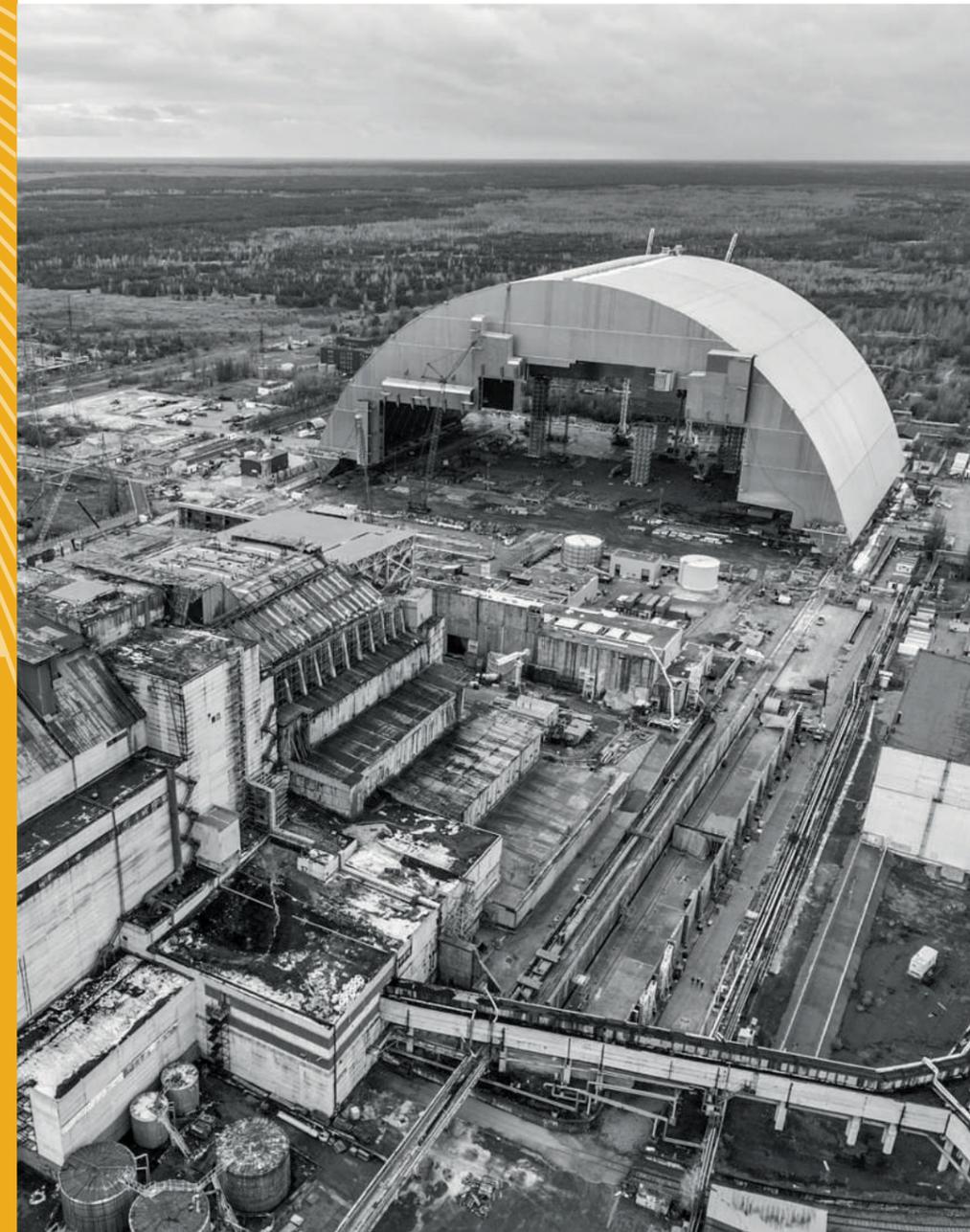




НАУКА  
И ИННОВАЦИИ  
РОСАТОМ

# АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ

**АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ И ОРГАНИЗАЦИОННЫХ ПРИЧИН  
НАИБОЛЕЕ ЗНАЧИМЫХ АВАРИЙ  
В ИСТОРИИ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**



**ТЯЖЁЛЫЕ АВАРИИ В ПЕРИОД  
ОСВОЕНИЯ ЯДЕРНЫХ  
ТЕХНОЛОГИЙ И ИХ  
КЛАССИФИКАЦИЯ НА ОСНОВЕ  
МЕЖДУНАРОДНОЙ ШКАЛЫ ИНЕС**

**ХРОНОЛОГИЯ, АНАЛИЗ ПРИЧИН  
И РЕАЛЬНЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ТРЁХ  
КРУПНЕЙШИХ АВАРИЙ  
В ИСТОРИИ МИРОВОЙ  
ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

**КЛЮЧЕВАЯ РОЛЬ  
ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА В  
ВОЗНИКНОВЕНИИ И РАЗВИТИИ  
АВАРИЙ НА ЯДЕРНЫХ ОБЪЕКТАХ**

**ВЫВОДЫ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ  
ДЛЯ СНИЖЕНИЯ НЕГАТИВНОГО  
ОБЩЕСТВЕННОГО ВОСПРИЯТИЯ  
ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Москва  
2021

Государственная корпорация  
по атомной энергии «Росатом»  
Частное учреждение «Наука и инновации»  
Центр аналитических исследований  
и разработок

Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»  
Частное учреждение «Наука и инновации»  
Центр аналитических исследований и разработок

# **АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ И ОРГАНИЗАЦИОННЫХ ПРИЧИН НАИБОЛЕЕ ЗНАЧИМЫХ АВАРИЙ В ИСТОРИИ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

Москва  
2021

УДК 621.039.009, 621.039.5

ББК 31.47

А 64

А 64 Анализ технических и организационных причин наиболее значимых аварий в истории атомной энергетики. Аналитический отчёт / Журавлёв И.Б., Птицын П.Б.; М.: ЦАИР, частное учреждение «Наука и инновации», 2021. – 104 с.

ISBN 978-5-498-00808-0

© ЦАИР, частное учреждение «Наука и инновации», 2021 г.

Подписано в печать 20.08.2021. Формат 60x84 1/8. Бумага мелованная.

Гарнитура «Rosatom». Печать офсетная. Усл. печ. л. 12,09.

Тираж 150 экз. Заказ № 6302.

Отпечатано в ООО «Элефант»:

610040, г. Киров, ул. Мостовая, д. 32/7,

[www.hibox.pro](http://www.hibox.pro)

**НАЗВАНИЕ РАБОТЫ:**

Анализ технических и организационных причин наиболее значимых аварий в истории атомной энергетики.

**АВТОРЫ:**

**Журавлёв И.Б.**, Руководитель группы приоритетных направлений НТР, Центр аналитических исследований и разработок, частное учреждение «Наука и инновации».

**Птицын П.Б.**, Заместитель директора – директор отраслевого Центра аналитических исследований и разработок, частное учреждение «Наука и инновации».

**РЕЦЕНЗЕНТЫ:**

Алексеев П.Н., Боровой А.А., Краюшкин А.В., Щепетина Т.Д.

**РЕФЕРАТ:**

Целью отчёта являлся анализ технических и организационных причин трёх крупнейших тяжёлых аварий в истории ядерной энергетики – на блоке 2 АЭС Three Mile Island (TMI-2) в США, на блоке 4 Чернобыльской АЭС и на АЭС «Фукусима-1» в Японии, получивших наибольший общественный резонанс и повлиявших на судьбу ядерной энергетики во всём мире. Для каждой из трёх перечисленных аварий в отчёте описываются технические особенности энергоблоков, на которых произошли аварии, ход развития и последствия аварии, формулируются причины аварии. В заключительной части отчёта делаются выводы относительно человеческого фактора как коренной причины трёх крупнейших аварий и даются рекомендации относительно условий будущего развития ядерной энергетики.

Аналитический отчёт подготовлен в рамках плана деятельности отраслевого Центра аналитических исследований и разработок частного учреждения «Наука и инновации» (п. 4.7).

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:**

Авария на АЭС, тяжёлая авария, ущерб от аварий, анализ причин аварий, ядерная энергетика.

**ЦИТИРОВАНИЕ:**

Анализ технических и организационных причин наиболее значимых аварий в истории атомной энергетики. / Журавлёв И.Б., Птицын П.Б.; М.: ЦАИР, частное учреждение «Наука и инновации», 2021. – 118 с. – Рус. – Деп. 21.05.21, № 29-В2021.

**TITLE:**

Analysis of the technical and organizational causes of the most significant accidents in the history of nuclear power.

**AUTHORS:**

**Zhuravlev I.B, Ptitsyn P.B.**, Centre of Analytical R&D (CARD), Private Enterprise «Science and Innovations», State Atomic Energy Corporation Rosatom.

**REVIEWERS:**

Alekseev P.N., Borovoy A.A., Krayushkin A.V., Shchetina T.D.

**ABSTRACT:**

The purpose of the report was to analyze the technical and organizational causes of the three largest severe accidents in the history of nuclear power – at Unit 2 of the Three Mile Island NPP (TMI-2) in the USA, at Unit 4 of the Chernobyl NPP and at the Fukushima-I NPP in Japan, which received the largest public response and influencing the fate of nuclear energy around the world. For each of the three listed accidents, the report describes the technical features of the power units where the accidents occurred, the sequence of events and consequences. The causes of the three accidents are formulated. The final part of the report draws conclusions regarding the conditions for the future development of nuclear power.

**KEY WORDS:**

Accident on NPP, Severe Accident, Loss Caused by Accident, Analysis of Accidents' Causes, Nuclear Energy

# СОДЕРЖАНИЕ

---

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	<b>5</b>
<b>1. ИНЕС – МЕЖДУНАРОДНАЯ ШКАЛА ЯДЕРНЫХ И РАДИОЛОГИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ</b> .....	<b>9</b>
1.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРОВНЕЙ ШКАЛЫ ИНЕС НА ОСНОВЕ ВЫБРОСА АКТИВНОСТИ .....	12
1.2. ДОПОЛНЕНИЕ К КЛАССИФИКАЦИИ АВАРИЙ И ИНЦИДЕНТОВ.....	13
<b>2. АВАРИЯ НА БЛОКЕ 2 АЭС THREE MILE ISLAND</b> .....	<b>15</b>
2.1. ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ АЭС THREE MILE ISLAND .....	15
2.2. ХОД РАЗВИТИЯ АВАРИИ .....	16
2.3. ПОСЛЕДСТВИЯ АВАРИИ .....	21
2.4. АНАЛИЗ ПРИЧИН АВАРИИ .....	23
2.4.1. Причины аварии, связанные с человеческим фактором .....	24
2.4.2. Причины аварии, связанные с организационными проблемами .....	25
<b>3. АВАРИЯ НА БЛОКЕ 4 ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС</b> .....	<b>27</b>
3.1. ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ АЭС С РБМК.....	27
3.2. ХОД РАЗВИТИЯ АВАРИИ .....	33
3.3. ПОСЛЕДСТВИЯ АВАРИИ .....	39
3.4. АНАЛИЗ ПРИЧИН АВАРИИ .....	46
<b>4. АВАРИЯ НА АЭС «ФУКУСИМА-I»</b> .....	<b>53</b>
4.1. ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ АЭС «ФУКУСИМА» .....	53
4.2. ХОД РАЗВИТИЯ АВАРИИ .....	58
4.3. ПОСЛЕДСТВИЯ АВАРИИ .....	74
4.4. АНАЛИЗ ПРИЧИН АВАРИИ .....	78
4.4.1. Причины аварии, связанные с человеческим фактором .....	78
4.4.2. Причины аварии, связанные с организационными проблемами .....	80
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	<b>85</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ</b> .....	<b>95</b>
<b>ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ</b> .....	<b>98</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А</b> .....	<b>100</b>



## ВВЕДЕНИЕ

---

Целью данного отчёта являлся анализ технических и организационных причин трёх крупнейших тяжёлых аварий в истории ядерной энергетики – на блоке 2 АЭС Three Mile Island (TMI-2) в США, на блоке 4 Чернобыльской АЭС и на АЭС «Фукусима-1» в Японии, получивших наибольший общественный резонанс и повлиявших на судьбу ядерной энергетики во всём мире.

В соответствии с Руководством по безопасности при использовании атомной энергии «Комментарии к Федеральным нормам и правилам «Общие положения обеспечения безопасности атомных станций» (НП-001-15)»<sup>1</sup>, тяжёлая авария – это запроектная авария с повреждением твэлов выше максимального проектного предела.

Запроектная авария (ЗПА) – авария, вызванная не учитываемыми для проектных аварий исходными событиями или сопровождающаяся дополнительными по сравнению с проектными авариями отказами элементов систем безопасности сверх единичного отказа, реализацией ошибочных решений персонала.

---

<sup>1</sup> Утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 3 октября 2018 г. N 486.

Не все ЗПА являются тяжёлыми. Большая их часть может заканчиваться без серьёзных повреждений твэлов в случае успешных действий по управлению аварией. Выделение из числа ЗПА группы тяжёлых аварий важно, так как состояние АС при тяжёлой аварии качественно отличается от состояния АС при отсутствии тяжёлого повреждения твэлов.

Потенциальная опасность ядерных технологий стала широко известна после двух тяжёлых по своим последствиям радиационных аварий, случившихся в 1957 году: аварии на комбинате «Маяк» (Кыштымской аварии 29.09.1957 – взрыва бака для хранения высокоактивных отходов, произошедшего в результате неисправности системы охлаждения) и аварии 08.10.1957 с возгоранием графита вследствие выделения на реакторе в Уиндскейле, Великобритания, предназначенном для наработки плутония.

В истории ядерной энергетики имели место около 20 тяжёлых аварий<sup>2</sup>. Данные о 12 тяжёлых авариях, сопровождавшихся наибольшим экономическим ущербом и/или радиоактивным выбросом, приведены в таблице 1.

**Таблица 1.**

Тяжёлые аварии на АЭС, сопровождавшиеся наибольшим ущербом и/или радиоактивным выбросом, согласно [1] (в порядке снижения ущерба)

№	Дата аварии	АЭС, местоположение	Ущерб*, млн \$ США (2013)	Тип реактора	Дата начала эксплуатации** согласно [2]	Мощность, МВт(э)	Уровень по шкале INES	Краткое описание
1	26.04.1986	Блок 4 Чернобыльской АЭС (СССР)	259 336	LWGR (РБМК)	26.03.1984	1 000	7	Взрыв реактора вследствие разгона на мгновенных нейтронах
2	11.03.2011	Блоки 1–3 АЭС «Фукусима-1» (Япония)	166 089	BWR	26.03.1971 – 27.03.1976	2 028	7	Длительное обесточивание АЭС вследствие землетрясения и цунами
3	28.03.1979	Блок 2 АЭС «Три Майл Айленд», Пенсильвания (США)	10 910	PWR	30.12.1978	906	5	Сочетание отказов оборудования и ошибок персонала привело к потере теплоносителя и частичному расплавлению а.з.
4	01.01.1977	Блок 2 Белоярской АЭС (СССР)	3 500	LWGR (АМБ)	01.12.1969	160	5	Расплавление 50% ТВС
5	22.02.1977	Блок А-1 АЭС «Богунце» (ЧССР)	1 964,5	HWGCR	25.12.1972	150	4	Ошибка персонала при перегрузке топлива привела к перекрытию потока теплоносителя

<sup>2</sup> Имеются в виду аварии на энергетических и экспериментальных реакторах, вырабатывавших электроэнергию. Аварии на исследовательских и промышленных реакторах (в том числе двухцелевых) не учтены.

№	Дата аварии	АЭС, местоположение	Ущерб*, млн \$ США (2013)	Тип реактора	Дата начала эксплуатации** согласно [2]	Мощность, МВт(э)	Уровень по шкале INES	Краткое описание
6	09.09.1982	Блок 1 Чернобыльской АЭС (СССР)	1 100	LWGR (РБМК)	27.05.1978	1 000	5	Разрушение ТВС и разрыв технологического канала с несрабатыванием аварийной защиты во время пуска реактора
7	01.05.1967	Блок 2 АЭС «Чапелкросс» (Великобритания)	1 100	GCR (MAGNOX)	01.07.1959	23	4	Частичная блокировка проходного сечения теплоносителя привела к расплавлению топлива в одном канале
8	05.10.1966	Реактор «Ферми-1», Ньюпорт, Мичиган (США)	793,9	FBR	07.08.1966	65	4	Блокировка проходного сечения теплоносителя на входе в а.з. привела к расплавлению топлива
9	17.10.1969	Блок 1 АЭС «Сен-Лоран» (Франция)	541,4	GCR	01.06.1969	480	4	Ошибка оператора при перегрузке топлива «на ходу» привела к снижению расхода теплоносителя и расплавлению пяти топливных элементов
10	13.03.1980	Блок 2 АЭС «Сен-Лоран» (Франция)	133,4	GCR	01.11.1971	450	4	Перегрев и расплавление двух топливных элементов вследствие коррозионных повреждений конструктивных элементов топливных каналов
11	30.11.1975	Блок 1 Ленинградской АЭС (СССР)	99,5	LWGR (РБМК)	01.11.1974	1 000	4	Скачок мощности при выводе реактора на мощность с недопустимым снижением ОЗР
12	21.01.1969	Реактор «Люсен», кантон Во (Швейцария)	25,7	HWGCR	29.01.1968	6	5	Блокировка проходного сечения теплоносителя продуктами коррозии с последующим перегревом, плавлением и возгоранием топливного элемента и разрушением топливного канала

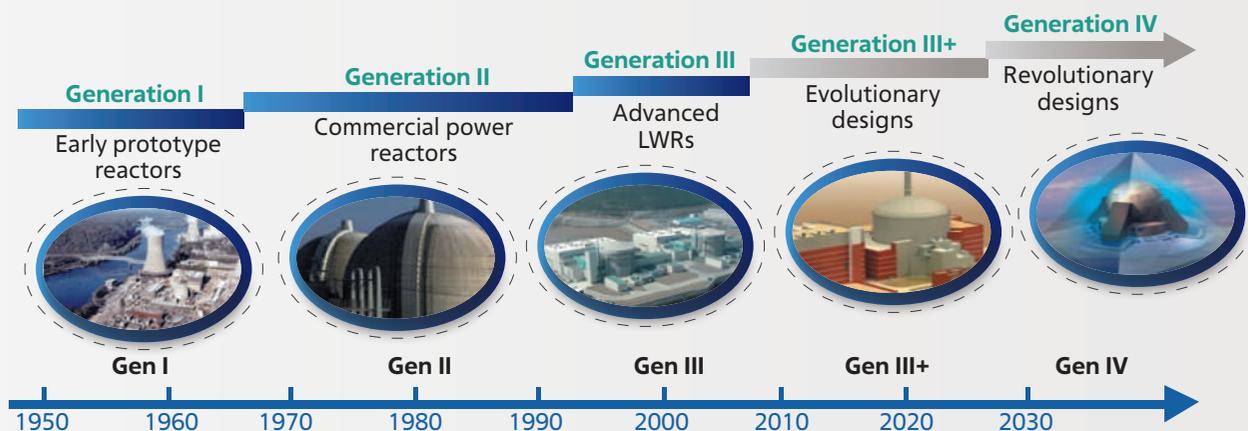
\* согласно оценке авторов [1].

\*\* приведена дата начала коммерческой эксплуатации.

Анализ данных, приведённых в таблице 1, позволяет сделать следующие выводы.

Тяжёлые аварии случались на реакторах различных типов. Общим явилось то, что все тяжёлые аварии происходили на реакторах поколений I-II согласно международной (достаточно условной) классификации (диаграмма 1).

**Диаграмма 1.**  
Поколения реакторов согласно [3]



Тяжёлые аварии, за исключением одной – на АЭС «Фукусима-1» в 2011 г., имели место на энергоблоках, проработавших не более 10 лет с начала эксплуатации. Четыре из двенадцати (т.е. одна треть) перечисленных в таблице 1 тяжёлых аварий случились на энергоблоках, проработавших менее одного года с начала коммерческой эксплуатации. Этот факт может рассматриваться как проявление U-образного характера изменения частоты отказов со временем – левой части графика, показанного на диаграмме 2, отражающей процесс «приработки» нового изделия и/или недостатки контроля процессов.

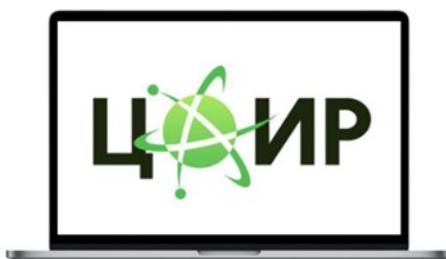
**Диаграмма 2.**  
U-образная кривая



Реализации правой части U-образной кривой в ядерной энергетике, скорее всего, не наблюдается. Причиной единственной тяжёлой аварии на АЭС, проработавшей более 30 лет (на АЭС «Фукусима-1»), явилось внешнее исходное событие (цунами), вызвавшее полное обесточивание станции. Продление сроков эксплуатации действующих энергоблоков АЭС выполняется с учётом их текущего технического состояния.

С полными версиями аналитических отчетов отраслевого Центра аналитических исследований и разработок можно ознакомиться на следующих ресурсах:

1. Портал отраслевого Центра аналитических исследований и разработок (доступ осуществляется через внутреннюю сеть КСПД Росатома)



2. Раздел отраслевого Центра аналитических исследований и разработок на портале «Страна Росатом» (доступ осуществляется через внутреннюю сеть КСПД Росатома)

