ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИССЛЕДОВАНИЯ, РАСЧЕТЫ

<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2018-11-4-305-310>

УДК 614.83: 614.84: 621.039: 62-622: 629.039.58

Методика оценки годового риска от поломок, пожаров и взрывов на основе графов состояний в электролизных цехах

Аминов Р. З.^{1,2}, Бурденкова Е. Ю.^{1,2}, Портянкин А. В.^{2*}

¹ Саратовский научный центр Российской Академии наук
ул. Политехническая, 77, 410054, г. Саратов, Россия

² ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.»
ул. Политехническая, 77, 410054, г. Саратов, Россия

Поступила / Received 10.07.2018

Принята к печати / Accepted for publication 14.12.2018

Представлена методика оценки возможного годового риска, который может понести водородная надстройка на атомной электрической станции (АЭС) при производстве взрывопожароопасного водорода. При соблюдении правил безопасности по условиям получения, хранения, транспортировки и использования водорода можно минимизировать случаи взрывопожароопасных ситуаций на водородной надстройке. Плановые и капитальные ремонты с проведением всех диагностик аналогичным образом снижают аварийные ситуации и отказы оборудования. Однако существует вероятность нахождения оборудования в том или ином состоянии (поломка, пожар и взрыв), произошедшие в результате утечек водорода. Разгерметизация оборудования с утечкой взрывоопасного водорода в закрытых помещениях с наложением неблагоприятных сопутствующих факторов может привести к разрушению электролизного цеха в результате пожара и взрыва. С помощью графа состояний оценены вероятности выхода из строя электролизного оборудования по причинам внеплановых поломок и возможных пожаров или взрывов в закрытых помещениях из-за разгерметизации оборудования. Для этого рассмотрены возможные сценарии поломок электролизера в одном и двух цехах. В расчетах графа состояний составлялась система линейных уравнений для установившихся значений. Расчеты показали, что при компоновке с двумя электролизными цехами растет возможный годовой риск. Минимизировать годовой риск можно за счет форсирования мощности оставшийся в работе электролизной установки путем повышения ее производительности по водороду и кислороду. Эффект будет достигаться только в том случае, если себестоимость электроэнергии от АЭС не будет превышать 0,81 руб/кВт·ч при пиковом тарифе на электроэнергию 3,5 руб/кВт·ч.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: атомная электростанция, отказ, поломка, взрыв, пожар, риск

Благодарности

Статья подготовлена при поддержке РНФ, грант № 15-19-10027.

Адрес для переписки:

Портянкин А. В.
ФГБОУ ВО СГТУ имени Гагарина Ю. А., кафедра ТАЭ
ул. Политехническая, 77, 410054, г. Саратов, Россия
e-mail: portyankinav1982@rambler.ru

Для цитирования:

Аминов Р. З., Бурденкова Е. Ю., Портянкин А. В. Методика оценки годового риска от поломок, пожаров и взрывов на основе графов состояний в электролизных цехах. Надежность и безопасность энергетики. 2018. – Т. 11, № 4. – С. 305 – 310
<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2018-11-4-305-310>

Address for correspondence:

Portyankin A. V.
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Department TAE
Polytechnic Str., 77, 410054, Saratov, Russia
e-mail: portyankinav1982@rambler.ru

For citation:

Aminov R. Z., Burdenkova E. Yu., Portyankin A. V. [Method of estimation of annual risk from breaks, fires and explosions on the basis of state graphs in electrolysis plants]. Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki = Safety and Reliability of Power Industry. 2018, vol. 11, no. 4, pp. 305 – 310 (in Russian).
<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2018-11-4-305-310>

Method of estimation of annual risk from breaks, fires and explosions on the basis of state graphs in electrolysis plants

Aminov R. Z.^{1,2}, Burdenkova E. Yu.^{1,2}, Portyankin A. V.^{2*}

¹ Saratov Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
Polytechnic Str., 77, 410054, Saratov, Russia

² Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
Polytechnic Str., 77, 410054, Saratov, Russia

A method is presented for estimating the possible annual risk that a hydrogen superstructure at a nuclear power plant (NPP) may have in the production of explosive hydrogen. With the observance of safety rules in terms of receiving, storing, transporting and using hydrogen, it is possible to minimize the occurrence of fire and explosion hazard situations on the hydrogen superstructure. Scheduled repair and overhauls with all diagnostics reduce emergencies and equipment failures in the same way. However, there is a likelihood for the equipment to be found in an abnormal state (breakdown, fire and explosion) as a result of hydrogen leaks. Depressurization of equipment with leakage of explosive hydrogen in enclosed spaces concurrently with adverse attendant factors may lead to the destruction of the electrolysis plant due to fire and explosion. With the help of the state graph, the probabilities of a failure of electrolysis equipment because of unplanned breakdowns and possible fires or explosions indoors due to depressurization of equipment are estimated. To this effect, possible scenarios of breakdowns of the electrolyzer in one and two workshops are considered. In the calculations of the state graph, a system of linear equations was composed for steady-state values only. The calculations have shown that for a configuration involving two electrolysis plants, the possible annual risk would increase. Minimizing the annual risk can be achieved through boosting the capacity of the electrolysis plant still in operation by increasing its productivity in hydrogen and oxygen. The effect will only be achieved if the cost of electricity from nuclear power plants is kept within 0.81 rubles/(kW·h) with a peak electricity tariff at 3.5 rubles/(kW·h).

KEYWORDS: nuclear power plant, failure, breakdown, explosion, fire, risk

Acknowledgments

The article was prepared with the support of the Russian Science Foundation, grant No. 15-19-10027.

Одной из возможных причин отказа строительства водородных надстроек на территории атомной электрической станции (АЭС) является производство на ней взрывопожароопасного водорода, который воспламеняется и детонирует в смеси с окислителем. При соблюдении правил безопасности [1] по условиям получения, хранения, транспортировки и использования водорода можно минимизировать случаи взрывопожароопасных ситуаций на водородной надстройке. Плановые и капитальные ремонты с проведением всех диагностик аналогичным образом снижают аварийные ситуации и отказы оборудования. Однако существует вероятность нахождения оборудования в том или ином состоянии (поломка, пожар и взрыв), произошедшие в результате утечек водорода [2–7].

Оценим возможный годовой риск на примере электролизных цехов, который может понести водородная надстройка на АЭС. Компоновка электролизного цеха с одной электролизной установкой большой единичной мощности снижает удельные капиталовложения в ее сооружение. В случае поломки электролизного оборудования водородная надстройка будет неработоспособна в период восстановительных ремонтных работ.

Отказ оборудования может возникнуть по следующим причинам:

1. Поломка электролизного оборудования, включающая в себя в том числе отказ в запуске на выработку кислорода и водорода и разгерметизацию с выходом

взрывоопасного водорода;

2. Пожар в электролизном цехе;

3. Взрыв в электролизном цехе.

Поломки, пожары и взрывы повышают годовые затраты на проведение внеплановых и восстановительных ремонтов, в том числе снижают годовую выработку электроэнергии паротурбинной установкой водородной надстройки.

Для оценки годового риска достаточно знать вероятность события отказа. В связи с тем, что затраты на внеплановый ремонт по причине поломок электролизного оборудования и затраты на восстановительные работы после пожара и взрыва весьма различны, необходимо знать вероятность каждого события в отдельности.

Произведем расчет вероятностей данных событий с помощью графов состояний, представленных на рисунке 1.

При параллельной работе двух электролизных цехов возможны следующие сценарии развития событий по прекращению выработки водорода и кислорода:

1. Выход из строя одного из двух цехов и далее поломка оборудования во втором цехе — «поломка-поломка»;

2. Выход из строя одного из двух цехов и далее пожар во втором цехе — «поломка-пожар»;

3. Выход из строя одного из двух цехов и далее взрыв во втором цехе — «поломка-взрыв»;

4. Пожар в одном из двух цехов и далее поломка обо-

Рисунок 1. Графы состояний при компоновке с одним электролизным цехом: а — при поломке оборудования; б — при пожаре в цехе; с — при взрыве в цехе; $\lambda_{pol.}$, $\lambda_{pozh.}$, $\lambda_{vz.}$ — интенсивности отказов события, ч⁻¹; $\mu_{pol.}$, $\mu_{pozh.}$, $\mu_{vz.}$ — интенсивности восстановления оборудования, ч⁻¹; $P_{0(pol.)}$, $P_{0(pozh.)}$, $P_{0(vz.)}$ — вероятность нахождения системы в рабочем состоянии; $P_{1(pol.)}$, $P_{1(pozh.)}$, $P_{1(vz.)}$ — вероятность системы нахождения в нерабочем состоянии

Figure 1. State graphs when assembling with one electrolysis shop: а — in case of equipment breakage; б — in case of fire in the shop; с — explosion in the shop; $\lambda_{pol.}$, $\lambda_{pozh.}$, $\lambda_{vz.}$ — the intensity of the refusal event, hour⁻¹; $\mu_{pol.}$, $\mu_{pozh.}$, $\mu_{vz.}$ — the intensity of recovery of equipment, hour⁻¹; $P_{0(pol.)}$, $P_{0(pozh.)}$, $P_{0(vz.)}$ — the probability of finding the system in working order; $P_{1(pol.)}$, $P_{1(pozh.)}$, $P_{1(vz.)}$ — the probability of a system in an idle state

рудования во втором цехе — «пожар-поломка»;

5. Пожар в одном из двух цехов и далее пожар во втором цехе — «пожар-пожар»;

6. Пожар в одном из двух цехов и далее взрыв во втором цехе — «пожар-взрыв»;

7. Взрыв в одном из двух цехов и далее поломка оборудования во втором цехе — «взрыв-поломка»;

8. Взрыв в одном из двух цехов и далее пожар во втором цехе — «взрыв-пожар»;

9. Взрыв в одном из двух цехов и далее взрыв во втором цехе — «взрыв-взрыв».

Сценарии «пожар-пожар» и «взрыв-взрыв» аналогичны графам состояний на рисунке 2 при подстановке интенсивности отказов и восстановления оборудования при пожарах и взрывах.

Так как время на восстановление электролизного оборудования при пожаре в электролизном цехе существенно больше времени на внеплановый ремонт при сценарии «поломка-пожар», то графы состояния будут выглядеть так, как представлено на рисунке 3.

В данном случае при переходе системы в нерабочее

Рисунок 2. Графы состояний при компоновке с двумя электролизными цехами «поломка-поломка»: $P_{0(pol.*)}$ — вероятность работы двух электролизных цехов; $P_{1(pol.*)}$ — вероятность выхода из строя одного из двух электролизных цехов; $P_{2(pol.*)}$ — вероятность системы нахождения в нерабочем состоянии из-за поломки второго электролизера

Figure 2. State graphs when assembling with two electrolysis shops «breakage-breakage»: $P_{0(pol.*)}$ — probability of operation of two electrolysis shops; $P_{1(pol.*)}$ — the probability of failure of one of the two electrolysis shops; $P_{2(pol.*)}$ — the probability of the system being in the inoperative state due to the breakage of the second cell

Рисунок 3. Графы состояний при компоновке с двумя электролизными цехами «поломка-пожар»: $P_{2(pozh.*)}$ — вероятность системы нахождения в нерабочем состоянии из-за пожара во втором цехе

Figure 3. State graphs when assembling with two electrolysis shops «breakage-fire»: $P_{2(pozh.*)}$ — the probability of a system of being in a non-operating condition due to a fire in the second shop

состояние один электролизный цех будет восстанавливаться после пожара, а второй перейдет в состояние, представленное на рисунке 1.

На рисунке 4 представлены графы состояний для сценария «пожар-поломка».

Сценарии «поломка-взрыв» и «пожар-взрыв» можно оценивать по рисунку 3, а сценарии «взрыв-поломка» и «взрыв-пожар» — по рисунку 4.

Рисунок 4. Графы состояний при компоновке с двумя электролизными цехами «пожар-поломка»: $P_{1(pozh.*)}$ — вероятность пожара в одном из двух электролизных цехов.

Figure 4. State graphs when assembling with two electrolysis shops «fire-breakage»: $P_{1(pozh.*)}$ — the probability of a fire in one of the two electrolysis shops.

В расчетах графа состояний будем искать решение только для установившегося значения, составив систему линейных уравнений по рисунку 1:

$$\begin{cases} -\lambda \cdot P_0 + \mu \cdot P_1 = 0 \\ \lambda \cdot P_0 - \mu \cdot P_1 = 0 \\ P_0 + P_1 = 1 \end{cases}.$$

Аналогичным образом составлялись уравнения по рисункам 2–4.

Наработка на отказ электролизного оборудования оценивается в 11500 часов, тогда интенсивность отказов $\lambda_{отк.}$ будет равна $8,69 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}$. Интенсивность разгерметизации оборудования $\lambda_{раз.}$ работающего под давлением, оценивается в среднем $1,42 \cdot 10^{-9} \text{ ч}^{-1}$ [8–9]. Интенсивность поломок в электролизных цехах будет равна:

$$\lambda_{pol.} = \lambda_{отк.} + \lambda_{раз.}$$

Разгерметизация оборудования с утечкой взрывоопасного водорода в закрытом помещении с наличием неблагоприятных сопутствующих факторов может привести к разрушению электролизного цеха по причине пожара и взрыва.

Из анализа крупных промышленных аварий, связанных с утечкой большой массы водорода в закрытых помещениях и на открытой местности, можно сделать вывод, что вероятности взрыва и пожара при отсутствии датчиков по содержанию водорода в зданиях оцениваются в 9% и 88% соответственно [8–11]. В 3% случаев при разгерметизации оборудования процессы протекают без горения, дефлаграции и детонации. Так как при разгерметизации оборудования под высоким давлением происходит физический взрыв с выделением энергии, то большая его часть переходит в основном в энергию ударной волны и кинетическую энергию осколков. При невоспламенении высвободившегося водорода в смеси с воздухом, находящегося в электролизном цехе, предусмотрены автоматические защиты по срабатыванию на содержание в помещении водорода, вероятность несрабатывания которых оценивается в 1%. Тогда по [10, 11] можно оценить интенсивность пожаров и взрывов, которые будут равны $\lambda_{позж.} = 1,25 \cdot 10^{-11} \text{ ч}^{-1}$ и $\lambda_{вз.} = 1,28 \cdot 10^{-12} \text{ ч}^{-1}$ соответственно. Интенсивность восстановления оборудования после поломок, пожаров и взрывов приняты $\mu_{pol.} = 1,67 \cdot 10^{-2} \text{ ч}^{-1}$ $\mu_{позж.} = 4,762 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1}$ и $\mu_{вз.} = 4,762 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$.

Результаты расчетов вероятностей нахождения оборудования в различных состояниях представлены в таблице 1.

Как видно из таблицы 1, вероятность выхода одного из двух электролизных цехов возрастает практически в два раза по отношению к компоновке с одним электролизным цехом. Наибольшая вероятность выхода второго цеха в период восстановительных работ оценивается в сценарии «поломка-поломка». В практических расчетах можно исключить состояния, вероятности которых оцениваются меньше, чем 10^{-10} .

Поэтому в расчетах годового риска для двух цехов использовались следующие вероятности: $P_{I(pol.*)} = 0,01$, $P_{2(pol.*)} = 2,68 \cdot 10^{-5}$, $P_{I(позж.*)} = 5,25 \cdot 10^{-9}$ и $P_{I(вз.*)} = 5,37 \cdot 10^{-9}$.

Риск от внеплановых поломок, в том числе от взрывов и пожаров, оценивается:

– при компоновке с одним цехом

$$R_{(pol.)} = P_{I(pol.)} \cdot I_{rem.},$$

$$R_{(позж.)} = P_{I(позж.)} \cdot I_{позж.},$$

$$R_{(вз.)} = P_{I(вз.)} \cdot I_{вз.},$$

Таблица 1. Вероятности нахождения оборудования в различных состояниях

Table 1. Probabilities of equipment being in a different state

Сценарии развития события Scenarios for the development of the event	Вероятности состояний нахождения оборудования в различных состояниях* Probabilities of states of equipment being in different states*		
	P ₀	P ₁	P ₂
поломка breakage	0,9948	0,0052	–
пожар fire	0,9999	$2,62 \cdot 10^{-9}$	–
взрыв explosion	0,9999	$2,68 \cdot 10^{-9}$	–
поломка-поломка breakage-breakage	0,9896	0,01	$2,68 \cdot 10^{-5}$
поломка-пожар breakage-fire	0,9896	0,01	$2,7 \cdot 10^{-11}$
поломка-взрыв breakage-explosion	0,9896	0,01	$2,76 \cdot 10^{-11}$
пожар-поломка fire-breakage	0,9999	$5,25 \cdot 10^{-9}$	$2,73 \cdot 10^{-11}$
пожар-пожар fire-fire	0,9999	$5,25 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-17}$
пожар-взрыв fire-explosion	0,9999	$5,25 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-17}$
взрыв-поломка explosion-breakage	0,9999	$5,37 \cdot 10^{-9}$	$2,79 \cdot 10^{-11}$
взрыв-пожар explosion-fire	0,9999	$5,37 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-17}$
взрыв-взрыв explosion-explosion	0,9999	$5,37 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-17}$

* Результаты расчета вероятностей нахождения оборудования в различных состояниях представлены округленными, так как многие численные значения отличаются в девятом знаке после запятой.

* The results of calculating the probabilities of finding equipment in different states are presented as rounded, since many numerical values differ in the ninth decimal place.

где $I_{rem.}$ — годовые издержки на плановые и капитальные ремонты оборудования, руб/год; $I_{poz.}$ — годовые издержки на восстановление оборудования после пожара, руб/год; $I_{vz.}$ — годовые издержки на восстановление электролизного цеха после взрыва, руб/год.

– при компоновке с двумя цехами

$$R_{(pol.*)} = P_{1(pol.*)} \cdot I_{1(rem.*)} + P_{2(pol.*)} \cdot I_{2(rem.*)} = (P_{1(pol.*)} + P_{2(pol.*)}) \cdot I_{1(rem.*)},$$

$$R_{(poz.*)} = P_{1(pozh.*)} \cdot I_{poz.},$$

$$R_{(vz.*)} = P_{1(vz.*)} \cdot I_{vz.},$$

где $I_{1(rem.)} = I_{2(rem.)}$ — годовые издержки на плановые и капитальные ремонты оборудования для первого и второго электролизного цеха, руб/год.

Годовые издержки на плановые и капитальные ремонты оборудования рассчитывались как 3% от капиталовложений в электролизный цех, мощность которого равна 200 МВт, а удельные капиталовложения в его сооружение равны 20 млн. руб/МВт. Удельные капиталовложения в сооружение двух цехов равны 22 млн. руб/МВт. При возможных взрывах в электролизных цехах происходит обрушение кровли и разрушение электролизного оборудования, поэтому годовые издержки от взрывов оцениваются как сооружение нового цеха. Последствия пожара могут быть также разрушительны, как и последствия после взрыва, но с применением автоматизированных средств пожаротушения годовые затраты от пожара оцениваются в 1% от годовых затрат в последствиях взрыва.

Риск от неполучения денежных средств от продажи электроэнергии в часы максимума графика электрической нагрузки:

– при компоновке с одним цехом

$$R_{(e/e)} = (P_{1(pol.)} + P_{1(pozh.)} + P_{1(vz.)}) \cdot B_{(e/e)},$$

где $B_{(e/e)}$ — возможная выручка продажи электроэнергии от паротурбинной установки (ПТУ) водородной надстройки, руб/год.

– при компоновке с двумя цехами одна электролизная установка обеспечивает 50% мощности ПТУ водородной надстройки

$$R_{(e/e*)} = (P_{1(pol.*)} + P_{1(pozh.*)} + P_{1(vz.*)}) \cdot B_{1(e/e)},$$

Таблица 2. Годовые риски

Table 2. Annual risks

Количество цехов Number of shop	Риски, руб/год Risks, rubles/year				
	$R_{(pol.)}$	$R_{(pozh.)}$	$R_{(vz.)}$	$R_{(e/e)}$	$\Sigma R_{(god)}$
один one	621208,8	0,11	10,7	1902453,8	2523673,41
два two	681560,9	0,12	11,8	1897529,5	2579102,32
$\Delta R = \Sigma R_{(god*)} + \Sigma R_{(god)}$	60352,1	0,01	1,1	-4924,3	55428,91

где $B_{1(e/e)} = B_{2(e/e)} = 0,5 \cdot B_{(e/e)}$ — возможная выручка продажи электроэнергии от ПТУ водородной надстройки для первого и второго электролизного цеха, руб/год.

При расчете годовой выручки от продажи электроэнергии учитывались плановые и капитальные ремонты оборудования, равные 65 суткам, тогда число эффективных суток работы в году составят 300 сут. Мощность отпускаемой электроэнергии потребителю от ПТУ водородной надстройки равна 50 МВт. Время работы ПТУ в пиковые часы суточного графика электрической нагрузки равно 7 часам.

Годовой риск оценивался при компоновке с одним и двумя электролизными цехами:

$$\Sigma R_{(god)} = R_{(pol.)} + R_{(pozh.)} + R_{(vz.)},$$

$$\Sigma R_{(god*)} = R_{(pol.*)} + R_{(pozh.*)} + R_{(vz.*)}.$$

Результаты расчетов годовых рисков представлены в таблице 2.

Как видно из таблицы 2, годовой риск от поломок, пожаров и взрывов для двух электролизных цехов повышается только за счет увеличения ремонтных затрат, так как повышаются капитальные вложения в их сооружение по сравнению с компоновкой с одним цехом, но уменьшается риск от недовыработки, так как один цех обеспечивает 50% мощности вырабатываемой ПТУ. В итоге суммарный годовой риск для двух цехов увеличивается на 55428,91 руб/год.

Наибольший вклад в суммарный годовой риск вносит риск от недовыработки электроэнергии. На его долю приходится 75,4% с одним цехом и 73,6% с двумя электролизными цехами.

Можно форсировать мощность оставшейся в работе электролизной установки дополнительно на 40% — $\Delta N_{el.}$ путем увеличения ее производительности по водороду. При этом можно обеспечить еще 10 МВт дополнительно отпускаемой мощности — $\Delta N_{отп.}$ потребителю от ПТУ водородной надстройки.

Время работы электролизной установки в часы минимума суточного графика электрической нагрузки аналогичны времени работы ПТУ водородной надстройки в часы максимума. Зададимся себестоимостью электроэнергии от АЭС $S_{e/e} = 0,7$ руб/кВт·ч. Дополнительные годовые затраты на увеличение выработки водорода и кислорода оцениваются в 58,8 млн. руб/год, а выручка от дополнительной продажи электроэнергии 73,5 млн. руб/год. Экономия денежных средств в данном случае оценивается в 14,7 млн. руб/год. С учетом вероятности поломок, взрывов и пожаров в одном из двух цехов эффект от форсирования производительности электролизной установки будет равен $E_{for.} = 151408,4$ руб/год. Данный эффект компенсирует увеличение возможного риска от сооружения двух цехов, но только, если

себестоимость электроэнергии от АЭС будет меньше 0,81 руб/кВт·ч при пиковом тарифе на электроэнергию 3,5 руб/кВт·ч.

Вывод

Разработана методика оценки возможного годового риска, который может понести водородная надстройка на АЭС при производстве взрывопожароопасного водорода. С помощью графа состояний оценены вероятности выхода из строя электролизного оборудования по причинам внеплановых поломок и возможных пожаров или взрывов в закрытых помещениях из-за разгерметизации оборудования. Расчеты показали, что при компоновке с двумя электролизными цехами расчет возможный годовой риск из-за увеличения годовых ремонтных отчислений. Минимизировать годовой риск можно за счет форсирования мощности оставшийся в работе электролизной установки путем повышения ее производительности по водороду и кислороду. Эффект будет достигаться только в том случае, если себестоимость электроэнергии от АЭС будет меньше 0,81 руб/кВт·ч при пиковом тарифе на электроэнергию 3,5 руб/кВт·ч.

Список использованных источников

1. Правила безопасности при производстве водорода методом электролиза воды. ПБ 03-598-03. Утв. Ростехнадзором России 06.06.03 [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: <http://himenergo.ru/usr/file/PB%2003-598-03.pdf> (дата обращения: 28.06.2018).
2. Кириллов И. А., Харитонов Н. Л., Шарафутдинов Р. Б., Хренников Н. Н. Обеспечение водородной безопасности на атомных электростанциях с водоохлаждаемыми реакторами установками. Современное состояние проблемы. Ядерная и радиационная безопасность 2017; 2(84): 26–37.
3. Кузнецов В. М., Острецов И. Н., Хвостова М. С., Шингаркин М. А. Современное состояние безопасности атомных электростанций, перспективы развития атомной энергетики и концептуальные вопросы стратегии развития экологически чистой ядерной энергетики. Безопасность в техносфере 2014; 3(3): 60–73.
4. Комаров Ю. А. Возможности риск-ориентированного подхода к проблеме повышения надежности и безопасности АЭС. Теплоэнергетика 2014; (10): 12–16.
5. Пузач С. В., Лебедченко О. С., Ищенко А. Д., Фогилев И. С. Временной механизм воздействия опасных факторов пожара на персонал АЭС и комплексная защита от них. Пожаровзрывобезопасность 2017; 26(8): 15–24.
6. Адаменков А. К., Сальников А. А., Веселова И. Н., Рясный С. И. Управление риском технологических нарушений АЭС. Атомная энергия 2017; 123(3): 123–127.
7. Елисеева М. А., Никишин В. В. Прикладные задачи моделирования технических рисков АЭС. Известия ЮФУ. Технические науки 2015; 3(164): 117–126.
8. Руководство по оценке пожарного риска для промышленных предприятий. Москва. 2006. [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: <http://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293830/4293830270.pdf> (дата обращения: 28.06.2018).

9. Байрамов А. Н., Киричков В. С. Обоснование компоновочных решений комбинирования АЭС с водородным энергетическим комплексом по критерию минимального роска. Труды Академэнерго 2018; (1): 57–72.

10. Аминов Р. З., Хрусталева В. А., Портянкин А. В. Взрывопожароопасность на АЭС с водородными надстройками. Анализ проблемы и пути решения. Труды Академэнерго 2013; (3): 41–51.

11. Aminov R. Z., Khrustalev V. A., Portyankin A. V. The effectiveness of power generating complexes constructed on the basis of nuclear power plants combined with additional sources of energy determined taking risk factors into account. Thermal Engineering 2015; 62(2): 130–137.

References

1. Safety rules for the production of hydrogen by electrolysis of water: safety regulations 03-598-03: approved. Gostehnadzor of Russia 06.06.03 [the Electronic resource]. Systems. Requirements: Adobe Acrobat Reader. URL: <http://himenergo.ru/usr/file/PB%2003-598-03.pdf> (date of circulation: June 28, 2018). (In Russ.)
2. Kirillov I. A., Kharitonov N. L., Sharafutdinov R. B., Khrennikov N. N. Ensuring hydrogen safety at nuclear power plants with water-cooled reactors installations. The current state of the problem. Nuclear and radiation safety 2017; 2(84): 26–37. (In Russ.)
3. Kuznetsov V. M., Ostretsov I. N., Khvostova M. S., Shingarkin M. A. The current state of safety of nuclear power plants, the prospects for the development of nuclear energy and conceptual issues of the development strategy for environmentally friendly nuclear energy. Safety in the technosphere 2014; 3(3): 60–73. (In Russ.)
4. Komarov Yu. A. Possibilities of a risk-based approach to the problem of improving the reliability and safety of nuclear power plants. Thermal power 2014; (10): 12–16. (In Russ.)
5. Puzach S. V., Lebedchenko O. S., Ischenko A. D., Fogilev I. S. The temporary mechanism of the impact of fire hazards on NPP personnel and comprehensive protection from them. Fire and explosion safety 2017; 26 (8): 15–24. (In Russ.)
6. Adamenkov A. K., Salnikov A. A., Veselova I. N., Rysny S. I. Risk management of technological violations of nuclear power plants. Atomic Energy 2017; 123 (3): 123–127. (In Russ.)
7. Eliseeva M. A., Nikishin V. V. Applied problems of modeling technical risks of nuclear power plants. News SFU. Technical science 2015; 3 (164): 117–126. (In Russ.)
8. Guidelines for the assessment of fire risk for industrial enterprises. Moscow. 2006. [Electronic resource]. Systems. Requirements: Adobe Acrobat Reader. URL: <http://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293830/4293830270.pdf> (date of circulation: June 28, 2018). (In Russ.)
9. Bayramov A. N., Kirichkov V. S. Substantiation of layout decisions for combining NPPs with a hydrogen energy complex by the criterion of minimum dew. Works of Academenergo 2018; (1): 57–72.
10. Aminov R. Z., Khrustalev V. A., Portyankin A. V. Explosion-risk in nuclear power plants with hydrogen superstructures. Analysis of the problem and solutions. // Proceedings of Akademenergo 2013; (3): 41–51. (In Russ.)
11. Aminov R. Z., Khrustalev V. A., Portyankin A. V. The effectiveness of power generating complexes constructed on the basis of nuclear power plants combined with additional sources of energy determined taking risk factors into account. Thermal Engineering 2015; 62(2): 130–137. (In Eng.)