

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2021. Т. 30. № 5. С. 66–75

POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2021; 30(5):66-75

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 621.039.586

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2021.30.05.66-75>

Анализ аварийных ситуаций, связанных с пожарами на атомных электростанциях

Станислав Андреевич Титов✉, Николай Михайлович Барбин,
Антон Михайлович Кобелев

Уральский институт Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Екатеринбург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье проведен системный и статистический анализ аварийных ситуаций, связанных с пожарами на атомных электростанциях (АЭС) в различных странах мира за период с 1955 по 2019 годы. Определены страны, в которых происходили пожары на атомных электростанциях (США, Великобритания, Швейцария, СССР, Германия, Испания, Япония, Россия, Индия и Франция). Выявлены основные объекты возникновения пожаров, указаны причины возгораний. Указаны типы реакторов, на которых случались аварии и инциденты, сопровождаемые крупными пожарами.

Анализ основных аварийных ситуаций на атомных электростанциях, сопровождаемых крупными пожарами. За период 1955–2019 годы было зарегистрировано 27 крупных пожаров на АЭС. Пожары происходили в 10 странах. Самое большое количество крупных возгораний (три возгорания) было зарегистрировано в 1984 г. Все они происходили в СССР. Часто возникающими основными объектами аварийной ситуации были трансформаторы и кабельные каналы — 40 %, активная зона реактора — 15 %, турбина реактора — 11 %, корпус реактора — 7 %, паропроводные системы, градирни — 7 %. Основными причинами возникновения пожаров были технические неисправности — 33 %, вина персонала — 30 %, короткие замыкания — 18 %, стихийные бедствия (природные условия) — 15 % и неизвестные причины — 4 %. Большее количество пожаров было зарегистрировано на реакторах РБМК — 6, ВВЭР — 5, ВВР — 3, ВВР — 3.

Выводы. Проанализировав аварии с крупными пожарами на АЭС за время с 1955 по 2019 годы, авторы пришли к выводу, что самое большое количество крупных пожаров было зарегистрировано в СССР. При этом для обеспечения безопасности на всех этапах жизненного цикла АЭС является применение таких мер, которые предотвращали бы возникновение тяжелых пожаров и обеспечивали защиту персонала и населения от воздействия радиационной аварии.

Ключевые слова: авария; инцидент; пожар; реакторы; технические неисправности; выброс радиоактивности; аварийная остановка

Для цитирования: Титов С.А., Барбин Н.М., Кобелев А.М. Анализ аварийных ситуаций, связанных с пожарами на атомных электростанциях // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 5. С. 66–75. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.05.66-75

✉ Титов Станислав Андреевич, e-mail: tsa-nhl@mail.ru

The analysis of emergency situations related to fires at nuclear power plants

Stanislav A. Titov✉, Nikolai M. Barbin, Anton M. Kobelev

The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Ekaterinburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The article provides a system and statistical analysis of emergency situations associated with fires at nuclear power plants (NPPs) in various countries of the world for the period from 1955 to 2019. The countries, where fires occurred at nuclear power plants, were identified (the USA, Great Britain, Switzerland, the USSR, Germany, Spain, Japan, Russia, India and France). Facilities, exposed to fires, are identified; causes of fires are indicated. The types of reactors where accidents and incidents, accompanied by large fires, have been determined. **The analysis of major emergency situations at nuclear power plants accompanied by large fires.** During the period from 1955 to 2019, 27 large fires were registered at nuclear power plants in 10 countries. The largest number of major fires was registered in 1984 (three fires), all of them occurred in the USSR. Most frequently, emergency situations occurred at transformers and cable channels — 40 %, nuclear reactor core — 15 %, reactor turbine — 11 %, reactor vessel — 7 %, steam pipeline systems, cooling towers — 7 %. The main causes of fires

were technical malfunctions — 33 %, fires caused by the personnel — 30 %, fires due to short circuits — 18 %, due to natural disasters (natural conditions) — 15 % and unknown reasons — 4 %. A greater number of fires were registered at RBMK — 6, VVER — 5, BWR — 3, and PWR — 3 reactors.

Conclusions. Having analyzed accidents, involving large fires at nuclear power plants during the period from 1955 to 2019, we come to the conclusion that the largest number of large fires was registered in the USSR. Nonetheless, to ensure safety at all stages of the life cycle of a nuclear power plant, it is necessary to apply such measures that would prevent the occurrence of severe fires and ensure the protection of personnel and the general public from the effects of a radiation accident.

Keywords: accident; incident; fire; reactors; technical malfunctions; release of radioactivity; emergency shutdown

For citation: Titov S.A., Barbin N.M., Kobelev A.M. The analysis of emergency situations related to fires at nuclear power plants. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(5):66-75. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.05.66-75 (rus).

✉ Stanislav Andreevich Titov, e-mail: tsa-nhl@mail.ru

Введение

Опыт эксплуатации АЭС показал, что каждая аварийная ситуация, связанная с пожаром на АЭС, влечет за собой серьезные последствия¹ [1–8]. В данной работе рассмотрены все основные аварийные ситуации на АЭС, сопровождавшиеся крупными пожарами, которые происходили в период с 1955 по 2019 годы. По данным авариям проведен системный и статистический анализ. Исследуемые материалы были взяты из источников¹ [9–19].

Для выполнения системного анализа были выделены основные факторы: количество аварий на АЭС с крупными пожарами; страна, в которой происходило аварийное событие (США, Великобритания, Швейцария, СССР, Германия, Испания, Россия, Индия, Франция, Япония); год аварийной ситуации; объекты аварий (трансформаторы и кабельные каналы, активная зона реактора, турбина реактора, корпуса реактора, паропроводные системы, градирни, контур реактора и системы охлаждения, насосы и насосные системы, аварийные системы, датчики и механизмы системы давления и др.); причины возникновения аварийных ситуаций (техническая неисправность, вина персонала, короткое замыкание, стихийное бедствие (природные условия) и неизвестные причины); типы (виды) реакторов (РБМК, ВВЭР, PWR, BWR, EBR-1, GCR, PHWR, Windscale-1). При анализе статистических данных использовали программы Microsoft Excel, Microsoft Word.

Анализ основных аварийных ситуаций на атомных электростанциях, сопровождавшихся крупными пожарами, которые происходили в период с 1955 по 2019 годы

За всю историю атомной энергетики самое большое количество крупных пожаров на АЭС, в частности девять, было зафиксировано в СССР.

¹ Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом». URL: <http://www.rosatom.ru/>

Технические неисправности стали причинами четырех пожаров. Первый возник 7 января 1974 г. на Ленинградской АЭС, которая расположена в Ленинградской области в городе Сосновый Бор. Возгорание было связано со взрывом железобетонного газгольдера в первом энергоблоке реактора РБМК. В ликвидации пожара задействованы автоматические системы пожаротушения и пожарная команда из персонала станции. Второй пожар произошел 14 декабря 1984 г. на Южно-Украинской АЭС, которая находится в Николаевской области Украины на берегу Южного Буга в городе Южноукраинск. Данный инцидент был связан с загоранием кабелей в реакторном отделении реактора ВВЭР-1000. Пожар ликвидирован при помощи автоматических систем пожаротушения, пожарной командой из персонала станции и специальной пожарно-спасательной частью (СПСЧ). Последствия случившегося — аварийная остановка АЭС. Третий крупный пожар возник 5 сентября 1988 г. на Игналинской АЭС, которая находится на северо-востоке Литвы. Возгорание произошло из-за перегрева кабелей в кабельной станции на блоке № 2 реактора РБМК-1500. В ликвидации пожара задействованы автоматические системы пожаротушения и пожарная команда из персонала станции. Последствия случившегося привели к остановке блока реактора. Четвертый пожар был зафиксирован 11 октября 1991 г. на Чернобыльской АЭС, расположенной на севере Украины на берегу реки Припять. Из-за конструктивной недоработки в машинном зале электростанции произошло возгорание на блоке № 2 реактора РБМК, что привело к крупному пожару и аварийной остановке реактора с последующим выбросом радиоактивности. В тушении пожара задействованы автоматические системы пожаротушения, пожарная команда из персонала станции и СПСЧ.

Два крупных пожара произошли по вине персонала. Первый — 15 октября 1982 г. на Армянской АЭС, которая расположена на территории Армянской Советской Социалистической Республики, вблизи города Мецмор. Из-за ошибочных действий персонала возник взрыв генератора на первом

энергоблоке реактора ВВЭР, что повлекло за собой значительное выгорание машинного зала с последующей аварийной остановкой реактора. В ликвидации пожара задействованы автоматические системы пожаротушения, пожарная команда из персонала станции и СПСЧ. Второй крупный пожар произошел в ночь с 25 на 26 апреля 1986 г. на Чернобыльской АЭС. В ходе эксперимента случилось возгорание водорода и взрыв активной зоны реактора РБМК-1000 [9–12]. В тушении сложного пожара задействованы автоматические системы пожаротушения, пожарная команда из персонала станции и сотрудники СПСЧ.

Два пожара были зарегистрированы в 1984 г. из-за короткого замыкания. Первый произошел 27 января на Запорожской АЭС, что расположена в Запорожской области Украины в городе Энергодар, где случилось замыкание с последующим возгоранием кабелей в реакторном отделении на энергоблоке № 1 реактора ВВЭР-1000. Последствия случившегося привели к аварийной остановке реактора. В ликвидации пожара задействованы автоматические системы пожаротушения, пожарная команда из персонала станции и СПСЧ. Второй пожар возник 18 декабря на Калининской АЭС, которая расположена на севере Тверской области в 150 км от города Твери. В насосе технической воды на энергоблоке № 1 реактора ВВЭР-1000 возникло замыкание, что привело к крупному пожару и аварийной остановке реактора. В тушении пожара задействованы автоматические системы пожаротушения, пожарная команда из персонала станции и СПСЧ.

Один пожар произошел из-за природных условий, сильного мороза, 31 декабря 1978 г. на Белоярской АЭС, расположенной в Свердловской области, в городе Заречный. Из-за сильного мороза железобетонные конструкции крыши турбинного зала не выдержали перепада температуры, тяжелые балки рухнули на работающую турбину, загорелся маслбак, огонь распространился по кабельным тоннелям. В ликвидации пожара задействованы автоматические системы пожаротушения, пожарная команда из персонала станции и СПСЧ¹.

В США произошло четыре пожара. Два случилось по вине персонала. Первый пожар возник 29 ноября 1955 г. в штате Айдахо. Данное возгорание было связано с саморазрушением экспериментального реактора EBR-1 и расплавлением активной зоны, что привело к крупному пожару с последующей аварийной остановкой. В ликвидации пожара участвовала пожарная команда из персонала станции. Второй произошел 22 марта 1975 г. на АЭС «Браунз Ферри», станция расположена в штате Алабама. Возгорание было связано

с повреждением кабелей собственных нужд, что привело к аварийной остановке реактора BWR и возникновению пожара. В тушении задействованы автоматические системы пожаротушения и пожарная команда персонала станции [12]. Из-за короткого замыкания один пожар случился 10 мая 1986 г. на АЭС «Браунз Ферри», что расположена в округе Лаймстоун штата Алабама, где произошло сгорание градирни (устройство для охлаждения большого количества воды). Данный инцидент привел к серьезному пожару и аварийной остановке станции. В ликвидации пожара задействованы автоматические системы пожаротушения, пожарная команда из персонала станции. По технической неисправности 9 октября 1989 г. в округе Уэйк штата Северная Каролина на АЭС «Широн Харрис» произошел еще один крупный пожар. Возгорание случилось в главном трансформаторе станции с распространением огня в оборудование главного генератора реактора PWR, что привело к его аварийной остановке. В тушении пожара задействованы автоматические системы пожаротушения, пожарная команда из персонала станции¹.

В Японии за данный период было зарегистрировано четыре аварийные ситуации с крупными пожарами. Первая произошла по вине персонала 9 августа 2004 г. на АЭС «Михама», станция находится в городе Михама на побережье Японского моря. Из-за халатности персонала в турбинном зале третьего реактора типа PWR случился прорыв трубы второго контура, в результате чего возникли пожар и отключение реактора. Три пожара были связаны со стихийными бедствиями (землетрясениями). Первый — 16 июля 2007 г. на АЭС «Касивазаки-Карива», которая расположена в японском городе Касивадзаки. На трансформаторе третьего блока реактора BWR произошло возгорание, что привело к крупному пожару с дальнейшей остановкой АЭС и выбросу радиоактивности в атмосферу. Второй и третий пожар возникли 11 марта 2011 г., когда случилось «Великое землетрясение Восточной Японии», при котором вышли из строя две станции: АЭС «Онагава», расположенная на побережье Тихого океана, в городе Онагава, на которой в результате сильного землетрясения в турбинном зале возник пожар, что привело к аварийной остановке станции; АЭС «Фукусима-1», которая находится вблизи города Окума на побережье Тихого океана, где во время землетрясения и последующего за ним цунами произошло обесточивание станции, что привело к расплавлению активной зоны реакторов BWR с последующим взрывом, выбросом радиоактивности и аварийной остановке станции [13–15].

В России произошло три крупных пожара на АЭС. Первый случился 10 февраля 2008 г.

на Курской АЭС, расположенной в Курской области, в г. Курчатове. Из-за технической неисправности на щеточно-контактном аппарате генератора № 1 реактора РБМК возникло возгорание с последующим переходом в пожар. Второй пожар произошел 18 февраля 2018 г. на Курской АЭС, где по неизвестным причинам случилось возгорание на трансформаторе для собственных нужд станции, что привело к отключению энергоблока № 4 реактора РБМК. Третий пожар произошел 18 июля 2019 г. на Калининской АЭС. Из-за короткого замыкания началось возгорание в трансформаторе для собственных нужд станции, что привело к отключению четвертого энергоблока реактора ВВЭР¹ [9].

В Великобритании было зафиксировано два крупных пожара на АЭС. Первый пожар произошел в 1957 г. Из-за технической неисправности случился перегрев активной зоны реактора Windscale-1, вследствие чего были остановлены два реактора № 1 и 2 и замечен рост радиоактивности в окружающей среде¹ [9, 16–18]. В тушении пожара участвовала пожарная команда из персонала станции. Второй пожар возник 26 октября 2009 г. на юго-востоке Великобритании на АЭС «Дандженесс Би». Возгорание произошло в котельном помещении станции с дальнейшими радиоактивными выбросами и остановкой станции по вине персонала. В ликвидации пожара задействованы автоматические системы пожаротушения и пожарная команда из персонала станции [9].

В Швейцарии был отмечен один пожар 29 июля 1971 г. на АЭС «Мюленберге», которая расположена на берегу реки Аар в муниципалитете Мюленберг. Из-за технической неисправности вследствие сильной вибрации маслопровода случился прорыв небольшой масляной трубки, выброшенное под давлением масло попало на горячие поверхности турбины, что привело к ее возгоранию [16–18].

В Германии был зарегистрирован один пожар, который произошел 7 декабря 1975 г. на АЭС «Грайфсвальд». В результате ошибочных действий персонала и последующего отказа автоматического выключателя в распределительном устройстве возникло короткое замыкание с последующим возгоранием и радиоактивными выбросами в атмосферу.

В Испании был зафиксирован один пожар 19 октября 1989 г. на АЭС «Ванделос», которая расположена в городе Ванделос. Из-за технической неисправности в машинном зале электростанции случилось возгорание на первом блоке реактора типа GCR, последствия случившегося привели к крупному пожару и аварийной остановке реактора.

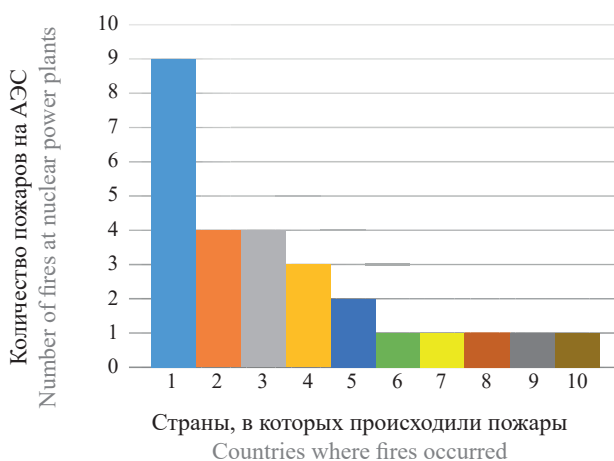
В Индии был зарегистрирован один пожар, который произошел в июне 2012 г. на АЭС «Раджастан». Станция расположена в индийском штате

Раджастан, вблизи города Кота. Из-за нарушения персоналом станции правил по охране труда во время проводимых сварочных работ на реакторе PHWR возник пожар, что привело к выбросу радиоактивных веществ в атмосферу и аварийной остановке станции.

Во Франции произошел один пожар. 9 февраля 2017 г. на АЭС «Фламанвиль», которая расположена на берегу пролива Ла-Манш рядом с городом Шербур. Из-за технической неисправности вентилятора произошло возгорание обмотки проводов в машинном зале третьего энергоблока реактора PWR, в результате случившегося был крупный пожар и аварийная остановка реактора¹.

За 1955–2019 годы было зарегистрировано 27 крупных пожаров на АЭС. Пожары происходили в 10 странах: США, Великобритании, Швейцарии, СССР, Германии, Испании, Японии, России, Индии и Франции (рис. 1).

Самое большое количество пожаров было замечено в СССР, в частности девять: в 1974, 1978, 1982, 1984, 1984, 1986, 1988, 1991 годах. Четыре крупных пожара было зафиксировано в США: в 1955, 1975, 1986, 1989 годах, также четыре пожара произошло в Японии: в 2004, 2007, 2011, 2011 годах. Три пожара случилось в России: в 2008, 2018, 2019 годах, два в Великобритании: в 1957, 2009 годах, и по одному пожару произошло



- | | |
|-----------------------|------------------|
| 1. СССР – 9 | 6. Испания – 1 |
| USSR | Spain |
| 2. США – 4 | 7. Франция – 1 |
| USA | France |
| 3. Япония – 4 | 8. Германия – 1 |
| Japan | Germany |
| 4. Россия – 3 | 9. Швейцария – 1 |
| Russia | Switzerland |
| 5. Великобритания – 2 | 10. Индия – 1 |
| Great Britain | India |

Рис. 1. Страны возникновения крупных пожаров на АЭС

Fig. 1. Countries of large fires at nuclear power plants

в Швейцарии — в 1971 г., в Германии — в 1975 г., в Испании — в 1989 г., в Индии — в 2012 г. и во Франции — в 2017 г. (рис. 2).

Чаще всего объектами аварий становились трансформаторы и кабельные каналы — 40 %, активная зона реактора — 15 %, турбина реактора — 11 %, корпуса реактора — 7 %, паропроводные системы, градирни — 7 %, контур реактора и системы охлаждения — 4 %, насосы и насосные системы — 4 %, разные случаи возникновения аварии — 4 %, аварийные системы — 4 %, датчики и механизмы системы давления — 4 % (рис. 3).

Аварийные ситуации с крупными пожарами в трансформаторах и кабельных каналах происходили

11 раз: СССР — 1984, 1984, 1988, 1991 гг.; США — 1975, 1989 гг.; Япония — 2007 г.; Россия — 2018, 2019 гг.; Испания — 1989 г.; Франция — 2017 гг.; в активной зоне реактора — 4 раза: СССР — 1986, США — 1955, Япония — 2011, Великобритания — 1957; в турбине реактора — 3 раза: США — 1955, СССР — 1986, Япония — 2011; в корпусе реактора — 2 раза: СССР — 1974, Индия — 2012; в паропроводных системах, градирни — 2 раза: СССР — 1982, США — 1986; на контуре реактора и в системах охлаждения — 1 раз: Япония — 2004; в насосах и насосных системах — 1 раз: СССР — 1984, в котельном помещении — 1 раз: Великобритания — 2009, в аварийной системе — 1 раз: Германия — 1975, на дат-

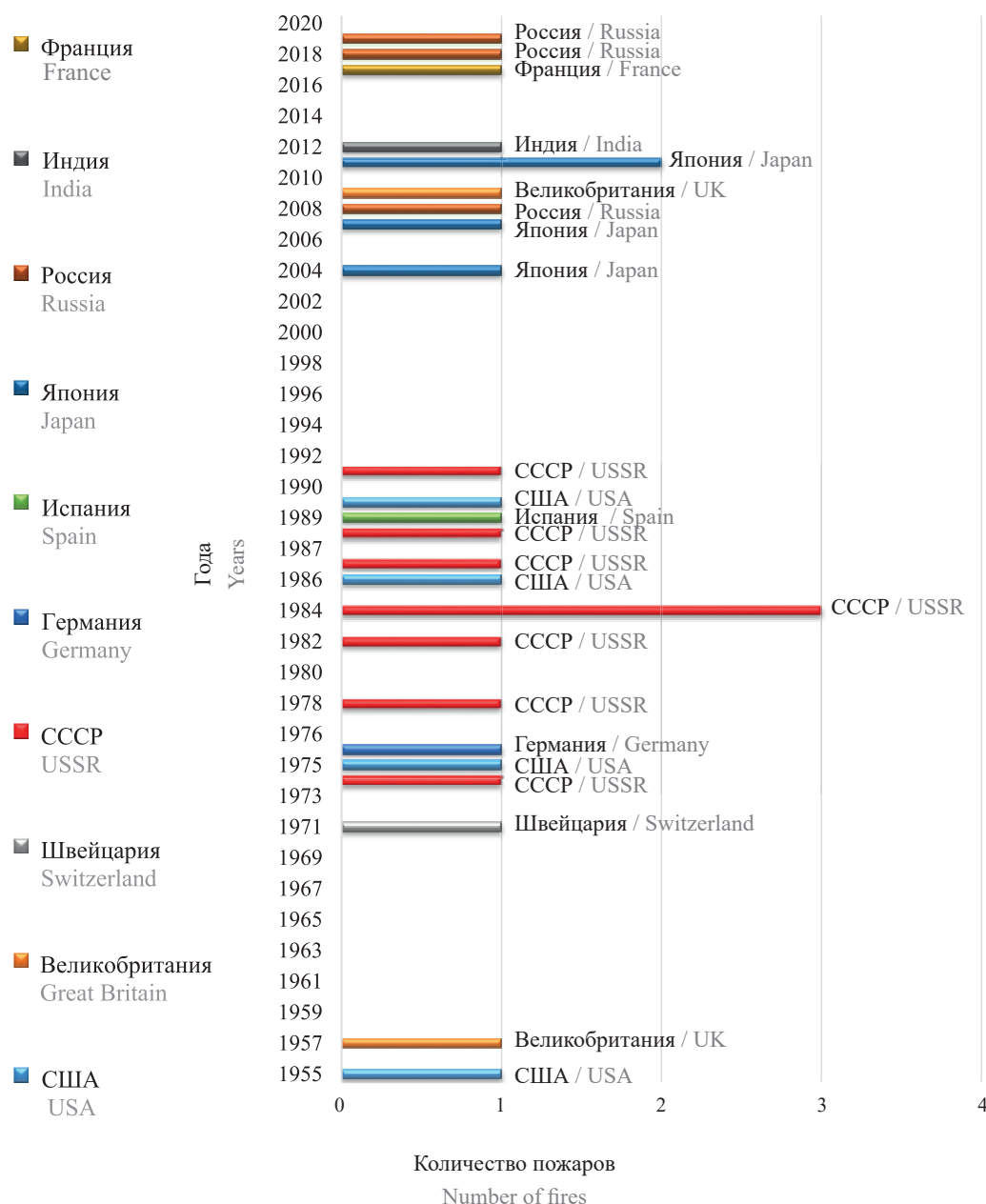


Рис. 2. Количество аварийных ситуаций с крупными пожарами, происходившими на АЭС по годам

Fig. 2. Number of accidents, involving large fires that occurred at nuclear power plants, broken down by year

чиках и в механизмах системы давления — 1 раз: Россия — 2008 г.

За рассматриваемый период на АЭС аварийные ситуации с крупными пожарами чаще всего случались по техническим неисправностям (рис. 4). Количество пожаров, произошедших из-за технических неисправностей — 33 %, по вине персонала — 30 %, короткие замыкания — 18 %, из-за стихийного бедствия (природных условий) — 15 % и по неизвестным причинам — 4 %. Большинство крупных пожаров на АЭС происходило из-за технических неисправностей — 9, по вине персонала — 8, из-за коротких замыканий — 5, из-за стихийного бедствия (природных условий) — 4 и один пожар был по неизвестным причинам [19].

Наибольшее количество пожаров было зарегистрировано на АЭС с типами реакторов РБМК — 6: СССР — в 1974, 1986, 1988, 1991 гг.; Россия — в 2008, 2018 гг.; ВВЭР — 5: СССР — в 1982, 1984, 1984, 1984 гг.; Россия — в 2019 г.; BWR — 3: США — в 1975 г., Япония — в 2007, 2011 гг.; PWR — 3: США — в 1989 г., Япония — в 2004 г., Франция — в 2017 г.; EBR-1 — 1: США — в 1955 г., GCR — 1: Испания — в 1957 г.;

PHWR — 1: Индия — в 2012 г.; Windscale-1 — 1: Великобритания — в 1957 г. (табл.).

Выводы

Проанализировав аварии с крупными пожарами на АЭС за период с 1955 по 2019 гг., авторы пришли к выводу, что самое большое количество крупных пожаров было зарегистрировано в 1984 г., в частности, три, все они происходили в СССР. Часто возникающими основными объектами аварийной ситуации становились трансформаторы и кабельные каналы (40 % всех аварийных ситуаций), активная зона реактора (15 %), турбина реактора (11 %). Основными причинами возникновения пожаров были технические неисправности — 33 %, вина персонала — 30 %. Наибольшее количество крупных пожаров произошло на реакторах типа РБМК — шесть и ВВЭР — пять. При этом для обеспечения безопасности на всех этапах жизненного цикла АЭС является применение таких мер, которые предотвращали бы возникновение тяжелых пожаров и обеспечивали защиту персонала и населения от воздействия радиационной аварии [20–23].

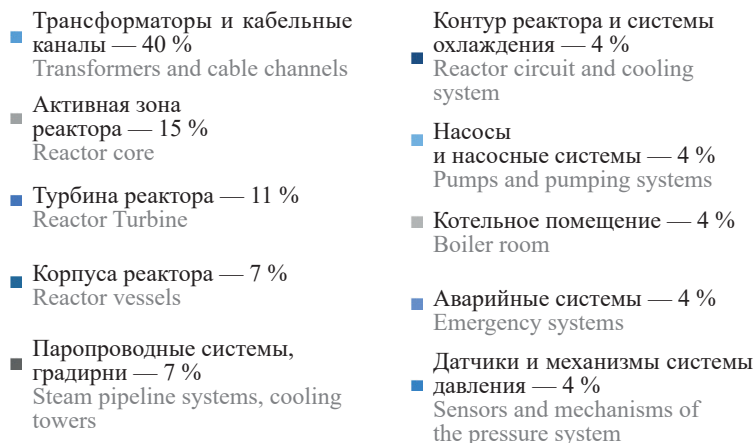


Рис. 3. Основные объекты возникновения пожаров на АЭС

Fig. 3. Principal seats of fire at nuclear power plants

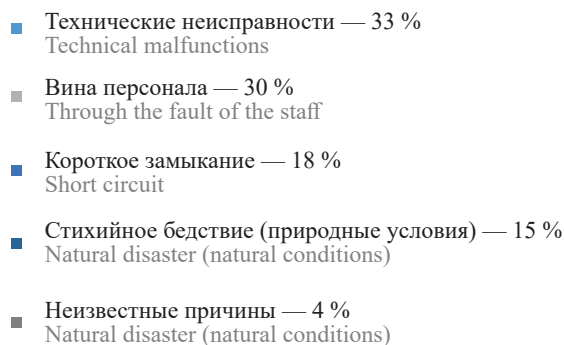


Рис. 4. Основные причины возникновения пожаров на АЭС

Fig. 4. Principal causes of fires at nuclear power plants

Пожары, возникшие на различных реакторах
Fires that occurred at various reactors

Объекты возникновения пожаров Fire seats	Типы реакторов, страны возникновения, год Types of reactors, country of origin, year							
	РБМК / RMBK	ВВЭР / VVER	BWR	PWR	EBR	GCR	PHWR	Windscale-1
Трансформаторы и кабельные каналы Transformers and cable channels	СССР — 1988 USSR — 1988 СССР — 1991 USSR — 1991 Россия — 2018 Russia — 2018	СССР — 1984 USSR — 1984 СССР — 1984 USSR — 1984 Россия — 2019 Russia — 2019	США — 1975 USA — 1975 Япония — 2007 Japan — 2007	США — 1989 USA — 1989 Франция — 2017 France — 2017		Испания — 1989 Spain — 1989		
Активная зона реактора Reactor core	СССР — 1986 USSR — 1986		Япония — 2011 Japan — 2011		США — 1955 USA — 1955			Великобритания — 1957 Great Britain — 1957
Корпуса реактора Reactor vessels	СССР — 1974 USSR — 1974						Индия — 2012 India — 2012	
Датчики и механизмы системы давления Pressure system sensors and mechanisms	Россия — 2008 Russia — 2008							
Насосы и насосные системы Pumps and pumping systems		СССР — 1984 USSR — 1984						
Контур реактора и системы охлаждения Reactor circuit and cooling system				Япония — 2004 Japan — 2004				
Паропроводные системы, градирни Steam pipe systems, cooling towers		СССР — 1982 USSR — 1982						

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Hall J.R., Harwood B. The national estimates approach to US fire statistics // Fire Technology. 1989. Vol. 25. No. 2. Pp. 99–113.

2. The IAEA. Assessment of the fire hazard analysis of nuclear power plants. Vienna. 1995. 52 p.
3. Kim S., Lee S. Maximum likelihood estimation of probabilistic non-suppression model for OECD NPP electrical fire applying non-negative continuous distribution // *Fire Safety Journal*. 2021. Vol. 122. P. 103323. DOI: 10.1016/j.firesaf.2021.103323
4. Nayak A., Kulkarni P. Severe accidents in nuclear reactors. Woodhead Publishing, 2021. 394 p.
5. Thomson J.R. High integrity systems and safety management in hazardous industries. Butterworth-Heinemann, 2021. 360 p.
6. Wang J., Li X., Allison C., Hohorst J. Nuclear power plant design and analysis codes. Woodhead Publishing, 2020. 608 p.
7. Kumar S. Reliability and probabilistic safety assessment in multi-unit nuclear power plants. Academic Press, 2021. 260 p.
8. Petrangeli G. Nuclear safety. Butterworth-Heinemann, 2019. 586 p.
9. Титов С.А., Кобелев А.М., Барбин Н.М., Омельченко Д.В. Пожары на атомных электростанциях // Актуальные проблемы и инновации в обеспечении безопасности : сб. мат. Всеросс. науч.-практ. конф. с междунар. уч., посвящ. 30-летию МЧС России (14–16 декабря 2020 г.). Ч. 1. Екатеринбург : Уральский институт ГПС МЧС России, 2021. С. 157–159.
10. Шойгу С.К. Чернобыль 25 лет спустя. М., 2011. 5 с.
11. Ключников А.А., Пазухин Э.М., Шигера Ю.М., Шигера В.Ю. Радиоактивные отходы АЭС и методы обращения с ними. К. : Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2005. С. 50–77.
12. Соловьева С.П. Аварии и инциденты на атомных электростанциях : учебное пособие. Обнинск, 1992. С. 134–273.
13. IAEA. Accident at the Fukushima Daiichi nuclear power plant report of the director general. Austria, 2015. Pp. 14–127.
14. Арутюнян Р.В., Большой Л.А., Боровой А.А., Велихов Е.П. Системный анализ причин и последствий аварии на АЭС «Фукусима-1». М., 2018. 408 с.
15. Пристер Б.С., Ключников А.А., Баряхтар В.Г., Шестопалов В.М., Кухарь В.П. Проблемы безопасности атомной энергетики // Уроки Чернобыля : монография. Чернобыль, 2016. С. 71–77.
16. Barbin N.M., Titov S.A., Koblelev M. Accidents that occurred at nuclear power plants in 1952–1972 // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 666. Issue 2. P. 022018. DOI: 10.1088/1755-1315/666/2/022018
17. Титов С.А., Барбин Н.М., Зубарев И.А., Кобелев А.М. Аварийные ситуации на АЭС в США, России и в странах западной Европы за период 1972–1982 годы // Комплексные проблемы техносферной безопасности. Кампания «мой город готовится»: задачи, проблемы, перспективы : сб. ст. по мат. XVI Междунар. науч.-практ. конф. (Воронеж, 1–31 октября 2020 г.). Воронеж, 2020. С. 256–258.
18. Кобелев А.М., Барбин Н.М., Терентьев Д.И., Зубарев И.А., Титов С.А. Экологические последствия при возможной запроектной аварии на атомных электростанциях с реакторами типа РБМК-1000 и ЭГП-6 // Комплексные проблемы техносферной безопасности. Кампания «мой город готовится»: задачи, проблемы, перспективы : сб. ст. по мат. XVI Междунар. науч.-практ. конф. (Воронеж, 1–31 октября 2020 г.). Воронеж, 2020. С. 391–394.
19. Dhillon B.S. Safety, reliability, human factors, and human error in nuclear power plants. CRC Press, 2017. Pp. 62–88. DOI: 10.1201/b22260
20. Яковлев Р.М., Обухова И.А. На пути к безопасной атомной энергетике // *Биосфера*. 2017. Т. 9. № 2. С. 123–135. DOI: 10.24855/biosfera.v9i2.354 URL: <http://21bs.ru/index.php/bio/article/view/354>
21. IAEA. Safety of nuclear power plant design. Vienna, 2016. 116 p.
22. IAEA, Assessment of the state of development of the national nuclear infrastructure of the IAEA. Vienna, 2009. NG-T-3.2. 82 p.
23. Брушлинский Н.Н., Соколов С.В. Какова «стоимость» пожаров в современном мире? // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 1. С. 79–88. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.79-88

REFERENCES

1. Hall J.R., Harwood B. The national estimates approach to US fire statistics. *Fire Technology*. 1989; 25(2):99-113.

2. *The IAEA. Assessment of the fire hazard analysis of nuclear power plants.* Vienna, 1995; 52.
3. Kim S., Lee S. Maximum likelihood estimation of probabilistic non-suppression model for OECD NPP electrical fire applying non-negative continuous distribution. *Fire Safety Journal.* 2021; 122:103323. DOI: 10.1016/j.firesaf.2021.103323
4. Nayak A., Kulkarni P. *Severe accidents in nuclear reactors.* Woodhead Publishing, 2021.
5. Thomson J.R. *High integrity systems and safety management in hazardous industries.* Butterworth-Heinemann, 2021; 360.
6. Wang J., Li X., Allison C., Hohorst J. *Nuclear power plant design and analysis codes.* Woodhead Publishing, 2020; 608.
7. Kumar S. *Reliability and probabilistic safety assessment in multi-unit nuclear power plants.* Academic Press, 2021; 260.
8. Petrangeli G. *Nuclear Safety.* Butterworth-Heinemann, 2019; 586.
9. Titov S.A., Kobelev A.M., Barbin N.M., Omelchenko D.V. Fires at nuclear power plants. *Actual Problems and Innovations in Ensuring Security : a collection of materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation, dedicated to the 30th anniversary of the EMERCOM of Russia (December 14–16, 2020).* Part 1. Ekaterinburg, Ural Institute of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2021; 157-159. (rus).
10. Shoigu S.K. *Chernobyl 25 years later.* Moscow, 2011; 5. (rus).
11. Klyuchnikov A.A., Pazukhin E.M., Shigera Yu.M., Shigera V.Yu. *Nuclear power plant radioactive waste and methods of handling them.* Kiev, Institute for Safety Problems of NPPs of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2005; 50-77. (rus).
12. Solovyova S.P. *Accidents and incidents at nuclear power plants. Training manual.* Obninsk, 1992; 134-273. (rus).
13. IAEA. Accident at the Fukushima Daiichi nuclear power plant report of the Director General. Austria, 2015; 14-127.
14. Arutyunyan R.V., Bolshov L.A., Borovoy A.A., Velikhov E.P. *System analysis of the causes and consequences of the accident at the Fukushima-1 NPP.* Moscow, 2018; 408. (rus).
15. Prister B.S., Klyuchnikov A.A., Baryakhtar V.G., Shestopalov V.M., Kukhar V.P. Problems of nuclear power engineering safety. *Chernobyl*, 2016; 71-77. (rus).
16. Barbin N.M., Titov S.A., Kobelev M. Accidents that occurred at nuclear power plants in 1952–1972. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2021; 666(2):022018. DOI: 10.1088/1755-1315/666/2/022018
17. Titov S.A., Barbin N.M., Zubarev I.A., Kobelev A.M. Emergency situations at nuclear power plants in the USA, Russia and in the countries of Western Europe for the period 1972–1982. *Complex problems of technosphere safety. Campaign “My City is Getting Ready”: Tasks, Problems, Prospects: a collection of articles based on the materials of the XVI International Scientific and Practical Conference (Voronezh, October 1-31, 2020).* Voronezh, 2020; 256-258. (rus).
18. Kobelev A.M., Barbin N.M., Terentyev D.I., Zubarev I.A., Titov S.A. Environmental impacts when possible beyond design basis accidents at nuclear power plants with reactors of type RBMK-1000 and the EGP-6. *Complex problems of technosphere safety. Campaign “My City is Getting Ready”: Tasks, Problems, Prospects: a collection of articles based on the materials of the XVI International Scientific and Practical Conference (Voronezh, October 1-31, 2020).* Voronezh, 2020; 391-394. (rus).
19. Dhillon B.S. *Safety, Reliability, Human Factors, and Human Error in Nuclear Power Plants.* CRC Press, 2017; 62-88. DOI: 10.1201/b22260
20. Yakovlev R.M., Obukhova I.A. Towards safe nuclear energy. *Biosphere.* 2017; 9(2):123-135. DOI: 10.24855/biosfera.v9i2.354 URL: <http://21bs.ru/index.php/bio/article/view/354> (rus).
21. IAEA. *Safety of nuclear power plant design.* Vienna, 2016; 116.
22. IAEA. *Assessment of the state of development of the national nuclear infrastructure of the IAEA.* Vienna, 2009. NG-T-3.2; 82.
23. Brushlinsky N.N., Sokolov S.V. How much is the fire “cost” in the modern world? *Fire and Explosion Safety/Fire and Explosion Safety.* 2020; 29(1):79-88. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.79-88 (rus).

Поступила 15.06.2021, после доработки 10.07.2021;
принята к публикации 27.07.2021

Received January June 15, 2021; Received in revised form July 10, 2021;
Accepted July 27, 2021

Информация об авторах

БАРБИН Николай Михайлович, д-р техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского отделения Учебно-научного комплекса пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ, Уральский институт Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 22; SPIN-код: 9179-6428; Author ID: 31647; ORCID: 0000-0002-6709-4334; e-mail: nmbarbin@mail.ru

ТИТОВ Станислав Андреевич, научный сотрудник Научно-исследовательского отделения Учебно-научного комплекса пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ, Уральский институт Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Екатеринбург, Российская Федерация; SPIN-код: 1014-7850; Author ID: 1064766; ORCID: 0000-0002-6903-575X; e-mail: tsa-nhl@mail.ru

КОБЕЛЕВ Антон Михайлович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского отделения Учебно-научного комплекса пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ, Уральский институт Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Екатеринбург, Российская Федерация; SPIN-код: 5626-9389; Author ID: 759170; ORCID: 0000-0002-2070-2355; e-mail: antonkobelev85@mail.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Nikolai M. BARBIN, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Leading Researcher of Research Department of Educational and Scientific Complex of Fire Extinguishing and Emergency Rescue Operations, The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Mira St., 22, Ekaterinburg, 620062, Russian Federation; SPIN-Code: 9179-6428; Author ID: 31647; ORCID: 0000-0002-6709-4334; e-mail: nmbarbin@mail.ru

Stanislav A. TITOV, Researcher of Research Department of Educational and Scientific Complex of Fire Extinguishing and Emergency Rescue Operations, The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Yekaterinburg, Russian Federation; SPIN-Code: 1014-7850; Author ID: 1064766; ORCID: 0000-0002-6903-575X; e-mail: tsa-nhl@mail.ru

Anton M. KOBELLEV, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of Research Department of Educational and Scientific Complex of Fire Extinguishing and Emergency Rescue Operations, The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Yekaterinburg, Russian Federation; SPIN-код: 5626-9389; Author ID: 759170; ORCID: 0000-0002-2070-2355; e-mail: antonkobelev85@mail.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.