



С. С. Лыс, О. Г. Юрасова, Е. П. Шыкало

Национальный университет "Львовская политехника", г. Львов, Украина

АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ ДОЖИГАНИЯ ВОДОРОДА В ПРЕДЕЛАХ РЕАКТОРНОГО ОТДЕЛЕНИЯ АЭС

Система дожигания водорода предназначена для каталитического окисления водорода в газовой смеси, поступающей из деаэратора подпитки с целью предотвращения взрывоопасной смеси водорода с кислородом. Принцип работы системы основан на широко известной реакции получения воды из кислорода и водорода. В основу проектирования системы было принято обеспечение надежности работы системы в режимах нормальной эксплуатации, нарушений нормальной эксплуатации и аварий, не связанных с разуплотнением первого контура. Для этого предусмотрены рециркуляция газа в циркуляционном контуре, буферные емкости, резервирование наиболее ответственных участков схемы (газодувки, электронагреватели, контактные аппараты). Отказом системы является событие, состоящее в невозможности отвода и дожигания газообразного водорода, выделяющегося в деаэраторе подпитки первого контура. Установлено, что надежность работы системы обеспечивается: наличием трех газодувок (две из которых резервные); возможностью стопроцентной замены электронагревателей; наличием двух взаимозаменяемых ниток; постоянным контролем концентрации водорода в системе; автоматическим контролем за состоянием системы; наличием резервного вида управления, в дополнение к автоматическому. В соответствии с результатами вероятностного анализа безопасности (ВАБ), параметры надежности системы не оказывают значимого влияния на целевые показатели безопасности.

Ключевые слова: системы дожигания водорода; реакторное отделение; первый контур; вероятностный анализ безопасности.

Введение. Система дожигания водорода (TS10) по выполняемым функциям относится к системе нормальной эксплуатации, важной для безопасности. Под воздействием нейтронного и гамма-излучения в воде первого контура происходят химические реакции, накладывающие дополнительные требования к работе вспомогательного оборудования реакторной установки (РУ) (IE 121-3-25-E-RTc-2, 2018). При воздействии гамма и бета излучения, замедлении нейтронов в теплоносителе происходит радиолиз воды (разрыв связей молекул воды и образование свободного водорода), протекающий по реакции: $2\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$.

Реакция радиолиза воды обратима, т.е. образующиеся радикалы могут рекомбинировать, но присутствие в теплоносителе первого контура борной кислоты сдвигает реакцию вправо в сторону разложения воды на H_2 и O_2 . Обратимость реакции ограничивает накопление свободного O_2 первом контуре, но без принятия специальных мер, количество O_2 может превысить допустимую концентрацию, а так O_2 является активным деполяризатором, значительно ускоряются процессы коррозии металла. Поэтому, для связывания свободного O_2 и давления радиолиза воды дозируется аммиак (NH_3) (IE

121-3-25-E-RTc-2, 2018). Радиолиз NH_3 в теплоносителе первого контура описывается в следующем виде: $2\text{NH}_3 \leftrightarrow \text{N}_2 + 3\text{H}_2$.

При радиолизе 1 мг NH_3 в теплоносителе первого контура образуется $2 \text{ см}^3 \text{ H}_2$. Однако, при выводе теплоносителя первого контура на обработку со снижением давления или деаэрацией, будет происходить интенсивное выделение растворенного в воде H_2 , скопление которого в оборудовании РУ в концентрациях $>3\%$ является взрывоопасным. Для наиболее мощного источника выделения, возможного скопления и образования взрывоопасной концентрации H_2 – деаэратора предусмотрена спецсистема сбора и утилизации H_2 . Система дожигания водорода предназначена для каталитического окисления (сжигания) водорода в газовой смеси, поступающей из деаэратора подпитки, с целью предотвращения взрывоопасной концентрации водорода в системе спецгазоочистки (СГО).

Принцип работы системы дожигания водорода основан на широко известной химической реакции получения воды из кислорода и водорода. Главная особенность процесса заключается в том, что сжигание осуществляется на платиновом катализаторе типа ОПК-2:

Інформація про авторів:

Лис Степан Степанович, канд. техн. наук, ст. викладач, кафедра теплоенергетики, теплових і атомних електричних станцій.

Email: lysss@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0002-7359-1177>

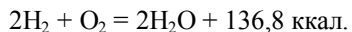
Юрасова Оксана Георгіївна, ст. викладач, кафедра теплоенергетики, теплових і атомних електричних станцій.

Email: oksjanichyk@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-9930-9152>

Шыкало Євген Петрович, студент, кафедра теплоенергетики, теплових і атомних електричних станцій. Email: lysss@ukr.net

Цитування за ДСТУ: Лыс С. С., Юрасова О. Г., Шыкало Е. П. Анализ надежности системы дожигания водорода в пределах реакторного отделения АЭС. Науковий вісник НЛТУ України. 2019, т. 29, № 5. С. 115–119.

Citation APA: Lys, S. S., Yurasova, O. H., & Shykalo, E. P. (2019). The Analysis of Reliability of the System of Hydrogen Burning Within NPP Reactor Compartment. *Scientific Bulletin of UNFU*, 29(5), 115–119. <https://doi.org/10.15421/40290523>



Для осуществления реакции горения необходимо поддерживать температуру среды на входе в катализатор не менее чем на 20 °С выше температуры насыщения паров воды. Использование платинового катализатора позволяет дожигать водород при концентрациях, значительно меньших предела взрывоопасности смеси, тем самым не допускается образование взрывоопасной концентрации водорода в газовой смеси, поступающей на СГО.

Установка дожигания водорода рассчитана таким образом, чтобы при каталитическом окислении молекулярного водорода из парогазовой смеси концентрация водорода в газовом потоке, направляемом на СГО, во всех режимах работы системы не превышала 1 % объемного (IE 121-3-25-E-RTc-2, 2018; NP 306.2.141-2008, 2008; Komarov & Skalozubov, 2011). Это достигается благодаря применению эффективного катализатора и создания соответствующих температурных и аэродинамических условий работы оборудования.

Анализ работы системы. Система функционирует во всех режимах нормальной эксплуатации блока, включая пуски и остановки, переходные режимы, а также при авариях, не связанных с разуплотнением первого контура или с потерей электропитания собственных нужд.

Технологическая схема представляет из себя совокупность трех подсистем, соединенных последовательно:

- подсистемы подачи выпара деаэратора подпитки первого контура к установке дожигания водорода;
- собственно установки дожигания водорода;
- подсистемы подачи невзрывоопасной парогазовой смеси в систему спецгазоочистки.

Подсистема подачи выпара деаэратора к установке дожигания водорода состоит из охладителя выпара, охладителя газов, двух буферных емкостей, соединенных между собой последовательно.

Установка дожигания водорода (рис. 1) включает в себя три параллельно подключенные газодувки TS11(12,13)D01, к напорному коллектору которых параллельно подключены две независимые взаимозаменяемые нитки дожигания водорода, каждая из которых состоит из электронагревателей (рабочего и резервного) TS14(15)W01 и контактных аппаратов TS14(15)B01, соединенных последовательно (IE 121-3-25-E-RTc-2, 2018). В состав каждого из контактных аппаратов входит электронагреватель TS14(15)W02. Подсистема подачи невзрывоопасной парогазовой смеси в систему спецгазоочистки состоит из теплообменника TS10W03, предохранительных клапанов TS10S24(25) и трубопровода, соединяющего систему дожигания с системой спецгазоочистки.

В системе предусмотрен бак-гидрозатвор TS10B03, предназначенный для сбора конденсата, образующегося в теплообменниках и буферных емкостях. Кроме того, для качественного удаления влаги из неконденсирующихся газов в основном тракте смонтирован влагоотделитель TS10B04, который имеет линию отвода образующегося конденсата в бак-гидрозатвор. Парогазовая смесь из деаэратора подпитки ТК10B01 с G до 130 кг/час и P до 0,12 МПа (абс) поступает в охладитель выпара TS10W01. Охлаждаясь водой промконтура, пар конденсируется, а отсепарированный конденсат отводится по трубопроводу Ø 18×2,5 в бак-гидрозатвор TS10B03, а из него по трубе Ø 38×2,5 сливается в бак организованных протечек ТУ20B01.

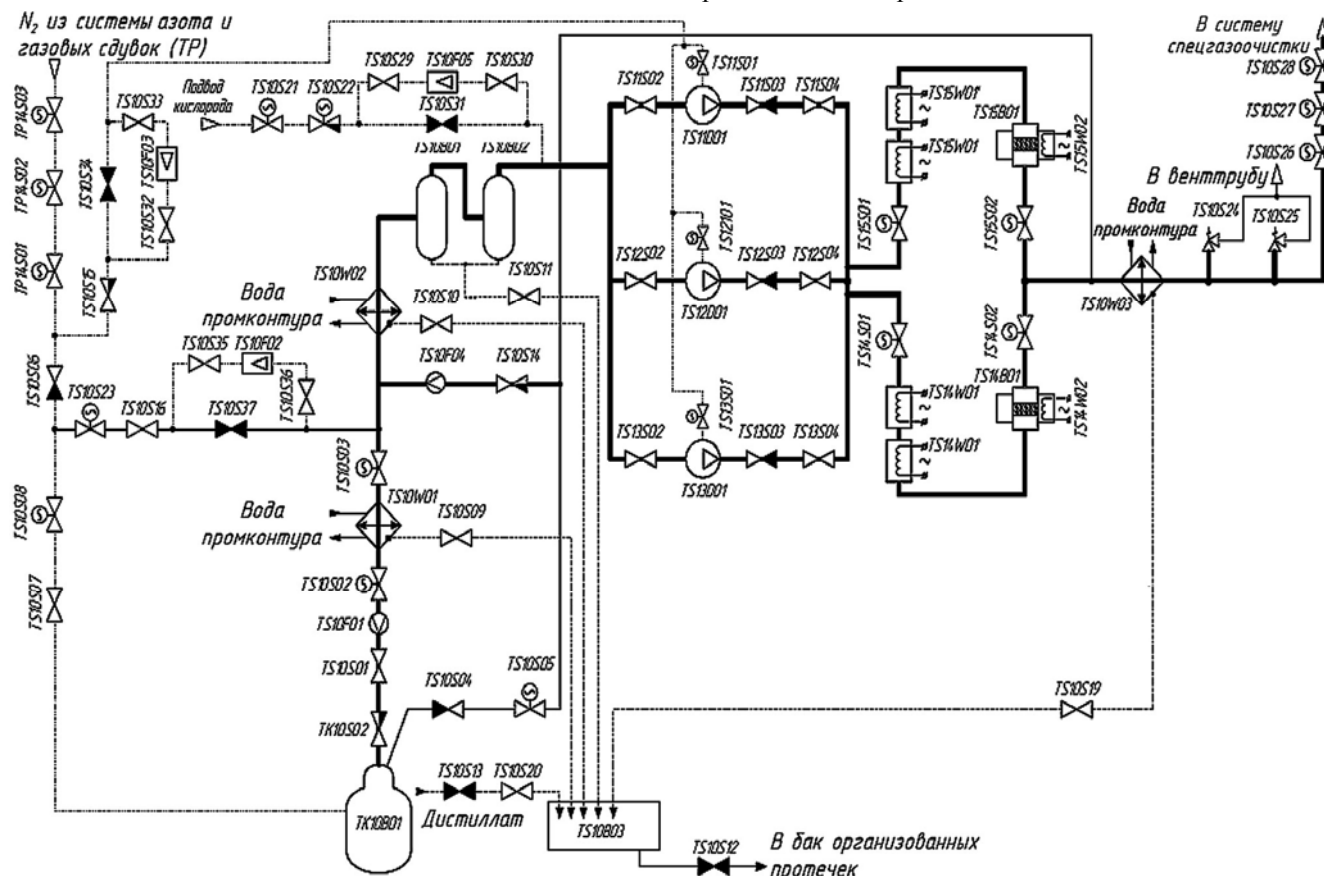


Рис. 1. Принципиальная схема системы дожигания водорода TS10

Неконденсирующиеся газы (кислород, азот, водород) направляются в охладитель газов TS10W02, охлаждаемый водой промконтра. Образующийся отсепарированный конденсат отводится по трубопроводу $\varnothing 18 \times 2,5$ в бак-гидрозатвор TS10B03, а из него по трубе $\varnothing 38 \times 2,5$ в бак оргпротечек TY20B01. В охладитель газов также поступает рециркулирующий поток газов.

Охладитель газов включен в циркуляционный контур системы дожигания водорода, который, кроме того, содержит буферные емкости, газодувки, электроподогреватели, контактные аппараты. В циркуляционном контуре с помощью газодувки создается циркуляция газовой смеси с расходом $\approx 155 \text{ м}^3/\text{час}$. В охладителе газов неконденсирующиеся газы смешиваются с циркулирующей газовой смесью. Вследствие этого смешения концентрация водорода в циркуляционном контуре в любом режиме не должна превышать 2 % (объемных).

Для сжигания водорода в контуре на всас газодувки дозируется воздух от системы сжатого воздуха UT (IE 121-3-25-E-RTc-2, 2018; NP 306.2.141-2008, 2008; Rivnenskaia AES, 2014). Узел подачи воздуха расположен на отм. 6,6 в пом. А326 (рис. 2).

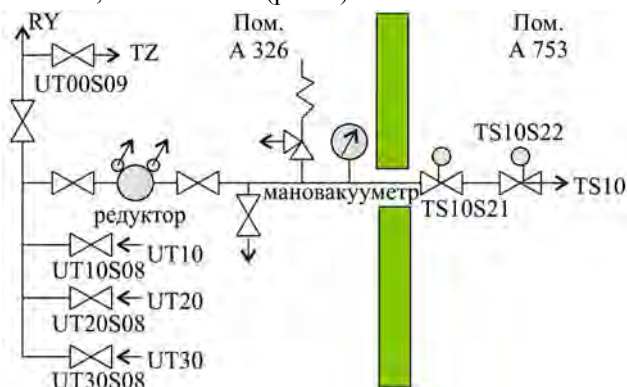


Рис. 2. Схема подачи сжатого воздуха в систему TS10 из системы сжатого воздуха UT на отм. 6,6

Газодувка нагнетает газ в электроподогреватель, в котором он нагревается до температуры $(130 \div 140)^\circ\text{C}$ и далее поступает в контактный аппарат, где на катализаторе происходит окисление водорода по следующей формуле: $2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O} + 136,8 \text{ ккал}$.

После контактного аппарата большая часть невзрывоопасной парогазовой смеси направляется вновь в циркуляционный контур для разбавления пара деаэрата, а часть смеси, равная пару деаэрата, направляется в систему СГО, предварительно охлаждаясь водой промконтра в теплообменнике TS10W03. Из теплообменников и буферных емкостей образующийся конденсат отводится в бак-гидрозатвор TS10B03.

При нормальной эксплуатации системы в работе находятся одна газодувка, один электроподогреватель и один контактный аппарат. Вторая нитка находится в резерве. На случай превышения давления газа в системе выше допустимого предусмотрен сброс газа в вентрибу через предохранительные клапаны прямого действия TS10S24,25 ($P_{\text{сраб}} = 0,5 \text{ кгс/см}^2$, $P_{\text{посадки}} = 0,14 \text{ кгс/см}^2$), установленных на трубопроводе после TS10W03 на СГО.

Нормальное функционирование системы. Система дожигания водорода функционирует в режимах нормальной эксплуатации энергоблока, включая переходные режимы, а также при авариях, не связанных с разуплотнением первого контура или с потерей электро-

питания собственных нужд. Парогазовая смесь из деаэрата подпитки TK10B01 с расходом, определяемым режимом продувки первого контура, по трубопроводу поступает в межтрубное пространство охладителя выпара TS10W01, где пар конденсируется. Образовавшийся конденсат отводится по трубопроводу через бак-гидрозатвор в бак организованных протечек, а неконденсирующиеся газы, содержащие водород, поступают в контур циркуляции системы дожигания водорода и смешиваются с циркулирующими в нем газами, основным компонентом которых является азот. Расход газов в циркуляционном контуре системы TS10 значительно превышает расход газов, поступающих из TK10B01, и газовая смесь разбавляется до взрывобезопасной концентрации (Data Basic, 1999; Rivnenskaia AES, 2014).

Образующаяся смесь поступает в охладитель газа TS10W02, где охлаждается до температуры 40°C (313 K) и далее, через буферные емкости TS10B01,02, предназначенные для обеспечения нормальной работы систем контроля и регулирования, забирается рабочей газодувкой TS11(12,13)D01. На всас газодувки подводится кислород, необходимый для сжигания водорода. Газовая смесь рабочей газодувкой расходом 55 л/с подается на электронагреватель TS14(15)W01, где она нагревается до температуры $120\text{--}140^\circ\text{C}$ ($393\text{--}413 \text{ K}$), и далее на контактный аппарат, в котором в присутствии катализатора окисляется (сжигается) водород с выделением тепла. Необходимый для проведения реакции окисления кислород подается с расходом $1 \text{ м}^3/\text{ч}$ (при нормальных условиях).

В зависимости от концентрации водорода в газе температура внутри контактного аппарата может быть $150\text{--}330^\circ\text{C}$ ($423\text{--}603 \text{ K}$). После контактного аппарата большая часть невзрывоопасной парогазовой смеси направляется вновь в циркуляционный контур для разбавления пара деаэрата, а часть смеси, равная пару деаэрата, направляется в систему спецгазоочистки, предварительно охлаждаясь водой промконтра в теплообменнике T10W03, после чего направляется в систему газовой очистки. Максимальный расход водорода, поступающего на установку дожигания, составляет $3,79 \text{ м}^3/\text{ч}$ в режиме вывода бора. При нормальной эксплуатации системы в работе находятся одна газодувка, один электронагреватель и один контактный аппарат. Вторая нитка находится в горячем резерве. Электронагреватель контактного аппарата резервной нитки включен и поддерживает температуру катализатора не ниже 120°C (393 K). На случай превышения давления газа в системе выше допустимого предусмотрен сброс в вентрибу через предохранительные клапаны прямого действия.

При работе на мощности допускается вывод в ремонт одной нитки системы сроком на восемь часов. Если работоспособность этой нитки не восстановлена в течение указанного времени или неработоспособны две нитки системы, энергоблок должен быть переведен в "горячее" или "холодное" состояние, и вывод теплоносителя из первого контура должен быть снижен до минимума (Czech et al., 1999; Data Basic, 1999).

Переход с рабочей нитки на резервную производится:

- в случае выхода из строя оборудования рабочей нитки, препятствующего дальнейшей эксплуатации системы;

- при нарушениях технологического режима, приводящих к недопустимым отклонениям рабочих параметров;
- по графику работы оборудования для равной выработки.

Функционирование системы при отказах. Перечень отказов в системе приведен в таблице. Как видно из таблицы, наиболее опасными отказами в системе являются разрывы всасывающего коллектора газодувки, буферных емкостей, или всасывающего трубопровода рабочей газодувки, поскольку для данных отказов проектом не предусмотрены средства по оперативной их диагностике и автоматическому отключению оборудования системы. Опасность указанных отказов заключа-

ется в том, что после их возникновения взрывоопасный радиоактивный выпар из деаэратора будет поступать через образовавшийся разрыв в технологические помещения системы. При этом рабочая газодувка будет продолжать работать, забирая на установку дожигания воздух из помещения, где произошел разрыв до тех пор, пока оператор, проанализировав полученную информацию, не выведет систему из работы. Увеличение активности воздуха в помещении при разрыве напорного коллектора не превосходит допустимого значения для выброса.

Таблица. Перечень отказов в системе

Наименование	Характер изменения, влияющего на безопасность	Проектные мероприятия по преодолению отказа	Последствия отказа для системы	Опасность отказа для АЭС	Воздействие на работоспособность других систем
Отказ рабочей газодувки	Снижение расхода в системе	Включение резервной газодувки по АВР	Система функциональных свойств не теряет	Не представляет	Отсутствует
Отказ одного из элементов рабочей нитки установки сжигания водорода*)	Отказ в работе основной нитки	Переход на резервную нитку. При отказе рабочего электронагревателя рабочей нитки предусмотрено также автоматическое включение резервного электронагревателя той же рабочей нитки	Система функциональных свойств не теряет	Не представляет	Отсутствует
Разрыв трубопровода сдувки после установки дожигания водорода	Сдувки не проходят очистки	Останов системы до устранения разрыва	Система теряет функциональные свойства	Энергоблок подлежит расхолаживанию и останову. Сдувки поступают в систему вытяжной вентиляции и далее в венттрубу	Остановка энергоблока. Увеличение расхода в системе вытяжной вентиляции
Разрыв всасывающего коллектора газодувки либо буферных емкостей, либо всасывающего трубопровода рабочей газодувки	Повышение концентрации кислорода, увеличение активности воздуха рабочих помещений	Оператор получает следующую информацию: – сигнализация о повышении концентрации кислорода в трубопроводе рециркуляции более 3 %; – снижение концентрации водорода перед контактными аппаратами; – увеличение активности воздуха рабочих помещений	Система теряет функциональные свойства и должна быть выведена из работы	Энергоблок должен быть остановлен	Остановка энергоблока
Разрыв напорного коллектора либо напорного трубопровода рабочей газодувки	Снижение расхода через оборудование системы	По сигналу снижения расхода по трубопроводу рециркуляции срабатывает блокировка по: – отключению рабочей газодувки; – включению резервной газодувки с последующим ее отключением	Система теряет функциональные свойства	Возможно повышение активности в воздухе помещений. Энергоблок должен быть остановлен	Остановка энергоблока

Примечание: *Отказы включают также и ошибки персонала

Отказом системы является событие, состоящее в невозможности отвода и дожигания газообразного водорода, выделяющегося в деаэраторе подпитки первого контура.

Надежность работы системы обеспечивается:

- наличием трех газодувок (две из которых резервные);
- возможностью стопроцентной замены электронагревателей;
- наличием двух взаимозаменяемых ниток;
- постоянным контролем концентрации водорода в системе;
- автоматическим контролем за состоянием системы;
- наличием резервного вида управления, в дополнение к автоматическому.

В соответствии с результатами ВАБ (Rivnenskaia AES, 2014), параметры надежности системы не оказывают значимого влияния на целевые показатели безопасности, определенные в ОПБ-2008 (NP 306.2.141-2008, 2008).

Выводы. Выполненный анализ работы системы дает возможность сделать вывод, что система отвечает предъявляемым к ней требованиям:

- обеспечивает снижение концентрации водорода в выпаре деаэратора подпиточной воды до взрывобезопасной;
- обеспечивает поддержание концентрации водорода в циркуляционном контуре не более 3 % (объемных) в любом режиме вывода теплоносителя.

Перелік використаних джерел

- Czech, J., Wirkner, J., Yvon, M., et al. (1999). European pressurized water reactor: safety objectives and principles. *Nuclear Engineering and Design*, 187, 25–32. [https://doi.org/10.1016/S0029-5493\(98\)00255-6](https://doi.org/10.1016/S0029-5493(98)00255-6)
- Data Basic. (1999). VIC Library Cataloguing in Publication Data Basic safety principles for nuclear power plants: 75-INSAG-3 rev. 1/a report by the International Nuclear Safety Advisory Group. – Vienna: International Atomic Energy Agency.

IE 121-3-25-E-RTc-2. (2018). Instrukcii po ekspluatatsii. Sistema dozhiganiia vodoroda. Sistema normalnoi ekspluatatsii, vazhnaia dlia bezopasnosti. Blok № 3. [In Russian].
Komarov, Iu. A., & Skalozubov, V. I. (2011). Analiz prioritetnosti vnedreniia modernizatsii i meropriatii po povysheniiu bezopasnosti AES risk-orientirovannymi metodami. *Problemi bezpeki atomnykh elektrostantsii i Chornobilia: nauk.-tekhn. zb.*, 16, 53–60. [In Russian].

NP 306.2.141-2008. (2008). Zahalni polozhennia bezpeky atomnykh stantsii (zi zminamy 2011 ya.). DKYaR Ukrainy. [In Ukrainian].
Rivnenskaia AES. (2014). 22.3.133.OB.12 (38-264.203.056.OB.00). Energoblok №3. Otchet po analizu bezopasnosti. Uchet polnogo spektra iskhodnykh sobytii dlia vsekh reglamentnykh sostoianii RU i BV v VAB, razrabotka operativnogo VAB. Itogovi otchet. OOO "Energorisk". [In Russian].

S. S. Lys, O. H. Yurasova, E. P. Shykalo
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

THE ANALYSIS OF RELIABILITY OF THE SYSTEM OF HYDROGEN BURNING WITHIN NPP REACTOR COMPARTMENT

The hydrogen afterburner system is designed for the catalytic oxidation of hydrogen in a gas mixture coming from the make-up deaerator in order to prevent an explosive mixture of hydrogen and oxygen. The principle of operation of the system is based on the well-known reaction of obtaining water from oxygen and hydrogen. The basis of the system design was taken to ensure the reliability of the system in normal operation, violations of normal operation and accidents that are not associated with the decompression of the primary circuit. For this purpose, gas recirculation in the circulation circuit, buffer tanks, reservation of the most critical sections of the scheme (gas blowers, electric heaters, and contact devices) are provided. The failure of the system is an event consisting in the impossibility of diverting and post-burning of gaseous hydrogen released in the deaerator of the primary circuit feed. It is established that the reliability of the system is ensured by the following factors: the presence of three gas blowers (two of which are backup); the possibility of one hundred percent replacement of electric heaters; the presence of two interchangeable threads; constant monitoring of the hydrogen concentration in the system; automatic control of the system; availability of a backup type of control, in addition to the automatic one. In accordance with the results of probabilistic safety analysis (PSA), the reliability parameters of the system do not have a significant impact on the safety targets. It has been established that the most dangerous failures in the system are gaps in the intake manifold of gas blowers, buffer tanks, or the intake pipe of the working gas blower, since the project does not provide for these diagnostics and automatic shutdown of the system equipment. The danger of these failures is that after their occurrence, an explosive radioactive vapour from the deaerator will flow through the gap to the process rooms of the system. At the same time, the working gas blower will continue to work, taking the air from the room where the gap occurred to the afterburner until the operator, after analyzing the information received, takes the system out of operation. The analysis of the work of the system allows us to conclude that the system meets the requirements for it which are as follows: it reduces the concentration of hydrogen in the vaporizer of the make-up deaerator until it is explosion-proof; ensures that the concentration of hydrogen in the circulation circuit is maintained at no more than 3 % (volume) in any mode of withdrawal of the coolant.

Keywords: hydrogen afterburner systems; reactor compartment; primary circuit; probabilistic safety analysis.

S. S. Lys, O. G. Yurasova, E. P. Shykalo
Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна

АНАЛІЗ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМИ ДОПАЛЮВАННЯ ВОДНЮ В МЕЖАХ РЕАКТОРНОГО ВІДДІЛЕННЯ АЕС

Система допалювання водню призначена для каталітичного окислення водню в газовій суміші, що надходить з деаератора підживлення для запобігання вибухонебезпечній суміші водню з киснем. Принцип роботи системи базується на широко відомій реакції отримання води з кисню і водню. В основу проектування системи покладено забезпечення надійності роботи системи в режимах нормальної експлуатації, порушень нормальної експлуатації та аварій, не пов'язаних із розушільненням першого контуру. Для цього передбачені рециркуляція газу в циркуляційному контурі, буферні ємності, резервування найбільш відповідальних ділянок схеми (газовулки, електронагрівачі, контактний апарат). Відмовою системи є подія, яка полягає у неможливості відводу і допалюванні газоподібного водню, що виділяється в деаератори підживлення першого контуру. Встановлено, що надійність роботи системи забезпечується: наявністю трьох газодувок (дві з яких резервні); можливістю стовідсоткової заміни електронагрівачів; наявністю двох взаємозамінних ниток; постійним контролем концентрації водню в системі; автоматичним контролем за станом системи; наявністю резервного управління, на додаток до автоматичного. Відповідно до результатів імовірнісного аналізу безпеки (ІАБ), параметри надійності системи не мають значного впливу на цільові показники безпеки.

Ключові слова: системи допалювання водню; реакторне відділення; перший контур; імовірнісний аналіз безпеки.