , МПа	T_0 , °С	$\langle T_w \rangle$, °С	T_w^{\max} , °С	ϵ_0 , об. %	ϵ_L/ϵ_0	Nu/k_s
0,1	25	430	526	4	0,17	1,31–1,45
0,1	125	464	480	2	0,11	1,77–1,80
0,15	25	589	838	4	0,22	0,94–1,17
0,3	25	920	1320	4	0,35	0,59–0,77
0,3	125	876	1270	4	0,25	0,61–0,79
0,3	125	658	978	2	0,27	0,52–0,68

Т а б л и ц а 2. **Расчеты рабочих режимов рекомбинатора при $p_0 = 0,3$ МПа, $T_0 = 125$ °С**

Т а б л и ц а 2. **Recombiner working parameters, calculated at $p_0 = 0.3$ МПа, $T_0 = 125$ °С**

Характеристика	Значение	
	при $\varepsilon_0 = 2$ об.%	при $\varepsilon_0 = 4$ об.%
V , м/с	0,83	0,95
$\varepsilon_L/\varepsilon_0$	0,28	0,31
$\langle T_w \rangle$, °С	662	890
T_w^{\max} , °С	971	1224
T_L , °С	241	350
G , кг/ч	3,51	7,68
Nu/k_s	0,53–0,68	0,61–0,79

Производительность рекомбинатора равна сумме производительностей ячеек. Скорость на входе в рекомбинатор согласно расчету составляет 1 м/с, температура катализатора средняя – 606 °С, максимальная – 811 °С, содержание водорода в выхлопной струе 1,22 об.%.
Предложенная модель выгодно отличается от известных [3, 14, 16–19, 22] построенных на базе CFD расчетов простотой и быстродействием, позволяет проводить независимые расчетные оценки.

Значения температуры и давления не характерны для аварий с течами теплоносителя и плавлением активной зоны реактора, более вероятные рабочие режимы рекомбинатора рассчитаны и приведены в табл. 2, G – производительность нейтрализации водорода.

Согласно табл. 2, производительность устройства не меньше заявленной в «AREVA Passive Autocatalytic Recombiner» (AREVA GmbH, 2013. G-008-V3-13-ENGPB).

Согласно табл. 2, производительность устройства не меньше заявленной в «AREVA Passive Autocatalytic Recombiner» (AREVA GmbH, 2013. G-008-V3-13-ENGPB).

Температуры катализатора, даже средние, выше 500 °С, в выхлопной струе значительно содержание водорода, температура струи T_L более 150 °С.

На рис. 5 приведены зависимости производительности рекомбинатора от объемной доли водорода в атмосфере герметичной оболочки для характерных наборов параметров атмосферы при тяжелой аварии. Видно, что производительность рекомбинатора линейно зависит от объемной концентрации водорода, влияние температуры атмосферы слабое.

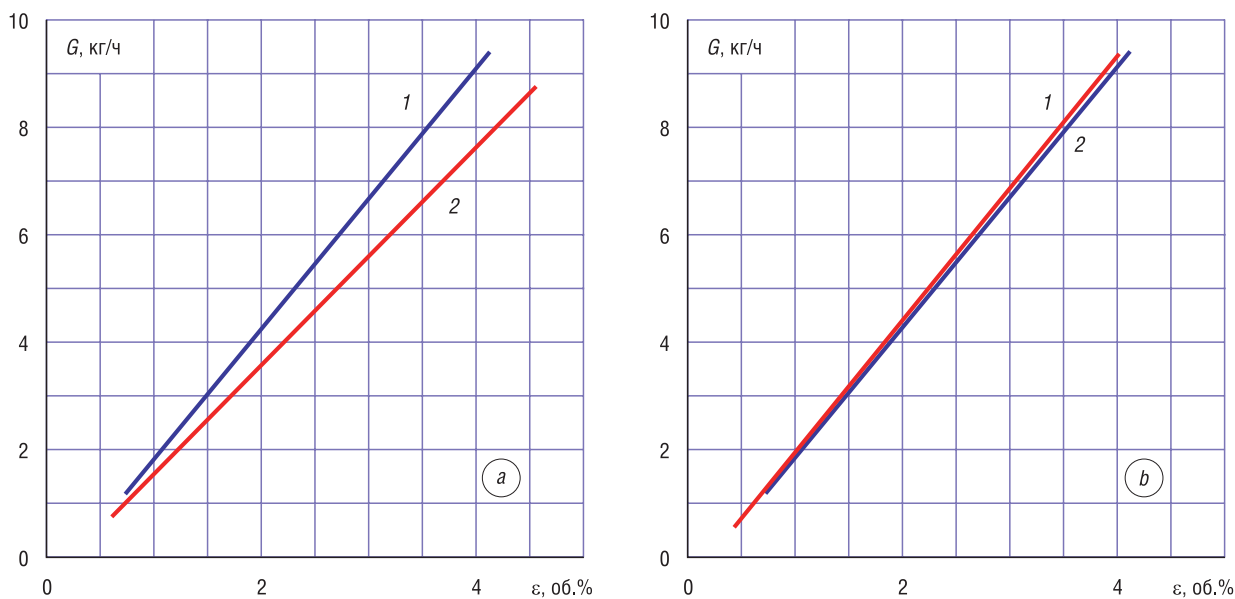


Рис. 5. Зависимость производительности рекомбинатора от объемной доли водорода в атмосфере герметичной оболочки: 1 – давление 0,4 МПа, температура 140 °С; 2 – 0,3 МПа, 125 °С (а) и 0,4 МПа, 120 °С (б)

Fig. 5. Recombiner capacity vs hydrogen concentration in the containment atmosphere: 1 – pressure 0.4 МПа, temperature 140 °С; 2 – 0.3 МПа, 125 °С (а), and 0.4 МПа, 120 °С (б)

Влияние размещения рекомбинаторов водорода внутри герметичного ограждения на их суммарную производительность. Известна проблема оптимальной расстановки рекомбинаторов при проектировании ВВЭР, для которой еще не предложено решение [6]. Как следует расположить устройства в герметичном объеме, чтобы достичь максимальной производительности? В составе атмосферы ГО локализирующей системы водород может быть распределен неравномерно ([6, 25]; Проектирование систем защитной оболочки реактора для атомных станций. Руководства № NS – G – 1.10. Вена: МАГАТЭ, 2008; European Utility Requirements for LWR Nuclear

Power Plants. Vol. 2: Generic Nuclear Island Requirements. Ch. 9: Containment System. Revision C. April, 2001). Рекомбинатор должен быть установлен в месте, где находится достаточное количество водорода [6, 26]. Расчет показывает хаотичное распределение водорода по ГО, причем случаи распределения водорода при течи, расположенной сверху, существенно отличаются от течей боковой локализации [26]. В боксе, где находится течь, производительность рекомбинатора может быть существенно выше, чем под куполом ГО или в соседнем боксе, где течи нет.

Рекомбинаторы размещаются до аварии, причем эффективность работы каждого из них зависит не только от конкретного типа аварии, но и варианта ее конкретной реализации. Например, при малой течи и обесточивании важно, где именно произошла течь. Равномерности распределения водорода способствует действие спринклерной системы (Проектирование систем защитной оболочки реактора для атомных станций. Руководства № NS – G – 1.10; European Utility Requirements for LWR Nuclear Power Plants. Vol. 2: Generic Nuclear Island Requirements. Ch. 9: Containment System. Revision C. April, 2001; [27–30]). Данную систему включают в ходе аварии при начале повреждения активной зоны для повышения концентрации пара и инертизации состава атмосферы. В это же время ожидается начало первого пика выхода водорода.

Для рекомбинаторов с линейной рабочей характеристикой $G(\epsilon)$, как в нашем случае, все установки оказываются равнозначными, поскольку производительность всех устройств при равномерной концентрации водорода будет совпадать с таковой при неравномерной при условии равенства концентраций в среднем по объему. Последнее условие обеспечивается плотностью герметичного ограждения.

Заключение. Рассчитаны характеристики пассивного каталитического рекомбинатора водорода в условиях аварии на АЭС-2006. Производительность устройства в условиях аварии не меньше заявленной производителем. Температура катализатора, в том числе средняя по поверхности, выше 500 °С, температура выхлопной струи превышает 150 °С, в выхлопной струе значительно содержание водорода.

Разработанная автором расчетная модель рекомбинатора отличается простотой и быстродействием, позволяет проводить независимые расчетные оценки на любом персональном компьютере без использования коммерческого CFD программного обеспечения.

Данные расчетов могут использоваться для оценки работы рекомбинаторов водорода при аварии на АЭС-2006.

Список использованных источников

1. Обеспечение водородной безопасности АЭС с ВВЭР-1000 / В. В. Безлепкина [и др.] // Теплоэнергетика. – 2002. – № 5. – С. 5–12.
2. Велькер, М. Инновационные технологии для обеспечения безопасности АЭС, как следствие аварии на АЭС Фукусима / М. Велькер // 7-я международная выставка и конференция «Атомэкспо-Беларусь 2015», Минск, 22–24 апр. 2015: офиц. каталог. – Минск, 2015. – С. 59.
3. Reinecke, E.-A. Operational behaviour of passive auto-catalytic hydrogen recombiners [Electronic resource] / E.-A. Reinecke, G. Poss // Nucl. Eng. Int. – 2012. – Mode of access: <https://www.neimagazine.com/features/featureoperational-behaviour-of-passive-auto-catalytic-hydrogen-recombiners>
4. Большов, Л. А. Уроки Чернобыля и Фукусимы и современные концепции управления «тяжелыми» авариями / Л. А. Большов // X Международная научно-техническая конференция «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики», Москва, 25–27 мая 2016 г.: сб. тр. / АО «Концерн Росэнергоатом». – М., 2016. – С. 13–14.
5. Safety Research Opportunities Post-Fukushima: Initial Report of the Senior Expert Group: Nuclear Safety NEA/CSNI/R(2016)19. – Paris: CSNI, 2017. – 190 p.
6. 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). – С. 1–12.
7. Домашенко, А. М. Проблемы взрывобезопасности при создании и эксплуатации промышленных систем хранения и транспортирования жидкого водорода. Стандарты / А. М. Домашенко // Альтернативная энергетика и экология. – 2006. – № 11 (43). – С. 28–38.
8. Состояния и условия взрывобезопасности в проектных режимах АЭС с ВВЭР / В. И. Скалозубов [и др.] // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобыля. – 2012. – Вып. 18. – С. 31–38.
9. Проект АЭС-2006. Основные концептуальные решения на примере Ленинградской АЭС-2. ОАО «СПбАЭП». – СПб.: Ин-т «Атомэнергопроект», 2011. – 40 с.

10. State of the art on hydrogen passive autocatalytic recombiner (European Union parsoar project) [Electronic resource] / F. Arnould [et al.]. – Mode of access: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/33/020/33020098.pdf – Date of access: 09.02.2018.
11. Исследование беспламенного горения водорода на поверхности гидрофобизированного катализатора / Ю. Н. Шебеко [и др.] // Физика горения и взрыва. – 1995. – Т. 31, № 5. – С. 37–38.
12. Тарарыкин, А. Г. Каталитические рекомбинаторы водорода для систем аварийной безопасности АЭС / А. Г. Тарарыкин // Безопасность окружающей среды. – 2007. – № 3. – С. 46–49.
13. Кутателадзе, С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: справ. пособие / С. С. Кутателадзе. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 367 с.
14. Understanding of the operation behaviour of a Passive Autocatalytic Recombiner (PAR) for hydrogen mitigation in realistic containment conditions during a severe Light Water nuclear Reactor (LWR) accident / F. Payota [et al.] // Nucl. Eng. Des. – 2012. – Vol. 248. – P. 178–196. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2012.03.042>
15. Коровин, Н. В. Электрохимические генераторы / Н. В. Коровин. – М.: Энергия, 1974. – 208 с.
16. Rožeň, A. A mechanistic model of a passive autocatalytic hydrogen recombiner / A. Rožeň // Chem. Process Eng. – 2015. – Vol. 36, № 1. – P. 3–19. <https://doi.org/10.1515/cpe-2015-0001>
17. CFD Analysis of Passive Autocatalytic Recombiner / B. Gera [et al.] // Science and Technology of Nuclear Installations. – 2011. – Article ID 862812. <https://doi.org/10.1155/2011/862812>
18. Конвективный теплообмен с химическими превращениями в вертикальном канале / Д. Г. Григорул [и др.] // Теплоэнергетика. – 2011. – № 6. – С. 63–67.
19. Математическое моделирование тепло- и массообмена в пассивном каталитическом рекомбинаторе водорода / С. В. Анпилов [и др.] // Теплоэнергетика. – 2013. – № 11. – С. 48–51.
20. Borekov papers [Electronic resource]. – Mode of access: www.catalysis.ru/resources/html/borekov_papers/glava2.doc – Date of access: 11.08.2016.
21. Prabhudharwadkar, D. M. Simulations of hydrogen mitigation in catalytic recombiner. Part I: Surface chemistry modeling / D. M. Prabhudharwadkar, P. A. Aghalayam, K. N. Iyer // Nucl. Eng. Des. – 2011. – Vol. 241, № 5. – P. 1746–1757. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2010.09.032>
22. Modelling of Catalytic Recombiners: Comparison of REKO-DIREKT Calculations with REKO-3 Experiments / E.-A. Reinecke [et al.] // Int. Conf. Nuclear Energy for New Europe. Bled, Slovenia, September 5–8, 2005. – Paper 92. – 10 p.
23. Schefer, R. W. Catalyzed combustion of H₂/air mixtures in a flat plate boundary layer. II. Numerical model / R. W. Schefer // Combustion and Flame. – 1982. – Vol. 45. – P. 171–190. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(82\)90043-8](https://doi.org/10.1016/0010-2180(82)90043-8)
24. Химическая гидродинамика: справ. пособие / А. М. Кутепов [и др.]. – М.: Бюро Квантум, 1996. – 336 с.
25. Conclusions on severe accident research priorities / W. Klein-Heßling [et al.] // Ann. Nucl. Energy. – 2014. – Vol. 74. – P. 4–11. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.07.015>
26. Park, K. Hydrogen concentration variation and examination of PAR installation in reactor containment building during hydrogen release from different direction failure places / K. Park, Kyung-Hyo Bae // Nucl. Eng. Des. – 2014. – Vol. 278, № 11. – P. 229–238. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2014.07.021>
27. Achievements of spray activities in nuclear reactor containments during the last decade / J. Malet [et al.] // Ann. Nucl. Energy. – 2014. – Vol. 74. – P. 134–142. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.05.033>
28. Malet, J. Influence of spray characteristics on local light gas mixing in nuclear containment reactor applications / J. Malet, X. Huang // Computers and Fluids. – 2015. – Vol. 107. – P. 11–24. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2014.10.002>
29. Effect of spray on performance of the hydrogen mitigation system during LB-LOCA for CPR1000 NPP / X. G. Huang [et al.] // Ann. Nucl. Energy. – 2011. – Vol. 38, № 8. – P. 1743–1750. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2011.04.003>
30. Расчетно-экспериментальное исследование перемешивания легкого газа в рамках проектов ERCOSAM – SAMARA / А. М. Бахметьев [и др.] // Атом. энергия. – 2017. – Т. 123, вып. 1. – С. 3–9.

References

1. Bezlepkin V. V., Golikov Yu. A., Kukhtevich I. V., Solov'ev V. P., Smirnov V. V. Ensuring the hydrogen safety of an NPS with a VVER-1000 reactor. *Teploenergetika = Thermal Engineering*, 2002, no. 5, pp. 5–12 (in Russian).
2. Welker M. Post-Fukushima innovations for NNP safety. *7-ya Mezhdunarodnaya vystavka i konferentsiya "Atomexpos-Belarus' 2015"*, Minsk, 22–24 aprelya 2015: *ofitsial'nyi katalog* [7th International Exhibition and Conference "Atomexpo-Belarus 2015", Minsk, April 22–24, 2015: Official Catalog]. Minsk, 2015, p. 59 (in Russian).
3. Reinecke E.-A., Poss G. Operational behaviour of passive auto-catalytic hydrogen recombiners. *Nuclear Engineering International*, 2012. Available at: <https://www.neimagazine.com/features/featureoperational-behaviour-of-passive-auto-catalytic-hydrogen-recombiners>
4. Bolsov L. A. Lessons of Chernobyl and Fukushima and modern concepts of severe accidents control. *X Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya "Bezopasnost', effektivnost' i ekonomika atomnoi energetiki" Moskva, 25–27 maya 2016 g.: sbornik trudov* [X International Scientific and Technical Conference "Safety, Efficiency and Economics of Nuclear Power Industry", Moscow, 2016 May, 25–27: Collection of Works]. Moscow, 2016, pp. 13–14 (in Russian).
5. *Safety Research Opportunities Post-Fukushima: Initial Report of the Senior Expert Group: Nuclear Safety NEA/CSNI/R(2016)19*. Paris, CSNI, 2017. 190 p.
6. Kirillov I., Kharitonova N., Sharafutdinov R., Krenniikov 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 Journal*, 2017, no. 2 (84), pp. 1–12 (in Russian).

7. Domashenko A.M. Safety of industrial systems for designing, exploiting and transporting of liquid hydrogen. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya = Alternative Energy and Ecology*, 2006, no. 11, pp. 28–38 (in Russian).
8. Skalozubov V. I., Vaschenko V. M., Jarovoy S. S., Zlochevski V.V. Blow up safety of NPP AES VVER operation regimes. *Problemi bezpeki atomnikh elektrostantsii i Chornobilya* [Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl], 2012, iss. 18, pp. 31–38 (in Russian).
9. *NPP AES-2006 design. Main concepts exemplified by Leningrad-2 NPP design. JSC Atomenergoproekt SPb.* St. Petersburg, Atomenergoproekt, 2011. 40 p. (in Russian).
10. Arnould F., Bachelier E., Auglaire M., De Boeck B., Braillard O., Eckardt B., Ferroni F., Moffett R., Van Goethem G. State of the art on hydrogen passive autocatalytic recombiner (European Union parsoar project). Available at: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/33/020/33020098.pdf (accessed 09 February 2018).
11. Shebeko J. N., Nrunev A. V., Shepelin V. A., Navtcena V. J., Zaycev A. A. Flameless combustion of hydrogen on water-proofed catalytic surface. *Fizika gorennya i vzryva = Combustion, Explosion and Shock Waves*, 1995, vol. 31, no. 5, pp. 37–38 (in Russian).
12. Tartarykin A.G. Hydrogen Catalytic recombiners for NPP safety systems. *Bezopasnost' okruzhayushchei sredy* [Environmental Safety], 2007, no. 3, pp. 46–49 (in Russian).
13. Kutateladze S. S. *Heat Transfer and Drug*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990. 367 p. (in Russian).
14. Payot F., Reinecke E.-A., Morfin F., Sabroux J.-C., Zeyen R. Understanding of the operation behaviour of a Passive Autocatalytic Recombiner (PAR) for hydrogen mitigation in realistic containment conditions during a severe Light Water nuclear Reactor (LWR) accident. *Nuclear Engineering and Design*, 2012, vol. 248, pp. 178–196. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2012.03.042>
15. Korovin N.V. *Electrochemical Generators*. Moscow, Energiya Publ., 1974. 208 p. (in Russian)
16. Rožen A. A mechanistic model of a passive autocatalytic hydrogen recombiner. *Chemical and Process Engineering*, 2015, vol. 36, no. 1, pp. 3–19. <https://doi.org/10.1515/cpe-2015-0001>
17. Gera B., Sharma P. K., Singh R. K., Vaze K.K. CFD Analysis of Passive Autocatalytic Recombiner. *Science and Technology of Nuclear Installations*, 2011, article ID 862812. <https://doi.org/10.1155/2011/862812>
18. Grigoruk D. G., Kondratenko P. S., Nikol'skii D. V., Chizhov M.E. Convective Heat Transfer with Chemical Transformations in a Vertical Channel. *Thermal Engineering*, 2011, vol. 58, no. 6, pp. 513–518. <https://doi.org/10.1134/s0040601511060048>
19. Anpilov S. V., Grigoruk D. G., Kondratenko P. S., Khristenko E. B., Chizhov M.E. Mathematical Modeling of Heat and Mass Transfer in a Passive Autocatalytic Recombiner. *Thermal Engineering*, 2013, no. 11, pp. 818–822. <https://doi.org/10.1134/s0040601513110013>
20. *Boreskov papers*. Available at: www.catalysis.ru/resources/html/boreskov_papers/glava2.doc (accessed 11 August 2016).
21. Prabhudharwadkar D. M., Aghalayam P. A., Iyer K.N. Simulations of hydrogen mitigation in catalytic recombiner. Part I: Surface chemistry modeling. *Nuclear Engineering and Design*, 2011, vol. 241, no. 5, pp. 1746–1757. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2010.09.032>
22. Reinecke E.-A., Boehm J., Drinovac P., Struth S. Modelling of Catalytic Recombiners: Comparison of REKO-DIREKT Calculations with REKO-3 Experiments. *International Conference Nuclear Energy for New Europe, Bled, Slovenia, September 5–8, 2005*. Paper 92. 10 p.
23. Schefer R.W. Catalyzed combustion of H₂/air mixtures in a flat plate boundary layer. II. Numerical model. *Combustion and Flame*, 1982, vol. 45, pp. 171–190. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(82\)90043-8](https://doi.org/10.1016/0010-2180(82)90043-8)
24. Kutepov A. M., Polyaniin A. D., Zapryanov Z. D., Vyazmin A. V., Kazenin D. A. *Chemical Hydrodynamics*. Moscow, Buro Kvantum Publ., 1996. 336 p. (in Russian).
25. Klein-Heßling W., Sonnenkalb M., Jacquemain D., Clément B., Raimond E., Dimmelmeier H. [et al.] Conclusions on severe accident research priorities. *Annals of Nuclear Energy*, 2014, vol. 74, pp. 4–11. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.07.015>
26. Park K., Bae Kyung-Hyo. Hydrogen concentration variation and examination of PAR installation in reactor containment building during hydrogen release from different direction failure places. *Nuclear Engineering and Design*, 2014, vol. 278, no. 11, pp. 229–238. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2014.07.021>
27. Malet J., Parduba Z., Mimouni S., Travis J. Achievements of spray activities in nuclear reactor containments during the last decade. *Annals of Nuclear Energy*, 2014, vol. 74, pp. 134–142. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.05.033>
28. Malet J., Huang X. Influence of spray characteristics on local light gas mixing in nuclear containment reactor applications. *Computers & Fluids*. 2015, vol. 107, pp. 11–24. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2014.10.002>
29. Huang X. G., Yang Y. H., Xu Cheng, Al-Hawshabi N. H. A. Effect of spray on performance of the hydrogen mitigation system during LB-LOCA for CPR1000 NPP. *Annals of Nuclear Energy*, 2011, vol. 38, no. 8, pp. 1743–1750. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2011.04.003>
30. Bakhmet'ev A. M., Bol'shukhin M. A., Kamnev M. A., Khizbullin A. M., Tyurikov O.V. Computational and Experimental Studies of Mixing of a Light Gas in the ERCOSAM–SAMARA Projects. *Atomnaya energiya = Atomic Energy*, 2017, vol. 123, iss. 1, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1007/s10512-017-0292-2>

Информация об авторе

Сорокин Владимир Владимирович – доктор технических наук, доцент, заведующий лабораторией, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» Национальной академии наук Беларуси (а/я 119, 220109, Минск, Республика Беларусь). E-mail: sorokin.npp@gmail.com

Information about the author

Vladimir V. Sorokin – D. Sc. (Engineering), Associate Professor, Head of the Laboratory, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (p/o box 119, 220109, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sorokin.npp@gmail.com