

АВАРИЙНЫЕ СИТУАЦИИ НА АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ ЗА ПЕРИОД 1952 – 2012 ГГ., ОЦЕНЁННЫЕ ПО МЕЖДУНАРОДНОЙ ШКАЛЕ ЯДЕРНЫХ СОБЫТИЙ INES

С.А. Титов*, Н.М. Барбин**, **

* Уральский институт ГПС МЧС России
620062, Екатеринбург, ул. Мира, 22

** Уральский государственный юридический университет им. В.Ф. Яковлева
620137, Екатеринбург, ул. Комсомольская, 21



По материалам, взятым из открытых источников (интернет, сайт Росатома [1]), проведен системный и статистический анализ аварийных событий, входящих в международную шкалу ядерных событий INES, случившихся на атомных электростанциях за период 1952 – 2012 гг. Приводятся даты возникновения аварий и инцидентов. Выявлены страны, в которых происходили аварийные ситуации на АЭС с выбросом радиоактивности. Определены основные объекты аварийных ситуаций, связанных с радиоактивными выбросами. Выявлены основные причины возникновения аварийных событий. Отмечены виды реакторов, на которых случались аварии и инциденты с радиоактивными выбросами. Из полученных результатов статистического и системного анализа сделаны выводы. За время с 1952 по 2012 гг. в 17-ти странах произошли 33 аварийные ситуации на АЭС с радиоактивными выбросами. Чаще всего аварии и инциденты с выбросами радиоактивности случались в США, Японии и СССР. Две самые крупные аварии седьмого уровня по шкале INES были зарегистрированы в СССР и Японии. Безопасная эксплуатация АЭС зависит от проектирования и строительства станции, а также от соблюдения специальных норм и правил работы персонала станции, обеспечивающих защиту персонала и населения от воздействия радиационных аварий.

Ключевые слова: атомные электростанции, аварийные события, аварии, инциденты, реакторы, статистический и системный анализ, технические неисправности.

Титов С.А., Барбин Н.М. Аварийные ситуации на атомных электростанциях за период 1952 – 2012 гг, оценённые по международной шкале ядерных событий INES. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2023. – № 1. – С. 96-107. DOI: <https://doi.org/10.26583/пре.2023.1.08> .

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в работоспособном состоянии находятся 191 АЭС, в которые входят 423 энергоблока общей электрической мощностью около 378754 МВт [2]. На сегодня атомная энергетика вырабатывает 15,54% от производства всей

© С.А. Титов, Н.М. Барбин, 2023

электроэнергии в мире. Выработка электроэнергии на АЭС составляет 2,48 млн. ГВт·ч в год. Производство ядерной энергии является важной и неотъемлемой частью мировой экономики. Однако в ходе эксплуатации на АЭС возникает множество проблем, которые влекут за собой серьезные последствия: выброс радиоактивности, пожары, возникновение инцидентов и аварий. Целью работы является анализ всех аварийных событий с радиоактивными выбросами, возникшими на АЭС [2 – 4], и выработка на основании полученных результатов рекомендаций по предотвращению аварийных ситуаций в будущем.

ОПИСАНИЕ МЕТОДОВ АНАЛИЗА

Рассматриваются аварийные и нештатные ситуации, случившиеся на АЭС в период 1952 – 2012 гг., оцененные по международной шкале ядерных событий INES. Проведен статистический и системный анализ, материалы были взяты из [1, 7 – 17]. При анализе статистических данных использовались программные средства Microsoft Office. Для проведения системного анализа были выделены основные факторы: страны, в которых происходили аварийные события (США, Япония, СССР, Англия, Россия, Германия, Испания, Франция, Канада, Швейцария, Словакия, Венгрия, Украина, Швеция, Чехия, Пакистан, Индия), количество аварий, год аварийного события, объекты аварии (активная зона реактора, отказ системы управления и сбоя автоматики, трансформаторы и кабельные каналы, контур реактора и системы охлаждения, другие случаи возникновения аварии, парогенераторы и паропроводные системы, трубопроводные системы, корпуса реактора, насосы и насосные системы, технологический канал), причины возникновения аварийных событий (по вине персонала, по техническим неисправностям, из-за коротких замыканий, из-за стихийных бедствий (землетрясения), из-за сбоев автоматики), типы (название) реакторов (PWR, BWR, РБМК, ВВЭР, PHWR, FBR, NRX, Windscale-1, SL-1, UNGG, VHTR, GCR, AGR, БН). Классификация основных типов энергетических ядерных реакторов такова:

- РБМК (уран-графитовый реактор канального типа), использующий в качестве замедлителя графит, а в качестве теплоносителя – обычную (лёгкую) воду.
- AGR, GCR, UNGG (реакторы с газовым охлаждением), где замедлителем является графит, а теплоносителем – углекислый газ или гелий.
- VHTR (высокотемпературный реактор), использующий в качестве замедлителя графит, а в качестве теплоносителя – гелий.
- PHWR (реактор на тяжелой воде под давлением), где в качестве теплоносителя и замедлителя нейтронов используется тяжелая вода (оксид дейтерия).
- NRX (исследовательский ядерный реактор), в котором используется в качестве замедлителя тяжелая вода, а в качестве теплоносителя – легкая вода. При эксплуатации данных типов реакторов существует опасность перегрева активной зоны реактора с последующим взрывом и пожаром.
- BWR, SL-1, Windscale-1 (кипящие водо-водяные реакторы), в которых используется в качестве замедлителя графит, а в качестве теплоносителя – легкая вода.
- ВВЭР, PWR (водо-водяные энергетические реакторы), в которых лёгкая вода является теплоносителем и замедлителем. Опасность заключается в перегреве активной зоны реактора и в возможном взрыве водорода внутри корпуса реакторов.
- БН, FBR (реакторы на быстрых нейтронах), в активной зоне которых нет замедлителей, а в качестве теплоносителя используется натрий. Опасность данных типов реакторов заключается в возможности натриевого пожара и перегрева активной зоны реактора с последующим взрывом и пожаром [2, 5].

АНАЛИЗ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ НА АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ ЗА ПЕРИОД 1952 – 2012 ГГ., ОЦЕНЕННЫХ ПО МЕЖДУНАРОДНОЙ ШКАЛЕ ЯДЕРНЫХ СОБЫТИЙ INES

В 1990 г. совместно Международным агентством по атомной энергии и Агентством по ядерной энергии организации экономического сотрудничества и развития была разработана Международная шкала ядерных событий (INES), которая использовалась в целях единообразия оценки чрезвычайных случаев, связанных с аварийными радиационными выбросами в окружающую среду на АЭС, а позднее стала применяться и ко всем установкам, связанным с гражданской атомной промышленностью. В шкалу INES входит семь уровней: 7 – крупная авария, 6 – серьёзная авария, 5 – авария с широкими последствиями, 4 – авария с локальными последствиями, 3 – серьёзный инцидент, 2 – инцидент, 1 – аномальная ситуация, 0 – несущественные для безопасности [6].

Согласно международной шкале ядерных событий, в мире было зарегистрировано две крупные аварии седьмого уровня по шкале INES. Первая крупная авария седьмого уровня по международной шкале ядерных событий случилась 26 апреля 1986 г. в СССР на Чернобыльской АЭС. Из-за ошибочных проектных решений произошли взрыв водорода и разрушение четвертого энергоблока реактора РБМК-1000. Последствия случившегося повлекли за собой пожар на АЭС и сильный выброс радиоактивных веществ в атмосферу [7, 8]. Вторая авария седьмого уровня возникла 11 марта 2011 г. в Японии на АЭС Фукусима-1. Она была вызвана гигантским цунами, возникшим в результате сильного землетрясения. Произошло обесточивание станции, расплавление активной зоны реакторов типа BWR на энергоблоках с 1 по 3 и взрыв водорода на энергоблоках 1, 3 и 4. Последствия – взрыв, пожар и сильный выброс радиоактивности [9, 10].

Серьёзных аварий шестого уровня по шкале INES не было зарегистрировано.

Аварий с широкими последствиями пятого уровня шкалы INES было замечено три. Первая возникла в Канаде 12 декабря 1952 г. на АЭС Чолк-Ривер. Из-за ряда ошибочных действий оператора и сбоев в системе аварийной остановки произошел перегрев реактора типа NRX, что привело к частичному расплавлению активной зоны и к ограниченному выбросу радиоактивности [11, 12]. Вторая авария случилась 10 октября 1957 г. в Англии. Из-за технических неисправностей в активной зоне реактора Windscale-1 возникло возгорание, в результате случившегося были остановлены два реактора № 1 и № 2 с последующим пожаром и ограниченным выбросом радиоактивных веществ. Третья авария с широкими последствиями произошла 29 марта 1979 г. в США на АЭС Три-Майл-Айленд. На втором энергоблоке реактора PWR по вине персонала возникло расплавление активной зоны около 50%. В результате аварии АЭС подверглась значительному радиоактивному загрязнению, однако радиационные последствия для населения и окружающей среды оказались несущественными [11].

Аварий с локальными последствиями четвертого уровня шкалы INES было зарегистрировано четыре. Первая возникла 3 января 1961 г. в США на экспериментальном реакторе SL-1. Во время технического обслуживания из-за неправильных действий персонала был внезапно извлечён регулирующий стержень мощности реактора, что привело к взрыву и значительному расплавлению активной зоны. Последствия аварии – выброс радиоактивных веществ в атмосферу [11]. Вторая авария произошла в Швейцарии 21 января 1969 г. на АЭС Лусенс. По вине персонала случилось повреждение активной зоны реактора NRX. Последствия случившегося повлекли за собой выброс радиоактивности и остановку АЭС. Третья авария была в

Словакии 5 января 1976 г. на АЭС Богунице. Во время обычной смены топлива возникла проблема в системе автоматики. В результате случившегося произошла утечка теплоносителя и замедлителя в здании реактора, что привело к выбросу радиоактивных веществ в атмосферу и к аварийной остановке реактора РНWR. Четвертая авария произошла во Франции в марте 1980 г. на АЭС Сен-Лоран-дез-О. Из-за технической неисправности возникло плавление активной зоны реактора типа UNGG. Последствия случившегося привели к выбросу радиоактивности в атмосферу [11, 12].

Событий третьего уровня шкалы INES было зарегистрировано девять. Первая авария произошла в СССР 30 ноября 1975 г. на Ленинградской АЭС. По технической неисправности возникло разрушение технологического канала первого энергоблока реактора РБМК. Последствия случившегося привели к выбросу радиоактивных веществ в атмосферу и к аварийной остановке реактора. Вторая аварийная ситуация случилась в Германии 7 декабря 1975 г. на АЭС Грайфсвальд. Из-за ошибочных действий персонала возникло короткое замыкание одного из насосов блока № 1 реактора типа ВВЭР и последующего отказа автоматического выключателя в распределительном устройстве, что привело к крупному пожару и выбросу радиоактивных веществ. Третья авария была в Испании 19 октября 1989 г. на АЭС Ванделос. Из-за технической неисправности в машинном зале электростанции произошло возгорание реактора типа GCR на блоке № 1. Последствия – выброс радиоактивных веществ в атмосферу. Четвертая авария возникла в России 22 декабря 1992 г. на Белоярской АЭС. Из-за халатных и ошибочных действий персонала на реакторе БН было затоплено радиоактивными отходами помещение обслуживания насосов станции. Последствия случившегося – выброс радиоактивных веществ в атмосферу. Пятая аварийная ситуация была в Украине 25 июля 1996 г. на Хмельницкой АЭС. Из-за технической неисправности на реакторе ВВЭР произошёл выброс радиоактивного пара в помещение станции и за её пределы. Шестая авария случилась в Венгрии 10 апреля 2003 г. на АЭС Пакш. Из-за технической неисправности во время плановых ремонтных работ случилось повреждение оболочки тепловыделяющих сборок на втором энергоблоке реактора ВВЭР, что привело к выбросу инертных радиоактивных газов и радиоактивного йода в окружающую среду. Седьмая и восьмая аварии возникли в Японии на АЭС Мондзю. В 1995 г. на реакторе FBR из-за технической неисправности произошла утечка натрия. Последствия случившегося привели к крупному пожару и выбросу радиоактивных веществ в атмосферу. Через 15 лет 26 августа 2010 г. на этой же АЭС Мондзю случилась очередная авария: в реактор упала металлическая труба весом более трех тонн. В результате был поврежден реактор. Девятая аварийная ситуация возникла в США 2002 г. на АЭС Дэвис-Бесс. В ходе эксплуатации станции было обнаружено повреждение крышки реактора в результате коррозии со стороны первого контура. Причиной данного инцидента стало халатное отношение персонала станции [11 – 15].

Было зарегистрировано два события второго уровня шкалы INES. Первый инцидент произошёл в Швеции 25 июля 2006 г. на АЭС Форсмарк. Из-за короткого замыкания на первом энергоблоке реактора BWR случился отказ резервного генератора. Второй инцидент возник во Франции 25 августа 2008 г. на АЭС Трикастен. Из-за ошибочных действий персонала в ходе эксплуатации был переполнен бак с ураном, что привело к радиоактивному выбросу в атмосферу [13, 16, 17].

В источниках ряд аварий и инцидентов с радиоактивными выбросами не были определены по 7-балльной шкале INES и поэтому они отмечены в отдельном пункте, а также мы самостоятельно попытались их соотнести с международной шкалой ядерных событий INES, что демонстрирует табл. 1

Аварийные ситуации, соотносящиеся с международной шкалой ядерных событий INES

№	Шкала INES (уровень)	Дата	Страна	АЭС	Причина	Тип реактора
1	2	08.03.1981	Япония	Цугура	Техн. неисправность	–
2	1	25.01.1982	США	Джинна	По вине персонала	PWR
3	1	30.01.1982	США	Онтарио	По вине персонала	PHWR
4	1	04.05.1986	Германия	ТНТР-300	По вине персонала	VHTR
5	1	11.10.1991	СССР	Чернобыльская	Техн. неисправность	РБМК
6	1	13.10.1991	США	Найн Майл Пойнт	Короткое замыкание	BWR
7	1	24.03.1992	Россия	Ленинградская	По вине персонала	РБМК
8	1	25.08.2004	Испания	Ванделос	Техн. неисправность	BWR
9	1	Дек. 2004	Чехия	Темелин	Техн. неисправность	ВВЭР
10	1	16.07.2007	Япония	Касивазаки-Карива	Землетрясение	BWR
11	2	26.10.2009	Англия	Дандженесс Би	По вине персонала	–
12	1	18.10.2011	Пакистан	Канупп	По вине персонала	PWR
13	1	Июнь 2012	Индия	Раджастан (канадская)	По вине персонала	PHWR

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

К международной шкале ядерных событий относятся двадцать значительных аварийных ситуаций на АЭС: из них 17 аварий и три инцидента, происшедших с 1952 по 2012 гг. К крупным авариям седьмого уровня шкалы INES относятся два аварийных события: СССР 1986 г., Япония 2011 г. Серьезных аварий на АЭС шестого уровня замечено не было. К авариям с широкими последствиями пятого уровня относятся три события: Канада 1952 г., Англия 1957 г., США 1979 г. К авариям с локальными последствиями четвертого уровня относятся четыре события: США 1961 г., Швейцария 1969 г., Словакия 1976 г., Франция 1980 г. К событиям третьего уровня можно отнести девять аварийных ситуаций: СССР 1975 г., Германия 1975 г., Испания 1989 г., Россия 1992 г., Япония 1995 г., Украина 1996 г., Венгрия 2003 г., США 2002 г., Япония 2010 г. К событиям второго уровня относятся два инцидента: Швеция 2006 г., Франция 2008 г.

Ряд событий с выбросом радиоактивности на АЭС, указанных в табл. 1, нами самостоятельно был отнесён к международной шкале INES. Аварийные ситуации второго уровня: Япония 1981 г., Англия 2009 г. События первого уровня: США 1982 г., США 1982 г., Германия 1986 г., СССР 1991 г., США 1991 г., Россия 1992 г., Испания 2004 г., Чехия 2004 г., Япония 2007 г., Пакистан 2011 г., Индия 2012 г.

Для большей информативности рассчитано отношение количества аварийных событий к общему числу реакторов в стране на 2023 г. (рис. 1). Германия – 25%, две аварии – 1975 г., 1986 г. (общее количество реакторов в стране 3); Испания – 10%, две аварии – 1989 г., 2004 г. (общее количество реакторов 7); Швейцария – 8%, одна авария – 1969 г. (общее количество реакторов 4); Словакия – 8%, одна авария – 1977 г. (общее количество реакторов 4); Венгрия – 8%, одна авария – 2003 г. (общее количество реакторов 4); Швеция – 8%, одна авария – 2006 г. (общее количество реакторов 4); Англия – 7%, две аварии – 1957 г., 2009 г. (общее количество реакторов 9); Чехия – 5%, одна авария – 2004 г. (общее количество реакторов 6); Пакистан – 5%, одна авария – 2011 г. (общее количество реакторов 6); Япония – 5%, пять аварий – 1981 г., 1995 г., 2007 г., 2010 г.

г., 2011 г. (общее количество реакторов 33); СССР – 2%, три аварии – 1975 г., 1986 г., 1991 г. (общее количество реакторов 42 на 1991 г.); Украина – 2%, одна авария – 1996 г.; (общее количество реакторов 15); США – 2%, шесть аварий – 1961 г., 1979 г., 1982 г., 1982 г., 1991 г., 2002 г. (общее количество реакторов 92); Россия – 2%, две аварии – 1992 г., 1992 г. (общее количество реакторов 37); Канада – 2%, одна авария – 1957 г. (общее количество реакторов 19); Индия – 1%, одна авария – 2012 г. (общее количество реакторов 22); Франция – 1%, две аварии – 1980 г., 2008 г. (общее количество реакторов 56).

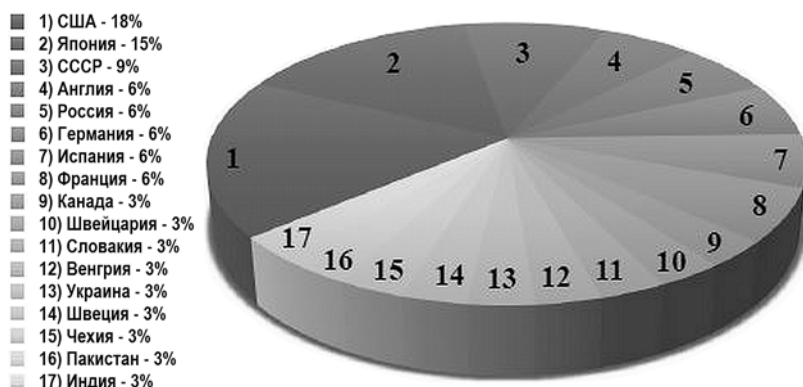


Рис. 1. Процентное отношение количества аварийных событий к общему числу реакторов в странах, в которых возникали аварии и инциденты на АЭС

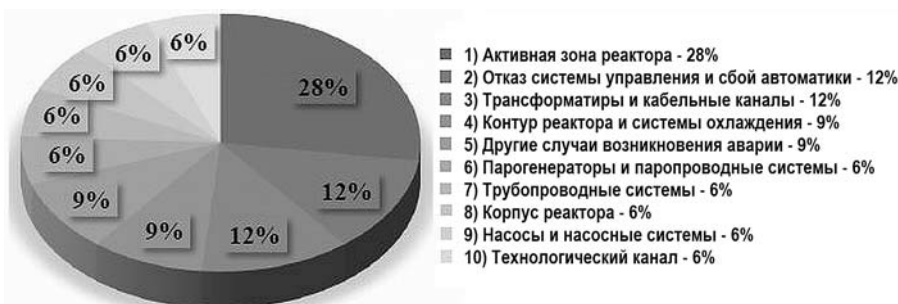


Рис. 2. Основные объекты возникновения аварий на АЭС

Чаще всего объектами аварий становилась активная зона реактора – 28%, отказ системы управления и сбоя автоматики – 12%, трансформаторы и кабельные каналы – 12%, контур реактора и системы охлаждения – 9%, другие случаи возникновения аварии – 9%, парогенераторы и паропроводные системы – 6%, трубопроводные системы – 6%, корпуса реактора – 6%, насосы и насосные системы – 6%, технологический канал – 6% (рис. 2). Аварийные ситуации в активной зоне реактора происходили девять раз: Канада – 1952 г., Англия – 1957 г., США – 1961 г., 1979 г., Швейцария – 1969 г., СССР – 1986 г., Франция – 1980 г., Венгрия – 2003 г., Япония – 2011 г.; в отказе системы управления и сбоях автоматики – четыре раза: Германия – 1975 г., Словакия – 1976 г., США – 1991 г., Чехия – 2004 г.; в трансформаторах и кабельных каналах – четыре раза: Испания – 1989 г., СССР – 1991 г., Швеции – 2006 г., Япония – 2007 г.; в контуре реактора и системах охлаждения – три раза: США – 1982 г., 2002 г.; Пакистан – 2011 г. Другие случаи возникновения аварийной ситуации – три раза: Япония – 1981 г., Франция – 2008 г., Англия – 2009 г.; в парогенераторах и паропроводных системах – два раза: США – 1982 г., Украина – 1996 г.; в трубопроводных системах – два раза: Япония – 1995 г., Испания – 2004 г.; в корпусе реактора – два раза: Япония – 2010 г., Индия – 2012 г.; в насосах и насосных системах – два раза:

БЕЗОПАСНОСТЬ, НАДЕЖНОСТЬ И ДИАГНОСТИКА ЯЭУ

Германия – 1986 г., Россия – 1992 г.; в технологических каналах – два раза: СССР – 1975 г., Россия – 1992 г.

За исследуемый период аварийные ситуации чаще всего происходили по вине персонала. Количество аварий, возникших по вине персонала – 46%; по техническим неисправностям – 36%; короткие замыкания – 9%; стихийное бедствие (землетрясение) – 6%; сбой автоматики – 3% (рис. 3). Большинство аварийных событий с выбросами радиоактивности на АЭС происходило по вине персонала – 15; по техническим неисправностям – 13; из-за короткого замыкания – 2; из-за стихийного бедствия (землетрясения) – 2 и одна авария была связана со сбоем автоматики.

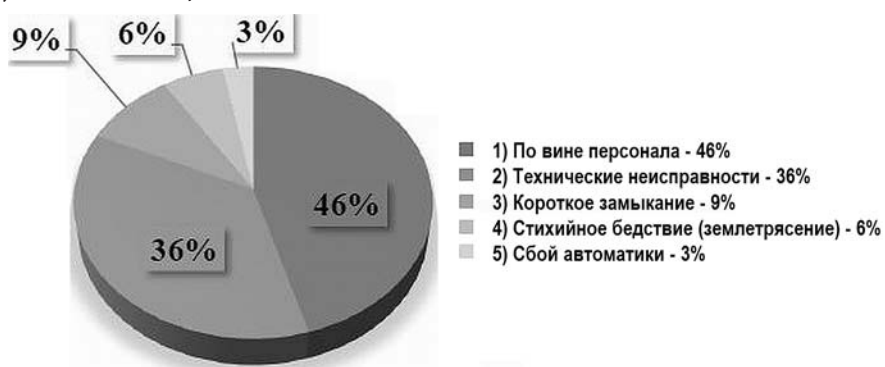


Рис. 3. Основные причины возникновения аварийных событий на АЭС

Наибольшее количество аварийных событий было зарегистрировано на реакторах PWR – 5; BWR – 5; РБМК – 4; ВВЭР – 4; PHWR – 3; FBR – 2; NRX – 2; Windscale-1 – 1; SL-1 – 1; UNGG – 1; VHTR – 1; GCR – 1; AGR – 1; БН – 1. Хронологические события аварий на различных типах реакторов указаны в табл. 2.

Таблица 2

Хронологические события аварий на различных типах реакторов

№	Дата	Страна	АЭС	Тип реактора	Уровень шкалы INES
1	12 декабря 1952 г.	Канада	Чолк-Ривер	NRX	5
2	10 октября 1957 г.	Англия	–	Windscale-1	5
3	3 января 1961 г.	США	–	SL-1	4
4	21 января 1969 г.	Швейцария	Лусенс	NRX	4
5	30 ноября 1975 г.	СССР	Ленинградская	РБМК	3
6	7 декабря 1975 г.	Германия	Грайфсвальд	ВВЭР	3
7	5 января 1976 г.	Словакия	Богунице	PHWR	4
8	29 марта 1979 г.	США	Три-Майл-Айленд	PWR	5
9	Март 1980 г.	Франция	Сен-Лоран-дез-О	UNGG	4
10	8 марта 1981 г.	Япония	Цугура	–	2
11	25 января 1982 г.	США	Джинна	PWR	1
12	30 января 1982 г.	США	Онтарио	PHWR	1
13	26 апреля 1986 г.	СССР	Чернобыльская	РБМК	7
14	4 мая 1986 г.	Германия	ТНТН-300	VHTR	1
15	19 октября 1989 г.	Испания	Ванделос	GCR	3

Таблица 2 (продолжение)

№	Дата	Страна	АЭС	Тип реактора	Уровень шкалы INES
16	11 октября 1991 г.	СССР	Чернобыльская	РБМК	1
17	13 октября 1991 г.	США	Найн Майл Пойнт	BWR	1
18	24 марта 1992 г.	Россия	Ленинградская	РБМК	1
19	22 декабря 1992 г.	Россия	Белоярская АЭС	БН	2
20	Декабрь 1995 г.	Япония	Мондзю	FBR	3
21	25 июля 1996 г.	Украина	Хмельницкая	ВВЭР	3
22	2002 г.	США	Дэвис-Бесс	PWR	3
23	10 апреля 2003 г.	Венгрия	Пакш	ВВЭР	3
24	25 августа 2004 г.	Испания	Ванделос	BWR	1
25	В декабре 2004 г.	Чехия	Темелин	ВВЭР	1
26	25 июля 2006 г.	Швеция	Форсмарк	BWR	2
27	16 июля 2007 г.	Япония	Касивазаки-Карива	BWR	1
28	25 августа 2008 г.	Франция	Трикастен	PWR	2
29	26 октября 2009 г.	Англия	Дандженесс Би	AGR	2
30	26 августа 2010 г.	Япония	Мондзю	FBR	3
31	11 марта 2011 г.	Япония	Фукусима-1	BWR	7
32	18 октября 2011 г.	Пакистан	Канупп	PWR	1
33	Июнь 2012 г.	Индия	Раджастан (канадская)	PHWR	1

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ аварийных событий с радиоактивными выбросами на АЭС в различных странах за период 1952 – 2012 гг. позволяет сделать вывод, что чаще всего аварийные ситуации с выбросами радиоактивности случались в США, Японии, СССР. Две самые крупные аварии седьмого уровня по шкале INES были зарегистрированы в СССР и Японии.

Основные объекты возникновения аварийных ситуаций таковы:

- активная зона реактора (28% всех ситуаций);
- отказ систем управления и сбой автоматики (12% всех ситуаций);
- трансформаторы и кабельные каналы (12% всех ситуаций).

Основные причины возникновения аварийных событий:

- вина персонала (46% всех событий);
- технические неисправности (36% всех событий).

Наиболее часто аварийные события с радиоактивными выбросами на АЭС происходили на реакторах PWR (5); BWR (5); РБМК (4); ВВЭР (4).

Безопасная эксплуатация АЭС зависит от качества проектирования и строительства станции, а также от соблюдения специальных норм и правил работы сотрудниками АЭС, что обеспечивает защиту персонала и населения от воздействия радиационных аварий [18, 19].

Благодарность

Работа выполнена по плану НИР МЧС России (приказ МЧС России от 21.12.2021 № 893).

Литература

1. Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»: официальный сайт. Электронный ресурс: <http://www.rosatom.ru/> (дата доступа 02.10.2022).
2. База данных МАГАТЭ по ядерным энергетическим реакторам. Электронный ресурс: <https://pris.iaea.org/pris/> (дата доступа 02.10.2022).
3. Казанцев А.А., Супотницкая О.В., Иванова Е.А., Московченко И.В., Мухамадеев Р.И., Тимофеев В.Ф., Астахова Н.Э. Водородная взрывобезопасность в условиях запроектной аварии для реактора ЭГП-6 Билибинской АЭС. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2022. – № 4. – С. 67-77. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2022.4.06>.
4. Nayak A., Kulkarni P. Serious accidents at nuclear reactors. – Woodhead Publishing, 2021. Электронный ресурс: <https://www.elsevier.com/books/severe-accidents-in-nuclear-reactors/nayak/978-0-12-822304-8/> (дата доступа 02.10.2022).
5. Велькин В.И. Атомная энергетика мира. Состояние и перспективы. Учебное пособие. – Екатеринбург: УрФУ, 2021. – 442 с.
6. ИНЕС Руководство для пользователей международной шкалы ядерных и радиологических событий. – Вена: МАГАТЭ, 2010. – 235 с.
7. Пристер Б.С., Ключников А.А., Барьяхтар В.Г., Шестопалов В.М., Кухарь В.П. Проблемы безопасности атомной энергетики. Уроки Чернобыля – Чернобыль (Киевская область). – К.: Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2016. – С. 71-77.
8. 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. – 487 с.
9. Арутюнян Р.В., Большов Л.А., Боровой А.А., Велихов Е.П. Системный анализ причин и последствий аварии на АЭС «Фукусима-1». – М.: ИБРАЭ РАН, 2018. – 408 с.
10. Авария на АЭС «Фукусима-Дайити». Доклад Генерального директора. – Вена: МАГАТЭ, 2015. – С. 14-127. Электронный ресурс: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/SupplementaryMaterials/P1710/Languages/Russian.pdf> (дата доступа 02.10.2022).
11. Соловьев С.П. Аварии и инциденты на атомных электростанциях. Учебное пособие. – Обнинск: ИАТЭ, 1992. – 300 с.
12. Barbin N.M., Titov S.A., Kobelev A.M. Accidents that Occurred at Nuclear Power Plants in 1952-1972. // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 666 (2021) 022018. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/666/2/022018>.
13. Barbin N.M., Titov S.A., Kobelev A.M. Analysis of Accidents and Incidents What Happened at Nuclear Power Plants in Russia from 1992 to 2019. // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 988 (2022) 022026. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/988/2/022026>.
14. Титов С.А., Барбин Н.М., Кобелев А.М. Аварийные ситуации, произошедшие на атомных электростанциях за период 1952 – 1991 гг. // Техносферная безопасность. – 2021. – № 4 (33). – С. 113-125. Электронный ресурс: <https://uigps.ru/userfls/ufiles/nauka/journals/ttb/TB%2033/14.pdf> (дата доступа 02.10.2022).
15. Титов С.А., Барбин Н.М., Кобелев А.М. Анализ аварийных ситуаций, связанных с пожарами на атомных электростанциях. // Пожаровзрывобезопасность. – 2021. – Т. 30. – № 5. – С. 66-75. DOI: <https://doi.org/10.22227/0869-7493.2021.30.05.66-75>.
16. Dillon Byb. S. Safety, Reliability, the Human Factor and Human Errors at Nuclear Power Plants. – 2017. – PP. 62-88. DOI: <https://doi.org/10.1201/b22260-7>.
17. Яковлев Р.М., Обухова И.А. На пути к безопасной ядерной энергии. // Биосфера. – 2017. – № 2. – С. 123-135. DOI: <https://doi.org/10.24855/biosfera.v9i2.354>.
18. Безопасность атомных электростанций: проектирование. – Вена: МАГАТЭ, 2016. – 116 с. Электронный ресурс: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1715_R_1rev1_web.pdf (дата доступа 02.10.2022).
19. Оценка положения дел в области развития национальной ядерной инфраструктуры. – Вена: МАГАТЭ, 2009. – 82 с.

Поступила в редакцию 06.10.2022 г.

Авторы

Титов Станислав Андреевич, научный сотрудник
E-mail: tsa-nhl@mail.ru

Барбин Николай Михайлович, ведущий научный сотрудник, доцент, д. т. н.
E-mail: nmbarbin@mail.ru

UDC 621.039.586

**EMERGENCIES AT NUCLEAR POWER PLANTS FOR THE PERIOD
1952 - 2012, EVALUATED ACCORDING TO THE INTERNATIONAL
SCALE OF NUCLEAR EVENTS INES**

Titov S.A.*, Barbin N.M.*,**

*Ural Institute of GPS EMERCOM of Russia
22 Mira Str., 620062 Yekaterinburg, Russia

**Ural State Law University n.a. V.F. Yakovlev
21 Komsomolskaya Str., 620137 Yekaterinburg, Russia

ABSTRACT

In the article, based on materials taken from open sources (the Internet, the Rosatom website [1]), a systematic and statistical analysis of emergency events that occurred at nuclear power plants (NPP) included in the INES international scale of nuclear events for the period 1952 – 2012 was carried out. The year of occurrence of accidents and incidents is indicated. The countries in which nuclear power plant emergencies occurred with the release of radioactivity were identified (USA, Japan, USSR, England, Russia, Germany, Spain, France, Canada, Switzerland, Slovakia, Hungary, Ukraine, Sweden, Czech Republic, Pakistan, India). The main objects of emergency situations related to radioactive emissions have been identified (reactor core, control system failure and automation failures, transformers and cable channels, reactor circuit and cooling systems, other accidents, steam generators and steam pipeline systems, pipeline systems, reactor vessels, pumps and pumping systems, technological channel). The causes of emergency events have been identified (due to the fault of personnel, due to technical malfunctions, due to short circuits, due to natural disasters (earthquakes), due to automation failures). The types of reactors where accidents and incidents occurred with radioactive emissions were noted (PWR, BWR, RBMK, VVER, PHWR, FBR, NRX, Windscale-1, SL-1, UNGG, VHTR, GCR, AGR, BN). Conclusions are drawn from the obtained results of statistical and system analysis. During the period from 1952 to 2012, 33 nuclear power plant accidents with radioactive emissions occurred in 17 countries. Most often, accidents and incidents with radioactivity emissions occurred in the following countries: the USA, Japan and the USSR. The two largest accidents of the seventh level on the INES scale were registered in the USSR and Japan. Safe operation of a nuclear power plant depends on the design and construction of the plant, as well as on compliance with special norms and rules of work of the plant personnel, which will ensure the protection of personnel and the public from the effects of radiation accidents.

Key words: nuclear power plants, emergency events, accidents, incidents, reactors, statistical and system analysis, technical malfunctions.

Titov S.A., Barbin N.M. Emergencies at Nuclear Power Plants for the Period 1952 – 2012, Evaluated According to the International Scale of Nuclear Events INES. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2023, no. 1, pp. 96-107; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.1.08> (in Russian).

REFERENCES

1. Rosatom State Atomic Energy Corporation: Official Website. Available at: <http://www.rosatom.ru/> (accessed Oct. 02, 2022) (in Russian).
2. The IAEA Database on Nuclear Power Reactors. Available at: <https://pris.iaea.org/pris/> (accessed Oct. 02, 2022).
3. Kazantsev A.A., Supotnitskaya O.V., Ivanova E.A., Moskovchenko I.V., Mukhamadeev R.I., Timofeev V.F., Astakhova N.E. Hydrogen Explosion Safety in the Conditions of an Out-of-Design Accident for the EGP-6 Reactor of the Bilibino NPP. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. – 2022. – No. 4. – PP. 67-77; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2022.4.06> (in Russian).
4. Nayak A., Kulkarni P. *Serious Accidents at Nuclear Reactors*. Woodhead Publishing, 2021. Available at: <https://www.elsevier.com/books/severe-accidents-in-nuclear-reactors/nayak/978-0-12-822304-8/> (accessed Oct. 02, 2022).
5. Velkin V.I. *Nuclear Power Engineering of the World. Status and Prospects*. Yekaterinburg. UrFU Publ., 2021, 442 p. (in Russian).
6. *INES Guide for Users of the International Scale of Nuclear and Radiological Events*. Vienna. IAEA, 2010, 235 p.
7. Prister B.S., Klyuchnikov A.A., Baryakhtar V.G., Shestopalov V.M., Kukhar V.P. *Problems of Nuclear Power Safety. Chernobyl Lessons – Chernobyl (Kiev Region)*. Kiev. Institute of NPP Safety Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine Publ., 2016, pp. 71-77 (in Russian).
8. Klyuchnikov A.A., Pazukhin E.M., Shigera Yu.M., Shigera V.Yu. *Nuclear Power Plant Radioactive Waste and Methods of Handling Them*. Kiev. Institute of NPP Safety Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine Publ., 2005, 487 p. (in Russian).
9. 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. Nuclear Safety Institute of RAS Publ., 2018, 408 p. (in Russian).
10. *Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant*. Report of the Director General. Vienna. IAEA, 2015, pp. 14-127.
11. Solovyov S.P. *Accidents and Incidents at Nuclear Power Plants*. Obninsk. IATE Publ., 1992, 300 p. (in Russian).
12. Barbin N.M., Titov S.A., Kobelev A.M. Accidents that Occurred at Nuclear Power Plants in 1952-1972. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 666 (2021) 022018; DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/666/2/022018> .
13. Barbin N.M., Titov S.A., Kobelev A.M. Analysis of Accidents and Incidents What Happened at Nuclear Power Plants in Russia from 1992 to 2019. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 988 (2022) 022026; DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/988/2/022026> .
14. Titov S.A., Barbin N.M., Kobelev A.M. Emergency Situations that Occurred at Nuclear Power Plants During the Period 1952 – 1991. *Tekhnosfer'naya Bezopasnost'*. 2021, no. 4 (33), pp. 113-125. Available at: <https://uigps.ru/userfls/ufiles/nauka/journals/ttb/TB%2033/14.pdf> (accessed Oct. 02, 2022) (in Russian).
15. Titov S.A. Barbin N.M., Kobelev A.M. The Analysis of Emergency Situations Related to Fires at Nuclear Power Plants. *Pozharovzryvbezopasnost*. 2021, v. 30, no. 5, pp. 66-75; DOI: <https://doi.org/10.22227/0869-7493.2021.30.05.66-75> (in Russian).
16. Dillon Byb. S. *Safety, Reliability, the Human Factor and Human Errors at Nuclear*

Power Plants. 2017, pp. 62-88; DOI: <https://doi.org/10.1201/b22260-7>.

17. Yakovlev R.M., Obukhova I.A. On the Way to Safe Nuclear Energy. *Biosfera*. 2017, no. 2, pp. 123-135; DOI: <https://doi.org/10.24855/biosfera.v9i2.354> (in Russian).

18. *Safety of Nuclear Power Plant: Design*. Vienna. IAEA, 2016, 99 p. Available at: https://regelwerk.grs.de/sites/default/files/cc/dokumente/SSR-2_1%20Rev%201.pdf (accessed Oct. 02, 2022).

19. *Evaluation of the Status of National Nuclear Infrastructure Development*. Vienna. IAEA, 2009, 82 p.

Authors

Titov Stanislav Andreevich, Researcher

E-mail: tsa-nhl@mail.ru

Barbin Nikolay Mikhailovich, Leading Researcher, Associate Professor, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: nmbarbin@mail.ru