

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-1-64-76>

УДК: 621.311.25:621.039

Расчет влияния отравления на производительность пассивного каталитического рекомбинатора водорода локализующей системы безопасности АЭС с ВВЭР

В. В. Сорокин¹⁾

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

Реферат. На современной атомной электростанции предусмотрены локализующие системы безопасности для удержания при аварии радиоактивных веществ и ионизирующего излучения в предусмотренных проектом границах. Для защиты границы применяется система удаления водорода, включающая пассивные автокатализитические рекомбинаторы. Система предотвращает образование горючих и взрывоопасных концентраций водорода за счет превращения последнего в воду в ходе реакции с кислородом воздуха на катализаторе. Основной материал катализатора – обычно платина с долей палладия. Наряду с водородом аварийная среда содержит специфические вещества, известные как каталитические яды. Яды уменьшают активность катализатора и снижают производительность рекомбинаторов. Для платинового катализатора опасны вещества-доноры пары электронов, например теллур. Количество выделившихся каталитических ядов на стадии плавления активной зоны достаточно для снижения активности катализатора. Уровень снижения оценен расчетами. Яды в аэрозольной форме опасны в зоне отрывных течений у поверхности катализитического элемента. Яды в атомарной (молекулярной) форме опасны для катализатора по всей длине элемента. Яд вызывает постепенное снижение производительности рекомбинаторов с ростом количества прореагировавшего водорода. Скорость отравления зависит от типа и концентрации яда, массы активной платины на единице поверхности катализатора. Расчетом показана возможность снижения производительности пассивного каталитического рекомбинатора водорода вследствие отравления катализатора в условиях аварии на АЭС с ВВЭР. Представлены количественные данные по отравлению рекомбинаторов типа FR и PBK. Эффект отравления следует учитывать при выборе производительности системы удаления водорода локализующей системы безопасности энергоблока АЭС с ВВЭР.

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

Для цитирования: Сорокин, В. В. Расчет влияния отравления на производительность пассивного каталитического рекомбинатора водорода локализующей системы безопасности АЭС с ВВЭР / В. В. Сорокин // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2026. Т. 69, № 1. С. 64–76. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-1-64-76>

Адрес для переписки	Address for correspondence
Сорокин Владимир Владимирович	Sorokin Vladimir V.
Белорусский национальный	Belarusian National
технический университет	Technical University
просп. Независимости, 65/2,	65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, г. Минск, Республика Беларусь	220013, Minsk, Republic of Belarus
Тел.: +375 17 293-91-45	Tel.: +375 17 293-91-45
tes@bntu.by	tes@bntu.by

Calculation of the Impact of Poisoning Effect on the Performance of a Passive Catalytic Hydrogen Recombiner of a Localizing Safety System at a Nuclear Power Plant Equipped with Water-Cooled Water Reactors

V. V. Sorokin¹⁾

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

Abstract. A modern Nuclear Power Plant (NPP) is equipped with localizing safety systems to contain radioactive substances and ionizing radiation within the boundaries specified by the design in the event of an accident. To protect the border, a hydrogen removal system is used, including passive autocatalytic hydrogen recombiners. The system prevents the formation of flammable and explosive concentrations of hydrogen by converting hydrogen into water during a reaction with atmospheric oxygen on a catalyst. The main catalyst material is usually platinum with a proportion of palladium. Along with hydrogen, the emergency environment contains specific substances known as catalyst poisons. Poisons reduce catalyst activity and decrease the performance of recombiners. Electron pair donor substances, such as tellurium, are dangerous for the platinum catalyst. The amount of released catalytic poisons at the stage of active zone melting is sufficient to reduce the activity of the catalyst. The level of reduction is estimated by calculations. Aerosol poisons are dangerous in the zone of separated flows near the surface of the catalytic element. Poisons in atomic (molecular) form are dangerous to the catalyst along the entire length of the element. The poison causes a gradual decrease in the productivity of recombiners as the amount of reacted hydrogen increases. The rate of poisoning depends on the type and concentration of the poison, and the mass of active platinum per unit surface area of the catalyst. The calculation shows the possibility of a decrease in the productivity of a passive catalytic hydrogen recombiner due to catalyst poisoning under accident conditions at a Nuclear Power Plant with Water-Moderated Water-Cooled Reactors. Quantitative data on the poisoning of recombiners of the FR- and RVK-types are presented. The poisoning effect should be taken into account when selecting the performance of the hydrogen removal equipment of the localizing safety system for a power unit at a Nuclear Power Plant with Water-Moderated Water-Cooled Reactors.

Keywords: Nuclear Power Plant, Water-Moderated Water-Cooled Reactors, severe accidents, hydrogen safety, localizing safety system, hydrogen removal system, catalytic recombiners, catalyst, catalytic poisons, performance, calculations

For citation: Sorokin V. V. (2026) Calculation of the Impact of Poisoning Effect on the Performance of a Passive Catalytic Hydrogen Recombiner of a Localizing Safety System at a Nuclear Power Plant Equipped with Water-Cooled Water Reactors. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 69 (1), 64–76. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-1-64-76> (in Russian)

Введение

На современной атомной электростанции предусмотрены локализующие системы безопасности для удержания при аварии радиоактивных веществ и ионизирующего излучения в предусмотренных проектом границах. Границу системы образует герметичное ограждение (ГО), внутри которой формируется зона локализации. Для защиты ГО от разрушения и поддержания его работоспособности необходимо решить проблему, связанную с накоплением и возможным воспламенением водорода при тяже-

лой аварии. Сопутствующие эффекты повышения давления и температуры способны разрушить ограждение.

В проекте АЭС с ВВЭР предусмотрена система удаления водорода, включающая пассивные автокатализитические рекомбинаторы. Внутри корпуса рекомбинатора размещены катализитические элементы. Корпус представляет собой вертикальный канал, сообщающийся через открытые верхний и нижний концы с объемом зоны локализации. При наличии водорода в атмосфере на катализитических элементах происходит химическая реакция соединения водорода и кислорода, сопровождающаяся выделением теплоты. Формируется устойчивый восходящий конвективный поток, обеспечивающий поступление газовой смеси к катализатору и отвод продуктов реакции. В результате работы рекомбинаторов концентрация водорода внутри ГО снижается. Пассивный принцип действия, а также независимость функциональных элементов системы от других систем энергоблока и друг от друга обеспечивают ей высокую степень надежности [1–3]. В качестве катализатора обычно используется платина с добавкой палладия.

При обосновании работоспособности системы удаления водорода следует оценить ее действие в сложных условиях тяжелой аварии. Плавление топлива сопровождается разрушением стенок тепловыделяющих элементов, топливных таблеток, выходом в атмосферу продуктов деления. Также в атмосферу попадают продукты разложения других материалов, находящихся в зоне локализации. Среди них могут оказаться специфические субстанции, способные уменьшать активность катализатора (отравлять), известные как катализитические яды. Вследствие отравления снижается производительность рекомбинаторов.

Анализ научной литературы и технических документов показал, что однозначная количественная оценка снижения производительности не установлена, а в части экспериментальной проверки проведены многочисленные разнонаправленные исследования часто с противоречивыми или трудно интерпретируемыми результатами. Йод, например, летуч, и его много как в составе продуктов деления, так и в атмосфере зоны локализации. Из литературы по химии известно, что йод отравляет платиновый катализатор [4]. Отравление платинового катализатора йодом в рекомбинаторе наблюдали в [5], не наблюдали без выяснения, могло или нет проявиться отравление в имевшихся условиях, в [6], установили отсутствие эффекта в [3, 7]. Недостаток информации сказывается на практике [8–10], растет неопределенность количественных оценок безопасности [11].

Наблюдались яды в молекулярных формах, как сравнительно легко удаляемые с поверхности катализатора и не препятствующие дальнейшей его работе, так и входящие в прочную связь с катализатором, вплоть до его невосстановляемой дезактивации [12] в ходе штатного технологического процесса. Также известны яды, препятствующие доступу реагентов к катализатору (кокс, отложения). Нагрев катализатора рекомбинатора водорода на 20–30 °С выше температуры атмосферы решает проблему удаления

воды [13], до 117 °С – монооксида углерода [14] (или до более высокой температуры, по данным [15]). Прогрев и продувка катализатора в присутствии водорода, подаваемого из баллона, предусмотрены для восстановления активности каталитических элементов, которая, согласно наблюдениям, снижается со временем при эксплуатации устройства в режиме ожидания. Последствия невосстановляемой дезактивации устраняются заменой каталитических элементов (в ходе аварии реализовать мероприятие невозможно).

Производитель рекомбинатора обычно сообщает список ядов, в отношении которых он проверен и показал необходимую устойчивость [2, 3]. В проекте энергоблока АЭС рекомбинаторы используются исходя из характеристик, указанных производителем [1].

Компания AECL (Канада) являлась одной из первых организаций в мире, проводившей комплексные исследования по проблеме водородной безопасности [16]. Проверялась и устойчивость рекомбинаторов к ядам. Анализ проводился для тяжелых аварий. Определено отсутствие вредного влияния залива устройства спреем спринклерного раствора. Проверено действие ядов: йода, йодметила, гидразина, хлора, хлороводорода, монооксида углерода. Вредного эффекта не обнаружено. При испытании в среде аэрозоля облученного и необлученного топлива также не обнаружено снижения производительности. Кatalитические элементы проверялись не в составе рекомбинатора, а в составе экспериментального участка. Следует отметить, что в реакторах на тяжелой воде типа CANDU степень деградации активной зоны при тяжелой аварии гораздо меньше, чем у PWR, как и аварийные выходы водорода. Выгорание и остаточное тепловыделение топлива также ниже вследствие использования природного или слабо обогащенного урана в качестве делящегося материала и непрерывных перегрузок в ходе кампании. Проблема отравления не стоит остро.

Известны ответы представителей оператора второго блока АЭС «Индиана-Пойнт» (США) национальному регулятору (US Nuclear Regulatory Commission), в которых содержатся информация и пояснения, уточняющие отчет по обоснованию безопасности блока в части влияния ядов на каталитические рекомбинаторы. Оператор описывает каталитические яды [17], приводит их классификацию, оценку скорости снижения реакции на отравленном катализаторе вдвое, сообщает, что для эффекта отравления надо иметь высокую концентрацию яда в течение продолжительного времени, чего обычно нет на АЭС с PWR. Концентрация водорода в контейнере не может превысить 2 об. %, что неопасно независимо от наличия или отсутствия ядов.

Обобщение экспериментальных данных по отравлению катализаторов (платиновых и палладиевых) проведено в [6]. В работе выяснено, что осаждение молекулярных форм на поверхность катализатора идет существенно интенсивнее, чем аэрозольных; замена инертного компонента атмосферы экспериментальной установки (азот) водяным паром (при плотности, существенно меньшей плотности насыщенного пара) не снижает интен-

сивности рекомбинации, рекомбинацией управляет дефицитный реагент из пары кислород и водород. Определенных результатов по отравлению катализатора в [6] не получено. В итоге высказано мнение о возможной незначительной роли ядов (применительно к АЭС с PWR).

При анализе вопроса о влиянии ядов в случае АЭС с ВВЭР желательно установить количественную сторону эффекта, поскольку удельные показатели ВВЭР выше, чем у PWR, а среди ВВЭР ВВЭР-1200 отличается большей мощностью и большим уровнем выгорания топлива. По оценкам, выходы водорода при авариях на блоках АЭС с ВВЭР могут достигать опасных значений [18, 19]. Расчеты будем проводить для конкретных моделей рекомбинаторов типа FR (AREVA) и РВК (Русские энергетические технологии), которыми часто комплектуются системы удаления водорода энергоблоков с ВВЭР. В составе Белорусской АЭС эксплуатируются два энергоблока с ВВЭР-1200, оснащенных рекомбинаторами РВК-3 и РВК-4.

Каталитические яды в атмосфере герметичного ограждения

В условиях нормальной эксплуатации топливная таблетка удерживает в своей структуре до 98 % продуктов деления. Потеря плотности оболочки твэла и высокая температура таблеток при тяжелой аварии приводят к выходу накопленных продуктов деления и компонент топлива. Часть веществ высвобождается из материалов внутрикорпусных элементов. Выход зависит от начальной концентрации и коэффициента перехода, который в свою очередь определяется параметрами аварийной активной зоны, температурой зоны и скоростью потока газа [20, 21].

Начальная концентрация продуктов деления задается уровнем выгорания топлива и известным распределением содержания осколков деления для реактора с тепловым спектром нейтронов [22, рис. 3.14]. Из имеющихся осколков деления опасность как каталитические яды для платины и палладия представляют доноры пары электронов [12], их характеристики приведены в [23].

Для получения количественных оценок влияния отравления целесообразно выбрать теллур, имеющийся в большом количестве и характеризующийся высокими плотностью паров и вероятностью пребывания в молекулярной форме. График зависимости давления насыщения паров теллура от температуры приведен на рис. 1, он построен на основе экстраполяции данных [24]. Давление, согласно рис. 1, составляет около 0,4 Па при 120 °C, чему соответствует концентрация паров теллура в воздухе 4 ppm.

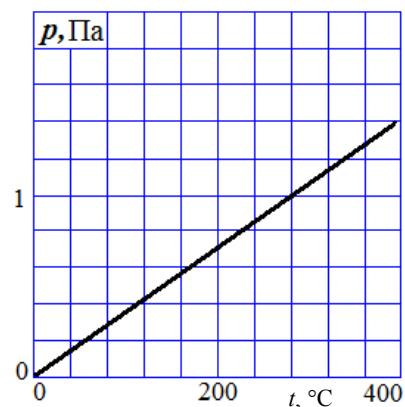


Рис. 1. График зависимости давления насыщения паров теллура от температуры

Fig. 1. Graph of the dependence of the saturation pressure of tellurium vapor on temperature

Расчет отравления молекулярными формами ядов

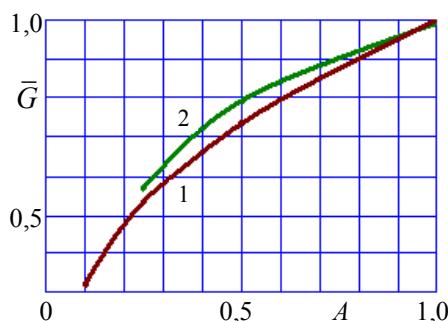
Расчет отравления молекулярными формами ядов в части влияния на производительность может быть проведен в общем виде без явного учета свойств отравляющей среды. Пусть яды снижают скорость химической реакции k_s в $1/A$ раз

$$k_s = A(k_s)_0, \quad (1)$$

где $(k_s)_0$ – скорость химической реакции неотравленного катализатора.

Соответственно производительность уменьшается в $\bar{G} = G(A)/G(A=1)$ раз.

Расчет ведется для условий тяжелой аварии в зоне локализации: давление 0,3 МПа, температура 125 °C, концентрация водорода 4 об. %. Для рекомбинатора FR90/1-1500 используется модель [25], для РВК-3 [26]. Изменение скорости реакции задается величиной A и определяется уравнением (1). Результаты приведены на рис. 2.



Rис. 2. Снижение производительности рекомбинатора при отравлении:
1 – FR; 2 – RVK

Fig. 2. Reduction in recombiner performance due to poisoning:
1 – FR; 2 – RVK

Четырехкратное снижение скорости реакции приводит к уменьшению производительности в 1,8 раза, причем разница в проявлении эффекта для рекомбинаторов типа FR и РВК незначительна. Основной причиной снижения является рост недожога водорода. Для лабораторных условий (нормальные давления и температура) графики примерно такие же.

Вычислим концентрацию яда, соответствующую значениям коэффициента A . Относительное уменьшение скорости реакции из-за ядов определяется выражением [12]

$$\omega k_s = - dk_s / du, \quad (2)$$

где u – количество яда в граммах на грамм платины; ω – константа.

Интеграл формулы (2) $\ln(k_s) = -\omega u + C$. Поскольку изначально катализатор не отравлен, то $C = \ln((k_s)_0)$, и с учетом выражения (1)

$$\ln(A) = -\omega u. \quad (3)$$

Известны характерные величины постоянной ω : 18 – для Se; 23 – для As [12]. Для использования формулы (3) в вычислениях зададим $\omega = 20$ как типичное значение. Величина u зависит от масс активной платины в устройстве и поглощенного яда. Масса платины приводится (должна приводиться) в техническом описании устройства. Массу поглощенного яда удобно определять, зная производительность рекомбинатора по водороду G_{H_2} , решением пропорции

$$G_A/G_{H_2} = \alpha_A C_A / \alpha_{H_2} C_{H_2} = D_A C_A / D_{H_2} C_{H_2} \approx (2/\mu_A)^{0.5} C_A / C_{H_2}. \quad (4)$$

Здесь α – коэффициент массообмена; C – массовая концентрация; μ_A – масса моля яда в граммах; индексы: A – яд; H_2 – водород.

Примеры расчета с использованием формул (2)–(4). Первый, пусть $A = 0,9$ и масса платины в рекомбинаторе 40 г, из уравнения (2) получим $u = 0,0053$, а масса теллура (молярная масса 128 г/моль), затраченного для отравления такого уровня, составит 0,21 г. Если за час в лабораторных условиях прореагировало 3,9 кг водорода при концентрации 4 об. %, то концентрация яда в атмосфере зоны локализации $\varepsilon_p = 2,7 \cdot 10^{-5}$ об. %, или 0,27 ppm. Второй, при концентрации теллура 2 ppm, водорода 4 об. % после получаса работы рекомбинатора FR90/1-1500 в аварийных условиях $A = 0,47$ и $\bar{G} = 0,75$, производительность устройства снизится на 25 %. Третий, в экспериментах [6] концентрация йода была менее 10 ppm, экспозиция порядка часа, отравление не наблюдалось. Отравление при таких условиях было бы замечено даже при $\omega \sim 1$.

По данным оператора [17], снижение скорости реакции на катализаторе вдвое под действием яда приведет к формированию концентрации водорода 1,75 об. % по сравнению с исходной, равной 1,5 об. %. Данные нашей проверки: если производительность устройства составляет 1,25 кг/ч при концентрации водорода 1,75 об. % и сниженной наполовину скорости реакции, то при полной скорости реакции и концентрации 1,5 об. % производительность составит 1,31 кг/ч, разница менее 5 %, оценка оператора второго блока АЭС «Индиана-Пойнт» подтверждается.

Расчет отравления аэрозольными формами ядов

Большая часть ядов при аварии оказывается не в молекулярной, а в аэрозольной форме [10, 27]. При выходе из раскаленной таблетки в поток, из отверстия течи в зону локализации, происходят резкое охлаждение паров, их конденсация с образованием аэрозоля. Диаметр частицы аэрозоля d можно оценить в 1 мкм, отдельные аэрозольные частицы могут объединяться в кластеры.

Аэрозоль как яд может действовать двояко. Непосредственно откладываться на каталитической поверхности как корка, затрудняющая обмен продуктами и реагентами с основным потоком. Опосредованно в горячем рекомбинаторе, с ростом температуры газа по ходу вдоль каталитических элементов, частица аэрозоля будет нагреваться и может выделять молеку-

лярные формы яда. Такой процесс наблюдался в [27]. Исследовалось превращение аэрозольной формы йодида цезия в газообразный йод, обнаружен 1,0–3,0 % выход реакции при 800 °С. Концентрация аэрозоля в газе составляла несколько грамм на метр кубический. В работе [28] среди возможных элементов, способных испариться из аэрозольной формы, назван теллур, количественные данные о процессе не приводились.

Коэффициент диффузии аэрозоля согласно формуле Эйнштейна $D_A = = RT_c/6N_A\pi d\mu = 1,3 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}$, где R – универсальная газовая постоянная; T_c – абсолютная температура среды; N_A – число Авогадро; μ – динамическая вязкость среды, равная $2,3 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$. Коэффициент диффузии водорода $D_{H_2} = 6,6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$. Отношение (D_A/D_{H_2}) мало, поэтому скорость поступления аэрозоля на поверхность будет низкой (4), а эффект отравления незаметным (1), (3), что наблюдалось в [6]. Следовательно, диффузия аэрозоля не может привести к значимому отравлению катализатора.

В исследовании [27] проверялось действие аэрозоля в качестве катализического яда, производительность устройства (тип FR) оставалась в пределах 50–70 % от номинальной. Причиной наблюдаемого эффекта может быть турбулентная диффузия. Она возникает в ламинарном в целом потоке среды внутри рекомбинатора в аэродинамическом следе за плохо обтекаемыми элементами конструкции и затухает вниз по ходу течения. В рекомбинаторах типа FR плохо обтекаемый элемент один – это участок входа в кассету [25]. В рекомбинаторах типа РВК плохо обтекаемых элементов несколько: это планки рамок, удерживающих цилиндрические каталитические элементы [29].

Будем считать перенос аэрозоля на каталитическую поверхность за счет турбулентности основным механизмом формирования корки и описывать его с использованием турбулентного коэффициента переноса взамен молекулярного. Коэффициент диффузии D_A , обусловленный турбулентностью, обозначим как $(D_A)_t$. Пользуясь тройной аналогией, можно определить $(D_A)_t \sim v_t \sim 0,09k_t^2/\varepsilon_t$, $k_t = 3U^2/2$, $\varepsilon_t = 15v(U/\delta)^2$, где k_t – кинетическая энергия турбулентности; ε_t – скорость диссипации кинетической энергии; U – масштаб скорости; δ – линейный масштаб; v_t – коэффициент турбулентной вязкости [30]; вязкость газа $v = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ (воздух).

Кatalитический элемент 2 имеет цилиндрическую форму и следующие размеры: диаметр 5 мм, длина 65 мм (рис. 3). Кatalитический элемент 2 в сборе с рамкой 1 образует сложную аэродинамическую структуру. В качестве элемента структуры выделим плохо обтекаемую часть 3, включающую диск диаметром 13 мм (часть планки рамки) и участок цилиндрической поверхности кatalитического элемента 2. Поток взаимодействует с плохо обтекаемой частью 3, образуя зону отрыва и турбулентности 4, затем движется вдоль образующей элемента 2 до его конца. Более мелкие структуры не рассматриваются. Считаем, что второй ряд рамок [29] по ходу потока подобен первому в части характера обтекания. Уступ между диском и цилиндром имеет высоту 4 мм и определяет ширину зоны отрыва, в которой поток

имеет турбулентный характер [31]. Принимаем $\delta = 4$ мм. Скорость при входе в неотравленный рекомбинатор РВК при 0,3 МПа, температуре 125 °C, концентрации водорода 4 об. % составляет по расчету 0,38 м/с, производительность 3,5 кг/ч. Принимаем $U = 0,38$ м/с, тогда $(D_A)_t \sim 1,3 \cdot 10^{-3}$ м²/с. Подстановка значений в выражение (4) определяет $G_A = 1,2$ г/мин при выбранной концентрации аэрозоля в атмосфере зоны локализации 10 мг/м³. Общая площадь поверхности каталитических элементов составляет 8,4 м². Для покрытия плотной коркой толщиной 3 мкм 1 м² поверхности катализатора потребуется 6 г аэрозоля плотностью 2 г/см³, что займет 40 мин времени.

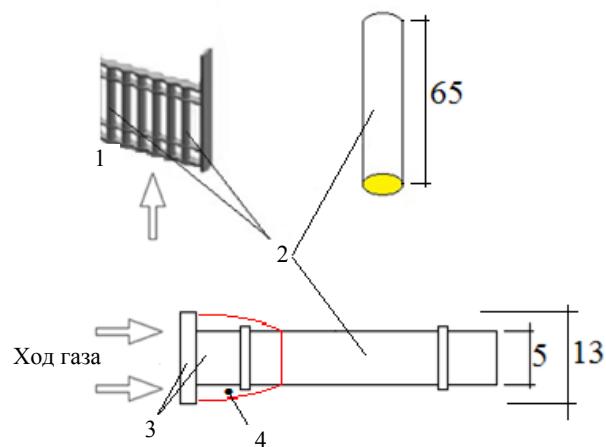


Рис. 3. Схема обтекания каталитического элемента рекомбинатора РВК:
1 – рамка; 2 – каталитический элемент; 3 – плохо обтекаемая часть;
4 – зона отрыва и турбулентности

Fig. 3. Flow diagram of the catalytic element of the RVK recombiner:
1 – frame; 2 – catalytic element; 3 – poorly streamlined part; 4 – separation and turbulent zone

Оценим отравление количественно. Длина турбулентной зоны составляет обычно 5δ , так что отравленной полностью окажется $20/65 = 0,31$, или 31 % площади катализатора. Расчет производительности РВК-3 с учетом потери установленной части площади каталитической поверхности для условий в зоне локализации (давление 0,3 МПа, температура 125 °C, концентрация водорода 4 об. %) дает следующие результаты: недожог увеличится с 0,41 до 0,54, а производительность снизится с 3,54 до 2,61 кг/ч, или до 74 %. Потеря производительности не равна в точности потере площади каталитической поверхности, поскольку оставшийся катализатор работает при относительно более высоком уровне концентрации водорода. Для разумной удобной консервативной оценки снижения производительности можно принять ее пропорциональной потере площади.

Для рекомбинатора FR при натекании газа параллельно пластинам $\delta = 3$ мм (толщина пластины) потеря площади составит $15/140 = 0,11$ части, при натекании газа под углом к пластинам $\delta = 10$ мм (ширина щели между пластинами) потеря до $50/140 = 0,36$. Натекание под углом возника-

ет при наличии горизонтальной составляющей скорости у входа в кассету с каталитическими пластинами. Обычно горизонтальная составляющая отсутствует, поэтому в качестве характерной величины потери производительности следует использовать величину 0,11.

ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ влияния каталитических ядов на эффективность работы рекомбинаторов водорода системы удаления последнего локализующей системы безопасности АЭС с ВВЭР. Количество выделившихся ядов при тяжелой аварии ВВЭР достаточно для снижения производительности рекомбинаторов. Яд вызывает постепенное снижение производительности рекомбинаторов с ростом количества прореагировавшего водорода. Механизмы действия ядов в форме веществ и в форме аэрозолей различны.

2. Для платинового катализатора опасны вещества-доноры пары электронов, например теллур. Яды в форме веществ снижают скорость химической реакции рекомбинации водорода на поверхности катализатора. Уровень снижения оценен расчетами для рекомбинаторов FR и РВК, предложены график снижения производительности в зависимости от скорости реакции и формула, устанавливающая связь между дозой поглощенного яда и уменьшением скорости реакции. Увеличение массы активной платины в каталитических элементах ослабляет действие молекулярного яда.

3. Действие ядов в аэрозольной форме может проявляться в аэродинамическом следе за плохо обтекаемыми элементами конструкции. Аэрозоль изолирует поверхность катализатора коркой, препятствующей транспорту реагентов и продуктов реакции. В рекомбинаторах типа FR плохо обтекаемый элемент один – это участок входа в кассету, доля поверхности под коркой по расчету 0,11. В рекомбинаторах типа РВК плохо обтекаемых элементов несколько: это планки рамок, удерживающих цилиндрические каталитические элементы, доля поверхности под коркой 0,31. В качестве консервативной оценки снижения производительности рекомбинатора можно принять ее пропорциональной потере площади каталитической поверхности под коркой.

4. Эффект отравления следует учитывать при выборе количества рекомбинаторов системы удаления водорода локализующей системы безопасности энергоблока АЭС с ВВЭР.

ЛИТЕРАТУРА

- Проект АЭС-2006. Основные концептуальные решения на примере Ленинградской АЭС-2. ОАО «СПБАЭП». СПб.: Ин-т «Атомэнергопроект», 2011. 40 с.
- 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: официальный каталог, Минск, 22–24 апреля 2015 г. / РУП НВЦ «БелЭкспо». Минск, 2015. С. 59.
- AREVA Passive Autocatalytic Recombiner / Brochure: AREVA GmbH Paul-Gossen-Straße 100 91052 Erlangen. Germany. 2013. G-008-V3-13-ENGPB.
- Рубинштейн, А. М. Применение платины и палладия в качестве катализатора / А. М. Рубинштейн // Изв. Ин-та изучения платины. 1943. Вып. 19. С. 61–102.

5. Morfin, F. Catalytic Combustion of Hydrogen for Mitigating Hydrogen Risk in Case of a Severe Accident in a Nuclear Power Plant: Study of Catalysts Poisoning in a Representative Atmosphere / F. Morfin, J.-C. Sabroux, A. Renouprez // Applied Catalysis B: Environmental. 2004. Vol. 47, No 1. P. 47–58.
6. 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.] // Nuclear Engineering and Design. July 2012. Vol. 248. P. 178–196.
7. Пассивный катализитический рекомбинатор водорода РВК-3. Технические условия: РЭТ-131.00.000 ТУ. М.: Рус. энерг. технологии, 2011. 25 с.
8. 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.
9. Национальный отчет о результатах проведения «стресс-тестов» / Государственная инспекция ядерного регулирования Украины. Киев: ГИЯРУ, 2011. 136 с.
10. IAEA safety related publications. Mitigation of Hydrogen Hazards in Severe Accidents in Nuclear Power Plants: IAEA-TECDOC-1661. Vienna: IAEA, 2011. 174 p.
11. Корсак, Е. П. Имитационное моделирование и вероятностный анализ безопасности в управлении рисками АЭС / Е. П. Корсак, В. А. Романко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2025. Т. 68, № 5. С. 428–441. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-5-428-441>.
12. Боресков, Г. К. Катализ в производстве серной кислоты / Г. К. Боресков. М.–Л.: ГНТИ ХЛ, 1954. 348 с.
13. Курский, А. С. Радиолиз теплоносителя и методы обеспечения водородной взрывозащиты корпусного кипящего реактора ВК-50 / А. С. Курский // Атомная энергия. 2013. Т. 115, вып. 5. С. 250–255.
14. Gupta, S. THAI Experimental Research on Hydrogen Risk and Source Term Related Safety Systems / S. Gupta, M. Freitag, G. Poss // Front. Energy. 2021. Vol. 15 (4). P. 887–915.
15. Braun, M. AMHYCO Engineering Correlation to Describe the Conversion of Flammable Gases in Framatome Passive Autocatalytic Recombiners / M. Braun, E.-A. Reinecke // Nuclear Engineering and Design. 2025. Vol. 442. 114206.
16. Moffett, R. A Canadian Perspective on Passive Autocatalytic Recombiners / R. Moffett // Nuclear Engineering International. 2012. No 8. P. 2.
17. Reply to Request for Additional Information Passive Autocatalytic Recombiners, Indian Point Unit No 2, May 2, 1997. Indian Point Station, 1997. Docket-No. P. 50–247.
18. 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.
19. Трехмерный расчет горения водородосодержащих паровоздушных смесей в рамках обоснования безопасности АЭС с ВВЭР / В. В. Безлепкин и [др.] // Режим доступа: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2017/documents/mntk2017-007.pdf>. Дата доступа: 18.09.2019.
20. Nuclear Fuel Behaviour in Loss-of-Coolant Accident (LOCA) Conditions. State-of-the-art Report. NEA No. 6846. OECD, 2009. 369 p.
21. Витоль, С. А. Выход радиоактивных материалов из расплава активной зоны при тяжелой аварии АЭС: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.03 / С. А. Витоль; ФГУП НИТИ Сосновый Бор, 2007. 247 с.
22. Климов, А. Н. Ядерная физика и ядерные реакторы / А. Н. Климов. М.: Энергоатомиздат, 1985. 352 с.
23. Воробьев, В. В. Расчет влияния отравления на производительность пассивного катализитического рекомбинатора водорода. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2017/documents/mntk2017-137.pdf>.
24. Свойства вещества: теллур. Режим доступа: <http://chemister.ru/Database/properties.php?dbid=1&id=262>. Дата доступа: 18.08.2017.
25. Сорокин, В. В. Расчет характеристик пассивного катализитического рекомбинатора водорода в условиях аварии на АЭС-2006 / В. В. Сорокин // Изв. НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. 2020. № 4. С. 496–505.
26. Сорокин, В. В. Эффективность рекомбинаторов водорода РВК в условиях тяжелой аварии на энергоблоке проекта АЭС-2006 / В. В. Сорокин // Энергетик. 2025. № 3. С. 20–22.

27. State-of-the-Art Reports of Nuclear Energy Agency Committee on the Safety of Nuclear Installations. State-of-the-art report on nuclear aerosols: NEA/CSNI/R(2009)5. Paris: CSNI, 2009. 388 p.
28. State-of-the-Art Reports of Nuclear Energy Agency Committee on the Safety of Nuclear Installations. Containment Code Validation Matrix: NEA/CSNI/R(2014)3. Paris: CSNI, 2014. 614 p.
29. Сорокин, В. В. Точность расчетных зависимостей для определения производительности пассивных рекомбинаторов водорода PBK-3 и PBK-4 // Ядерная и радиационная безопасность. 2025. № 3 (117). С. 81–89. DOI: 10.26277/SECNRS.2025.117.3.006.
30. Ши, Д. Численные методы в задачах теплообмена / Д. Ши. М.: Мир, 1988. 544 с.
31. Чжен, П. Отрывные течения: в 3 т. Т. 1 / П. Чжен. М.: Мир, 1972. 299 с.

Поступила 14.10.2025 Подписана в печать 22.12.2025 Опубликована онлайн 30.01.2026

REFERENCES

1. JSC Saint Petersburg AtomEnergoProekt (2011). *Nuclear Power Plant-2006 Project. Main Conceptual Solutions Using the Example of Leningrad NPP-2*. Saint Petersburg, Publishing House of Institute “Atomenergoproekt”. 40 (in Russian).
2. Welker M. (2015) Innovative Technologies for Ensuring Nuclear Power Plant Safety as a Consequence of the Fukushima Nuclear Power Plant accident. *7th International Exhibition and Conference Atomexpo-Belarus 2015: Official Catalog, Minsk, April 22–24, 2015*. Minsk, 2015, 59 (in Russian).
3. AREVA *Passive Autocatalytic Recombiner G-008-V3-13-ENGPB*. Erlangen, Germany, 2013.
4. Rubinstein A. M. (1943) Use of Platinum and Palladium as a Catalyst. *Izvestiya sektora platiny i drugikh blagorodnykh metallov. Vyp. 19* [News of the Platinum and Other Precious Metals Sector. Iss. 19]. Moscow, Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 61–102 (in Russian).
5. Morfin F., Sabroux J.-C., Renouprez A. (2004) Catalytic Combustion of Hydrogen for Mitigating Hydrogen Risk in case of a Severe Accident in a Nuclear Power Plant: Study of Catalysts Poisoning in a Representative Atmosphere. *Applied Catalysis B: Environmental*, 47 (1), 47–58. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2003.07.001>.
6. Payot F., Reinecke E.-A., Morfin F., Sabroux J.-C., Meynet N., Bentaib A., March P., Zeyen R. (2012) 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*, 248, 178–196. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2012.03.042>.
7. Passive Catalytic Hydrogen Recombiner RVK-3. Specifications: RET-131.00.000 TU. Moscow, Publishing House “Russkie Energeticheskie Tekhnologii”, 2011. 25 (in Russian).
8. *Technical Specifications for the Procurement of an Emergency Hydrogen Removal System from the Containment Volume of the Reactor Section for Power Units No 3 and No 4 of the Novovoronezh Nuclear Power Plant*. Approved on 04.07.2013. Novovoronezh, Publishing House of Novovoronezh Nuclear Power Plant, 2013. 10 (in Russian).
9. State Nuclear Regulatory Inspectorate of Ukraine (2011) *National Stress Test Results Report*. Kiev, State Nuclear Regulatory Inspectorate of Ukraine. 136 (in Russian).
10. IAEA Safety Related Publications. *Mitigation of Hydrogen Hazards in Severe Accidents in Nuclear Power Plants: IAEA-TECDOC-1661*. Vienna, IAEA, 2011. 174.
11. Korsak K. P., Romanko V. A. (2025) Simulation Modeling and Probabilistic Safety Analysis in Nuclear Power Plant Risk Management. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 68 (5), 428–441. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-5-428-441> (in Russian).
12. Boreskov G. K. (1954) *Catalysis in the Production of Sulfuric Acid*. Moscow-Leningrad, State Scientific and Technical Publishing House of Chemical Literature. 348 (in Russian).
13. Kurskii A. S. (2014) Coolant Radiolysis and Hydrogen Explosion Protection for the VK-50 Boiling-Water Reactor Vessel. *Atomic Energy*, 115, 300–306. <https://doi.org/10.1007/s10512-014-9787-2>.
14. Gupta S., Freitag M., Poss G. (2021) THAI Experimental Research on Hydrogen Risk and Source Term Related Safety Systems. *Frontiers in Energy*, 15 (4), 887–915. <https://doi.org/10.1007/s11708-021-0789-1>.
15. Braun M., Reinecke E.-A. (2025) AMHYCO Engineering Correlation to Describe the Conversion of Flammable Gases in Framatome Passive Autocatalytic Recombiners. *Nuclear Engineering and Design*, 442, 114206. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2025.114206>.

16. Moffett R. (2012) A Canadian Perspective on Passive Autocatalytic Recombiners. *Nuclear Engineering International*, 57 (8), 15–17. Available at: <https://www.neimagazine.com/advanced-reactorsfusion/a-canadian-perspective-on-passive-autocatalytic-recombiners/?cf-view>.
17. Reply to Request for Additional Information Passive Autocatalytic Recombiners, Indian Point Unit No 2, May 2, 1997. Indian Point Station, 1997. Docket-No. P. 50–247.
18. Kirillov I. A., Kharitonova N. L., Sharafutdinov R. B., Khrennikov N. N. (2017) Ensuring Hydrogen Safety at Nuclear Power Plants with Water-Cooled Reactors. The Current State of the Problem. *Yadernaya i Radiatsionnaya Bezopasnost* [Nuclear and Radiation Safety], (2), 26–37.
19. Bezlepkin V. V. [et al.] (2017) Three-Dimensional Calculation of Combustion of Hydrogen-Containing Steam-Air Mixtures as Part of the Safety Justification for Nuclear Power Plants with Water-Cooled Water Reactors. *Ensuring the Safety of Nuclear Power Plants with Water-Moderated Water-Cooled Reactors: International Scientific and Technical Conference, Podolsk, Joint-Stock Company (JSC), Experimental Design Bureau "Gidropress"*, May 16–19, 2017. Available at: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2017/documents/mntk2017-007.pdf>. (accessed 18 September 2019) (in Russian).
20. Nuclear Energy Agency. Organisation for Economic Co-operation and Development (2009) *Nuclear Fuel Behaviour in Loss-of-Coolant Accident (LOCA) Conditions. State-of-the-Art Report*. NEA No. 6846. Available at: <https://gifsymposium2018.gen-4.org/upload/docs/application/pdf/2021-03/csni-r2009-15.pdf>.
21. Vitol S. A. (2007) *Release of Radioactive Materials from the Core Melt During a Severe Nuclear Power Plant Accident* [Dissertation]. Saint Petersburg (in Russian).
22. Klimov A. N. (1985) *Nuclear Physics and Nuclear Reactors*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 352 (in Russian).
23. Vorobyov V. V. (2017) Calculation of the Influence of Poisoning on the Performance of a Passive Catalytic Hydrogen Recombiner. *Ensuring the Safety of Nuclear Power Plants with Water-Moderated Water-Cooled Reactors: International Scientific and Technical Conference, Podolsk, Joint-Stock Company (JSC), Experimental Design Bureau "Gidropress"*, May 16–19, 2017. Available at: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2017/documents/mntk2017-137.pdf> (in Russian).
24. Properties of the Substance: Tellurium. *Database of Physical and Chemical Properties and Syntheses of Substances*. Available at: <http://chemister.ru/Database/properties.php?dbid=1&id=262> (accessed 18 August 2017) (in Russian).
25. Sorokin V. V. (2020) Passive Autocatalytic Recombiner Characteristics Calculation During Severe Accident on AES-2006 NPP. *Vestsi Natsyyanal'naii akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tehnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 65 (4), 496–505. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-496-505> (in Russian).
26. Sorokin V. V. (2025) Efficiency of RVK Hydrogen Recombiners under Severe Accident Conditions at the Power Unit of the 2006 Nuclear Power Plant. *Energetik*, (3), 20–22 (in Russian).
27. Nuclear Energy Agency Committee on the Safety of Nuclear Installations (2009). *State-of-the-Art Report on Nuclear Aerosols: NEA/CSNI/R(2009)5*. Paris, CSNI. Available at: https://oecd-nea.org/jcms/pl_18750/state-of-the-art-report-soar-on-nuclear-aerosols.
28. Nuclear Energy Agency Committee on the Safety of Nuclear Installations (2014). *Containment Code Validation Matrix: NEA/CSNI/R(2014)3*. Paris, CSNI. Available at: https://oecd-nea.org/jcms/pl_19413/containment-code-validation-matrix.
29. Sorokin V. V. (2025) Accuracy of Calculated Dependencies for Determining the Performance of Passive Hydrogen Recombiners RVK-3 and RVK-4. *Yadernaya i Radiatsionnaya Bezopasnost* [Nuclear and Radiation Safety], (3), 81–89. <https://doi.org/10.26277/secnrs.2025.117.3.006> (in Russian).
30. Shih T.-M. (1984) *Numerical Heat Transfer*. Washington: Hemisphere Pub. Corp. 563.
31. Chang P. (1970) *Separated Flow*. Pergamon Press. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-05541-7>.