ГЕОФИЗИКА

УДК 550.34.01
DOI: 10.23671/VNC. 2019.3.36476

Обзорная статья

Сейсмическая защита АЭС, проблемы и перспективы

Ф.О. Аракелян[2], к.ф.-м.н., И.П. Башилов[1], д.т.н., Ю.Н. Зубко[2], А.В. Николаев[1], д.ф.-м.н., проф., Д.Г. Левченко[3], д.т.н.

[1]Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Россия, 123995, г. Москва, Большая Грузинская ул., 10, e-mail: nikavs1@gmai.com;

[2]ООО «Атомсейсмоизыскания», Россия, 125040, Москва, ул. Скаковая, 32/2;
[3]Институт Океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Россия, 117997, г. Москва, Нахимовский пр-т, 36

Статья поступила: 6 сентября 2019, доработана: 23 сентября 2019, одобрена в печать: 24 сентября 2019.

Аннотация: Актуальность работы. Атомная энергетика в настоящее время вносит существенный вклад в общий объем производимой и потребляемой энергии ряда развитых и развивающихся стран и, в то же время несет повышенную потенциальную опасность в случае аварийных ситуаций на АЭС. Эта опасность имеет социальный характер и связана с возможным радиационным заражением прилегающих к АЭС территорий. В связи с этим безопасности АЭС уделяется особое внимание. Это касается как выбора места расположения АЭС, так и защиты энергетических блоков от опасных внешних воздействий. К таким природным воздействиям в первую очередь относятся геодинамические явления: землетрясения, цунами, сейши, подвижки на активных тектонических разломах, а также геологические проявления: карст, оползни, наводнения и др. Объект исследования – системы повышения безопасности объектов атомной энергетики при сейсмических воздействиях. **Методы исследования.** Обзор современного состояния в области сейсмической защиты АЭС. **Результаты работы.** Рассмотрено состояние и перспективы развития атомной энергетики в связи с сейсмической и другими природно-техногенными опасностями. Анализирован опыт эксплуатации АЭС, статистика аварий на АЭС, их причины. Наиболее опасными признаны АЭС Азии, где отмечается повышенная сейсмичность. Благодаря усилиям по повышению безопасности АЭС, сделан вывод о снижении сейсмической опасности в связи с глубокой автоматизацией и передачей основных управляющих функций АЭС программному комплексу, совершенствованием алгоритмов принятия решений в случае землетрясения и других чрезвычайных ситуаций. Одна из главных целей глубоко эшелонированной защиты состоит в блокировании опасностей человеческих ошибок и сочетания отказов оборудования и ошибок операторов и распорядителей. Системы безопасности должны включаться автоматически и на некоторое время блокировать действия оператора АЭС. Эффективной защитой энергоблоков, построенных в последние десятилетия, являются герметичные оболочки (контейменты) и размещение над реактором емкости с большим количеством раствора бора, который выливается на реактор при аварии и нейтрализует радиоактивность в случае ее появления. Более детальный анализ сейсмотектонической ситуации площадок действующих АЭС мира привел к необходимости повышения ускорения безопасного останова в ряде АЭС. При проектировании АЭС недостаточно учитывать магнитуду и интенсивность предполагаемых землетрясений, для инженерных расчетов необходимо использовать конкретные параметры колебаний. Среди них важнейшее место занимает ускорение грунта, по которому можно с максимальной уверенностью судить о потенциальных нагрузках на сооружения и оборудование в зоне землетрясения. Приведена модернизированная система сейсмической защиты (ССЗ-1М) энергоблоков отличающаяся надёжностью, отсутствием ложных срабатываний, стабильностью параметров во времени, защитой от внешних несанкционированных воздействий. **Практическая значимость** работы заключается в повышение безопасности объектов атомной энергетики в условиях повышенной сейсмической опасности.

Ключевые слова: АЭС, землетрясение, природные и техногенные опасности и риски, сети сейсмических наблюдений.

Благодарности: Авторы выражают благодарность А. В. Шутикову за постоянный интерес к проблеме и помощь конструктивными советами и делами.

Для цитирования: Аракелян Ф. О., Башилов И. П., Зубко Ю. Н., Николаев А. В., Левченко Д. Г. Сейсмическая защита АЭС, проблемы и перспективы. *Геология и Геофизика Юга России*. 2019. 9 (3): 119-138. DOI: 10.23671/VNC. 2019.3.36476.

GEOPHYSICS

DOI: 10.23671/VNC. 2019.3.36476

Review

Seismic protection of nuclear power plants, problems and prospects

F.O. Arakelyan[2], I.P. Bashilov[1], Yu.N. Zubko[2], A.V. Nikolaev[1], D.G. Levchenko[3]

[1]Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, 10/1 B. Gruzinskaya Str., Moscow 123995, Russian Federation, email: nikavs1@gmai.com;
[2]Atomseismoizyskania LLC, 32/2 Skakovaya Str., Moscow 125040, Russian Federation;
[3]Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 36 Nahimovskiy Str., Moscow 117997, Russian Federation

Received 4 August 2019; revised 23 September 2019; accepted 24 September 2019.

Abstract: Relevance. Currently nuclear power makes a significant contribution to the total amount of energy produced and consumed by a number of developed and developing countries and, at the same time, carries an increased potential danger in case of emergency situations at nuclear power plants. This danger has a social character and is associated with possible radiation contamination of adjacent territories. In this regard, special attention is paid to the safety of nuclear power plants (NPP). It is referred both to the choice of the location of the nuclear power plant and to the protection of energy blocks from dangerous external effects. Such natural impacts primarily include geodynamic phenomena: earthquakes, tsunamis, seiches, shifts on active tectonic faults, as well as geological effects: karst, landslides, floods, etc. The object of study is a system for improving the nuclear facilities` safety during seismic impacts. **Methods.** Survey work of the current state in the field of seismic protection of nuclear power plants. **Results.** The state and prospects of the development of nuclear energy associated with seismic and other natural and technological hazards are considered. The experience of NPP operating, statistics on accidents at NPP and their causes are analyzed. Nuclear power plants of Asia (where the increased seismicity is observed) are recognized as the most dangerous. As a result of the efforts on safety improving of nuclear power plants, it is concluded that seismic hazard is reduced due to the deep automation and transfer of the main control functions of the nuclear power plant to the software complex, improvement of decision-making algorithms in case of an earthquake and other emergency situations. One of the main goals of the defense in depth is to block the risks of human errors and combination of equipment failures and the errors of operators and managers. Safety systems should turn on automatically and block the actions of the NPP operator for a while. Sealed shells (containers) and placement of containers with a large amount of boron solution over the reactor, which is poured onto the reactor in case of an accident and neutralizes radioactivity, are effective protection for power units built in recent decades. A more detailed analysis of the seismotectonic situation of the sites of existing nuclear power plants in the world has led to the necessity of the increasing speed of safe shutdown in a number of nuclear power plants. During the process of NPP designing, it is not enough to take into account the magnitude and intensity of the probable earthquakes; it is necessary for engineering calculations to use specific vibration parameters. Among them, soil acceleration takes the most important place, which allows estimating the potential loads on structures and equipment in the earthquake zone with maximum certainty. The modernized seismic protection system (SSZ-1M) of power units is characterized by reliability, the absence of false alarms, the stability of parameters in time, and protection against external unauthorized influences. **Practical significance.** The increase of the nuclear facilities` safety under the conditions of the increased seismic hazard.

Keywords: nuclear power plants, earthquake, natural and technological hazards and risks, seismic observation networks.

Acknowledgments: The authors are grateful to A.V. Shutikov for his constant interest in the problem and help with constructive advice and actions.

For citation: Arakelyan F.O., Bashilov I.P., Zubko Yu.N., Nikolaev A.V., Levchenko D.G. Seismic protection of nuclear power plants, problems and prospects. Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South. 2019.9 (3): 119-138. (In Russ.) DOI: 10.23671/VNC.2019.3.36476.

Введение

Атомная энергетика в настоящее время вносит существенный вклад в общий объем производимой и потребляемой энергии ряда развитых и развивающихся стран (США, Франция, Япония, Россия и др.). Это связано с известными преимуществами данной отрасли энергопроизводства: атомная энергия относительно дешевая, электростанции при соблюдении условий безопасности экологически чистые, не требуют непрерывного пополнения ресурсов, отличаются высокой степенью автоматизации и роботизации.

Вместе с тем необходимо отметить, что атомная энергетика несет повышенную потенциальную опасность в случае аварийных ситуаций на АЭС. Эта опасность имеет социальный характер и связана с возможным радиационным заражением прилегающих к АЭС территорий. В связи с этим безопасности АЭС уделяется особое внимание. Это касается как выбора места расположения АЭС, так и защиты энергетических блоков от опасных внешних воздействий. К таким природным воздействиям в первую очередь относятся геодинамические явления: землетрясения, цунами, сейши, подвижки на активных тектонических разломах, а также геологические проявления: карст, оползни, наводнения и др.

Рассмотрим кратко особенности атомной энергетики ряда развитых стран. **Атомная энергетика США** является крупнейшей в мире по вырабатываемой энергии. По данным за 2017 год, в США работают 99 ядерных реакторов суммарной мощностью 99,6 ГВт [Andrews et al., 2012; Forni et al., 2009; Nuclear & Uranium, 2019], которые вырабатывают 20,05% электроэнергии в стране (средний КИУМ за 15 лет более 90%). Почти все действующие АЭС были построены в период 1967-1990 годов, новые проекты АЭС были запущены лишь в 2013 году [Нормы проектирования, 2001; Nuclear Power in the USA, 2019]. По состоянию на март 2018 в стране продолжается строительство 2-х новых реакторов, общей мощностью 2,5 ГВт.

Сейчас атомная индустрия США переживает не лучшие времена. Ядерный сектор до сих пор ощущает отголоски двух крупных аварий 1979 и 1986 годов. Первая произошла на американской АЭС Три-Майл-Айленд: после этого в США не выдали ни одной лицензии на строительство АЭС до 2012 года. Вторая крупная авария произошла на Чернобыльской АЭС в СССР. Преодолеть негативную волну этих катастроф удалось только в начале XXI века, когда в мире начался новый подъем и разворачивание планов по строительству атомных электростанций.

Эксперты заговорили об «атомном ренессансе», но в этот раз основным вызовом стала не столько ядерная безопасность, сколько способность поставщиков атомной технологии осуществлять сложные, длительные и дорогие проекты по сооружению новых АЭС в срок и в рамках бюджета. С этим вызовом справиться не удалось: против ядерной энергетики играли повышение требований к безопасности (а значит, неминуемое удорожание проектов в сфере мирного атома) и конкурентное давление со стороны других источников электроэнергии (дешевый газ и возобновляемые источники).

Атомная энергетика Франции обеспечивает около 72% всей вырабатываемой в этой стране энергии. По состоянию на март 2018 года, Франция имеет 58 действующих промышленных ядерных реакторов суммарной мощностью 63,1 ГВт. По количеству вырабатываемой атомными электростанциями энергии Франция занимает второе место в мире, а по доле атомной энергетики – первое место. Франция является крупнейшим экспортёром электроэнергии в мире. Обладает технологиями по производству реакторов, производству и утилизации топлива. Международный экспериментальный термоядерный реактор строится именно во Франции.

Уран во Франции не добывается, однако французские компании имеют ряд долгосрочных контрактов на рынке урана. Франция импортирует ежегодно 12,400 тонн концентрата диоксида урана (10,500 тонн урана) для производства электричества. Большая часть по-

ступает от канадского филиала Areva (4500 тонн/год) и Нигерии (3200 тонн/год). Также импорт идёт из Австралии, Казахстана и России, в основном по долгосрочным контрактам. Обогащение урана для собственных нужд производится целиком в метрополии.

В 2015 году правительство Франции решило сократить долю электроэнергии, вырабатываемой на АЭС, с нынешних 75% до 50% к 2025 году. И хотя президент Макрон заявил о пересмотре данного решения в этом году с возможным продлением сроков его реализации, страна с самой высокой долей атомной энергетики в мире продолжает активно обсуждать различные сценарии сокращения этой доли в своем энергобалансе.

Атомная энергетика Японии с конца двадцатого века была главным национальным приоритетом. Атомные станции Японии до марта 2011 г. вырабатывали до 30% общей производимой энергии, это 19 АЭС с 54 рабочими реакторами. По таким показателям Япония занимала третье место в мире. Однако, с самого начала выражалась обеспокоенность по поводу способности атомных станций Японии выдерживать высокую сейсмическую активность в стране.

После Фукусимской катастрофы в марте 2011 года работа всех японских АЭС была постепенно приостановлена. Появились планы, согласно которым все АЭС Японии должны быть закрыты до 2030 года. Но вскоре стало понятно, что экономика Японии не выдержит без ядерной энергетики. Поэтому сейчас АЭС Японии движутся к повышению уровней безопасности для того, чтобы со временем открыть как можно больше электростанций. Начиная с 2015 года работа некоторых реакторов была восстановлена. В 2017 г. 40 ядерных реакторов формально классифицируются МАГАТЭ и правительством Японии как действующие, однако только 5 из них генерировали электроэнергию, остальные были временно остановлены.

Армянская атомная электростанция занимает особое место среди АЭС, построенных на постсоветском пространстве. Это была первая сейсмостойкая АЭС построенная в СССР в районе с высокой сейсмической активностью (9 баллов по шкале MSK-64). После Спитакского землетрясения (7 декабря 1988 г.), с учетом катастрофических последствий этого землетрясения правительство Армении приняло решение приостановить работу Армянской АЭС. I блок был остановлен 25 февраля 1989 г., а II блок 18 марта 1989 г. Во время Спитакского землетрясения Армянская АЭС работала в штатном режиме, оборудование, трубопроводы, здания и сооружения не пострадали, так как интенсивность сейсмических воздействий на площадке составляла около 6 баллов по шкале MSK-64. Впервые в мировой практике после 6,5 лет консервации 5 ноября 1995 г. II блок Армянской АЭС был запущен в рабочий режим с мощностью до 92% от номинальной.

Многие нормативные акты по сейсмостойкости конструкций, оборудования и антисейсмические защитные системы (СИАЗ), гидроамортизации, инженерной сейсмометрии и пр. впервые были разработаны и внедрены на Армянской АЭС.

Перезапуск Армянской АЭС обеспечил выход из беспрецедентной транспортной и энергетической блокады независимой Армении.

Атомная энергетика России к началу 2017 г. состояла из 10 АЭС с 35 действующими энергоблоками общей мощностью около 28 ГВт, которые вырабатывали до 19% от всей производимой в стране электроэнергии. В последние годы наблюдался значительный рост энергии, вырабатываемой АЭС России: 2012 г. – 177 млрд кВтч, 2016 г. – 196 млрд кВтч, 2017 г. – 203 млрд кВтч. На территории России имеются значительные асейсмичные регионы, пригодные для размещения АЭС. В разработках проекта Энергетической стратегии России на период до 2030 г. предусмотрено дальнейшее увеличение производства электроэнергии на атомных электростанциях до 4 раз. В настоящее время в России ведется строительство 10 энергоблоков на действующих в стране АЭС и 11 атомных станций строится за рубежом в Китае, Индии, Турции, Иране и др. Ведется разработка уникальной плавучей АЭС для обслуживания северных и восточных районов России. Следует отметить, что Рос-

сия обладает технологией полного цикла атомной энергетики: от добычи урановых руд до выработки электроэнергии и утилизации отходов. Имеются значительные разведанные запасы руд, а также запасы ядерного топлива в оружейном виде. Кратко рассмотрим общее состояние атомной энергетики к настоящему времени. В 31 стране мира в настоящее время эксплуатируется 191 атомная электростанция с 449 энергоблоками общей электрической мощностью около 390 ГВт [Operational & Long-Term Shutdown Reactors, 2019]. В стадии строительства находится 56 энергоблоков, 166 энергоблоков закрыты [The Database on Nuclear Power Reactors, 2019]. Закрываются блоки в основном из-за окончания срока эксплуатации, иногда, из-за аварий, по соображениям потенциальной безопасности, или по политическим соображениям.

На рисунке 1 приведено распределение АЭС по странам и континентам. В основном атомные станции сосредоточены в странах с развитой экономикой и относительно низким уровнем сейсмичности. Исключение составляет Япония, где имеется высокая сейсмичность и малые возможности выбора площадок для строительства АЭС. Это накладывает особые требования к обеспечению их безопасности.

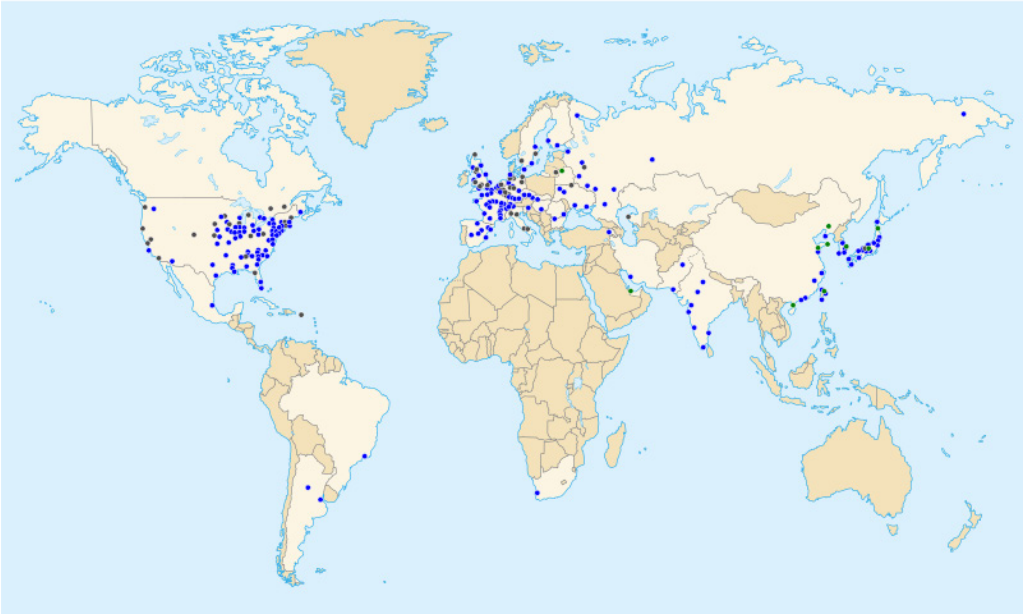

Рис. 1. Размещение атомных электростанций в мире. /
Fig. 1. Location of nuclear power plants in the world.

Общее количество действующих блоков АЭС с конца 1980-х годов и по настоящее время вышло в мире на устойчивый уровень (рис. 2). Вновь вводимые в строй блоки компенсируют закрывающиеся. Причины ограничения роста количества АЭС можно объяснить недостатком площади асейсмичных территорий, строгими экологическими требованиями, а также отсутствием потребности роста энергетики в ряде стран, их технической отсталостью в развитии высоких технологий.

Динамику развития атомной энергетики можно проследить по вводу в строй новых энергоблоков (рис. 3).

Устойчивый рост можно наблюдать до середины 80-х годов. Ряд аварий на АЭС: американской Три-Майл-Айленд в 1979 г., крупнейшей Чернобыльской АЭС в 1986 г. очень сильно ударил по престижу атомных электростанций. В результате было остановлено строительство ряда крупных АЭС, пересматривалась вся стратегия развития атомной энергетики. В течение последующих пяти лет наблюдался резкий спад количества вводимых энергоблоков. Затем ситуация начала постепенно стабилизироваться и с 2010 г. наблюдается

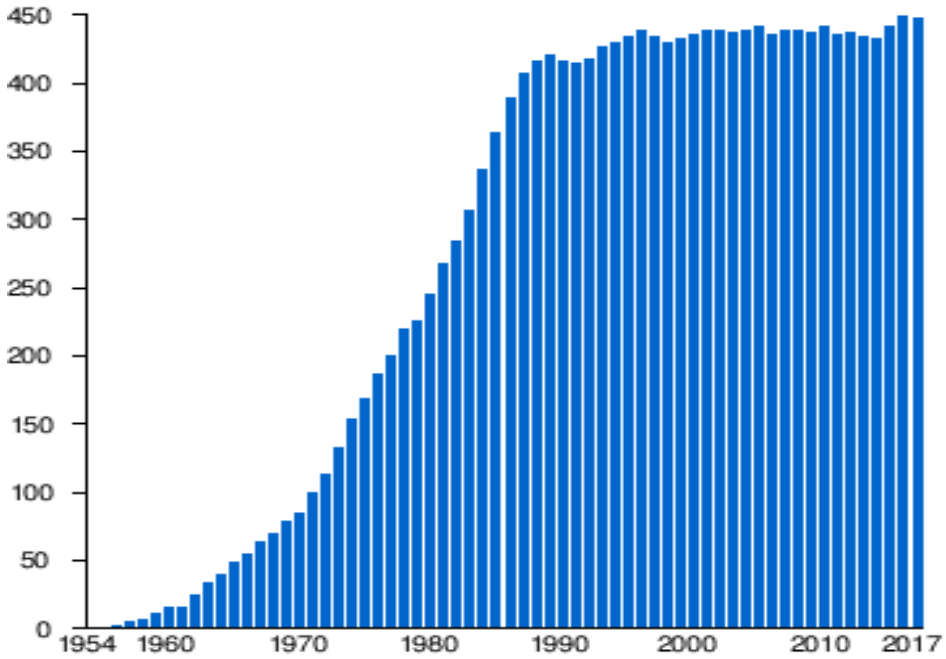

Рис. 2. Количество действующих энергоблоков атомных электростанций в мире. /
Fig. 2. The number of operating units of nuclear power plants in the world.

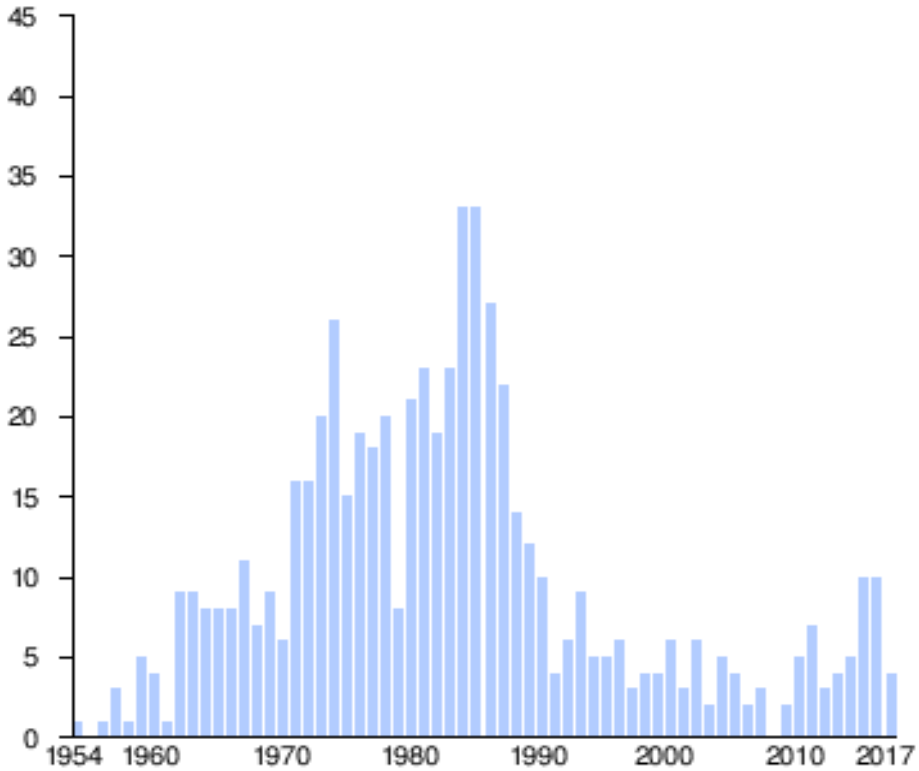

Рис. 3. Ввод в строй новых энергоблоков АЭС в мире. /
Fig. 3. Putting in operation of new nuclear power units in the world.

определенный рост в этой области. Это было связано с разработкой новых существенно более строгих мер по обеспечению безопасности АЭС. Катастрофическая авария на Фукусимской АЭС в Японии не остановила ввод в строй новых энергоблоков в мире, хотя значительно притормозила развитие атомной энергетики в этой стране.

На рисунке 4 приведено распределение по странам количества строящихся энергоблоков АЭС в мире. Здесь лидируют развивающиеся страны: Китай, Россия, Индия.

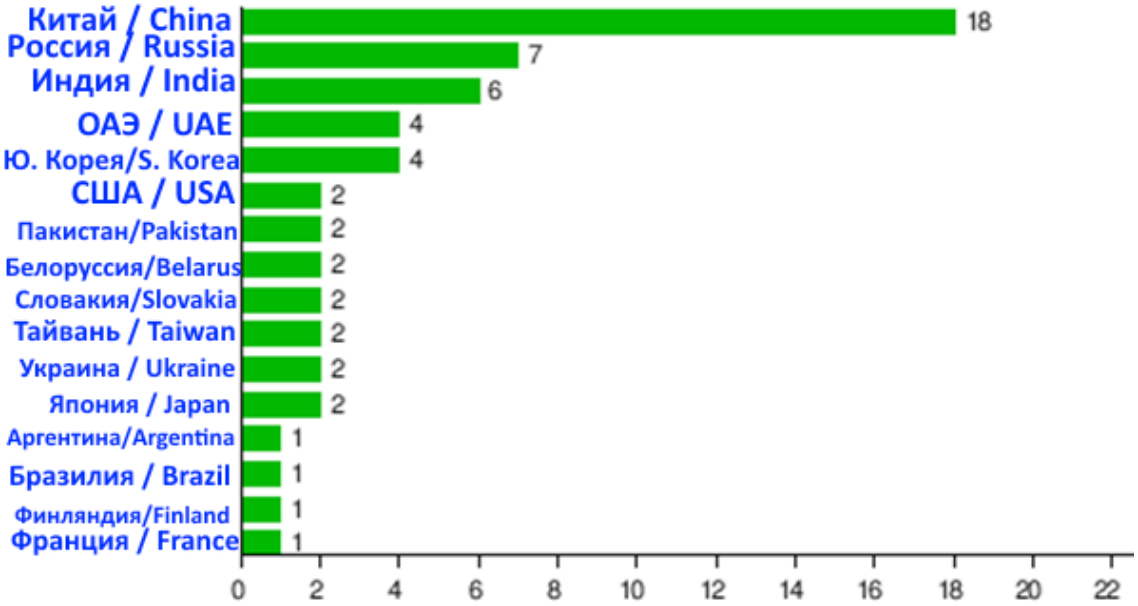

Рис. 4. Распределение строящихся энергоблоков АЭС по странам. /
Fig. 4. Distribution of nuclear power plants` units under construction over countries.

В связи с авариями на ряде АЭС и глобальной сменой приоритетов энергетической политики в сторону возобновляемых источников энергии (ветра, солнца, гейзеров и т. п.) многие из технически развитых стран (США, Япония, Германия) заявляли о снижении роли атомной энергетики в собственных энергетических планах. Казалось бы, проблемы конкурентов – хорошая новость для «Росатома». Однако специфика атомной отрасли всегда состояла в том, что узкий круг стран-поставщиков ядерных технологий не только конкурировал между собой, но и способствовал развитию мирового рынка. США, Франция, Россия, Япония, Южная Корея, Канада и Китай сотрудничают друг с другом в области совершенствования технологий, усиления ядерной безопасности и развития ядерной инфраструктуры в странах-новичках.

Общие требования к безопасности АЭС

Основной опасностью при эксплуатации реакторов АЭС является их перегрев, который может привести к плавлению ядерного топлива, тепловому взрыву и физическому разрушению теплообменных контуров, в которых содержится большое количество радиоактивной воды. Все эти негативные процессы имели место при катастрофе на АЭС Фукусима-1 в Японии. Во всех случаях основной ущерб возникает не из-за взрыва, а вследствие выброса радиоактивного материала в атмосферу или воду.

В связи с этим основные задачи систем безопасности АЭС при аварии состоят в следующем: остановка цепной реакции, охлаждение реактора и предотвращение выхода радиоактивных веществ за пределы блока. Следует подчеркнуть, что одна из главных целей глубоко эшелонированной защиты состоит в блокировании опасностей человеческих ошибок

и сочетания отказов оборудования и ошибок операторов и распорядителей. Преднамеренное отключение систем безопасности персоналом 4-го энергоблока Чернобыльской АЭС стало одной из основных причин превращения штатной аварийной ситуации в крупнейшую за всю историю атомной энергетики катастрофу. Поэтому, если какие-либо параметры работы реактора выходят за пределы норм, системы безопасности должны включаться автоматически и на некоторое время блокировать действия оператора АЭС.

Анализ аварий на АЭС показывает, что основной их причиной являются ошибочные действия операторов (табл. 1).

Таблица 1. / Table 1.

Перечень ряда аварий на АЭС за последние 60 лет. /

List of a number of accidents at nuclear power plants over the past 60 years.

Дата аварии / Date of accident	Место аварии / Accident scene	Причина / Cause	Последствия / Effects
1952 г., 12 декабря / 1952, December 12	Чолк-Ривер (США) / Chalk River (USA)	Ошибка персонала / Staff error	Зараж. акватор. и атмосф. / water and atmosphere contamination
1969 г.,? / 1969,?	Св. Лаврент (Франция) / St. Lawrence (France)	Ошибка персонала / Staff error	Взрыв реактора, заражен. / Reactor explosion, infection
1975 г., 22 марта / 1975, March 22	Браунз Ферри (США) / Browns Ferry (USA)	Ошибка персонала / Staff error	Остановка на 1 год / Stop at 1 year
1979 г., 28 марта / 1979, March 28	Три-Майл-Айленд (США) / Three Mile Island (USA)	Ошибка персонала / Staff error	Эвакуац. 200 тыс. чел. / Evacuation of 200 thousand people
1986 г., 25 апреля / 1986, April 25	Чернобыль (СССР) / Chernobyl (USSR)	Ошибка персонала / Staff error	Консервация АЭС / NPP conservation
1999 г., 30 сентября / 1999, September 30	Токаймура (Япония) / Tokaimura (Japan)	Ошибка персонала / Staff error	Облучение 439 человек / Irradiation 439 people
2004 г., 9 августа / 2004, August 9	«Михама» (Япония) / Mihama (Japan)	Ошибка персонала / Staff error	Были пострадавшие / Affected
2011 г., 11 марта / 2011, March 11	«Фукусима» (Япония) / Fukushima (Japan)	Сейсмич. события / Seismic events	Ликвидация АЭС / NPP liquidation

Системы безопасности должны удовлетворять высоким требованиям по качеству при их изготовлении, монтаже и эксплуатации и выполнять свои функции при любых механических, химических и природных повреждениях, связанных с возникновением аварийной ситуации.

Практически все энергоблоки, строившиеся последние несколько десятилетий, защищены прочными герметичными оболочками (контайментами). Их применение необходимо для защиты в случае внутренней аварии с разрывом крупных трубопроводов и потерей теплоносителя, а также в случае внешних воздействий: землетрясений, цунами, ураганов, смерчей, падений самолётов, взрывов, ракетных ударов и т. д. [Nuclear containments, 2001; Swarup et al., 1992].

Такая оболочка представляет собой массивное сооружение особой конструкции, в котором располагается основное оборудование реакторной установки. Эта конструкция является наиболее характерным в архитектурном плане и важнейшим с точки зрения безопасности зданием атомных электростанций, последним физическим барьером на пути распространения радиоактивных материалов и ионизирующих излучений [Кайоль и др., 1994; Paul, 2005].

В качестве примера новейших разработок в этой области в России можно привести так называемую «ловушку расплава», которую планируют установить на строящейся ЛАЭС-2 с реактором ВВЭР-1200 III+ поколения (в рамках проект АЭС-2006). Устройство локализации расплава активной зоны – это специальная ёмкость, которая расположена под активной зоной реактора. В случае аварии с расплавлением активной зоны высокорадиоактивный топливный расплав стечёт вниз и самолокализуется, что сократит масштабы аварии в силу отсутствия контакта радиоактивного топлива и окружающей среды [Баутин, 2012]

Другой активной мерой защиты является размещение над реактором емкости с большим количеством раствора бора, который выливается на реактор при аварии и нейтрализует радиоактивность в случае ее появления (Баутин). Для снижения давления пара внутри защитной оболочки установлена спринклерная система, которая из-под купола блока разбрызгивает раствор бора и других веществ, препятствующих распространению радиоактивности. Там же ставятся рекомбинаторы водорода, не позволяющие этому газу скапливаться и исключающие возможность взрыва.

География сейсмических угроз для АЭС

При проектировании АЭС производится тщательный выбор строительной площадки в соответствии с весьма жесткими требованиями. В расчет берется уровень сейсмичности максимального расчетного землетрясения (МРЗ), которое может произойти, например, с вероятностью 1 раз в 10 тысяч лет и не более 8 баллов по шкале сейсмической интенсивности. Исходя из этого прогноза осуществляется выполнение соответствующих расчетов для строительных конструкций, проектирование всех трубопроводов и оборудования. На рисунке 5 приведена карта оценки глобальной сейсмической опасности, разработанная по международной программе GSHAP в 1999 г. (Global Seismic Hazard Assessment Program).

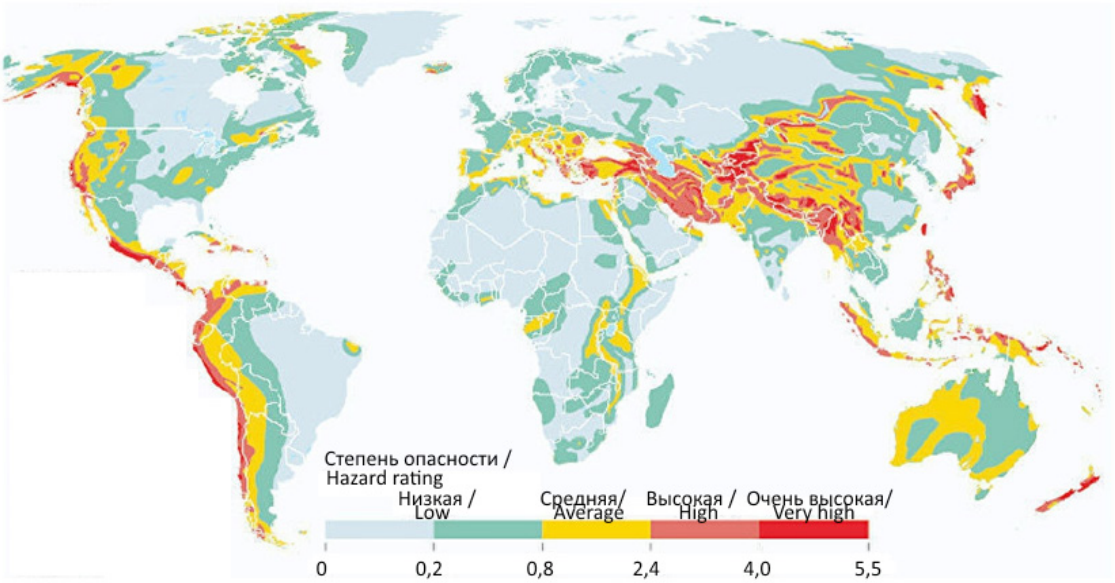

Рис. 5. Карта оценки глобальной сейсмической опасности (разработана по программе GSHAP, 1999 г.).

Большинство крупных землетрясений происходят в земных глубинах, на краях тектонических плит. Под воздействием силы, которая давит на их края, они резко меняют положение, проламывают горную породу и сдвигают участки земной тверди. Накопившаяся энергия высвобождается. /

Fig. 5. Assessment map of the global seismic hazard (developed by the GSHAP program, 1999). Most major earthquakes occur in the depths of the earth, at the edges of tectonic plates. Under the influence of the force that presses the edges, they sharply change their position, break through the rock and shift sections of the earth's solid. The accumulated energy is released

Из карты следует, что наименее опасные районы для строительства АЭС в экономически развитых и развивающихся странах расположены на большей части территории России, в восточной части Канады, на северо-востоке США, в отдельных частях Индии и Китая. Обширные безопасные области в центральной Африке, на востоке Южной Америки и в Гренландии практически не используются из-за слабого экономического развития.

Из сравнения этой карты с картой размещения АЭС (рис. 1) следует, что, в общем, соблюдается принцип выбора малоопасных районов строительства атомных станций. Вместе с тем, около сотни ядерных энергоблоков в мире расположены в регионах, где возможны сильные землетрясения. Однако в пределах сейсмически активного региона нередко встречаются территории с меньшей интенсивностью землетрясений, которые и выбирают для строительства АЭС, если в более спокойных регионах это невозможно. В большинстве случаев локализация площадок осуществлялась таким образом, чтобы избежать активных разломов. Но иногда более поздние исследования выявляли неизвестные раньше разломы, и это приводило к существенному (в разы и на десятки процентов) повышению планки сейсмической опасности для данной площадки – как на стадии проекта, так и для действующих станций. Яркими примерами служат блоки американской АЭС «Дьябло-Каньон» (ускорение безопасного останова было пересмотрено на стадии проекта с 0,2 g до 0,75 g), японских АЭС «Касивадзаки-Карива» (с 0,46 g до 2,35 g для ряда действующих блоков), «Онагава» (с 0,38 g до 0,59 g), «Фукусима-1» до аварии и закрытия (с 0,38 g до 0,61 g), «Цуруга» (с 0,54 g до 0,81 g) и другие.

В Европе к наиболее сейсмически активным регионам с атомными станциями относятся юго-восток и отдельные районы востока Франции (тут находятся действующие АЭС «Фессенхайм», «Трикастен», «Круа», «Сент-Альбан», площадка «Маркуль» и другие объекты отрасли), восточные и северо-восточные районы Испании (АЭС «Кофрентес», «Ванделлос», «Аско», «Гаронья»), западные районы Швейцарии («Мюлеберг»), запад Словакии («Моховце», «Богунице»), восточные области Румынии («Чернавода»), Словения («Кршко»). В перечисленных районах Франции, Испании, Швейцарии, Словакии возможны землетрясения с периодом повторяемости около 500 лет с ускорением грунта 0,1-0,2 g, в Румынии и Словении – 0,2-0,25 g. В частности, по оценке ЕС, в Румынии с повторяемостью 1 раз в 50 лет (сопоставимой со сроком службы станции) возможны землетрясения магнитудой свыше 7,4, которые могут затронуть район размещения АЭС «Чернавода». В названных странах землетрясения, имеющие меньшую повторяемость, могут быть сильнее.

В США сейсмическая угроза признана значимой для десятков энергоблоков, хотя уровень риска сильно различается. Две действующие атомные станции расположены в штатах, входящих в пятерку наиболее сейсмически активных: «Коламбия» в штате Вашингтон и «Дьябло-Каньон» в штате Калифорния (до недавнего времени в последнем регионе действовала еще одна АЭС – «Сан-Онофре»). В районе, где расположена «Дьябло-Каньон», с периодичностью примерно раз в <500 лет возможны землетрясения с ускорением грунта 0,5-0,7 g; те же параметры для «Коламбии» – 0,1-0,2 g, поскольку АЭС расположена в геодинамически более спокойной, восточной части штата. Ряд атомных станций Востока США также находятся в сейсмически достаточно активных районах, в частности «Ви-Си-Саммер» и «Робинсон» (до 0,3-0,4 g раз в <500 лет).

Большинство прочих АЭС, как считается, подвержены меньшему риску, хотя и в их районах возможны события с 0,1-0,3 g при том же уровне вероятности. И одно из таких событий недавно имело место: в августе 2011 года произошел автоматический останов АЭС «Норд Анна» в штате Виргиния из-за землетрясения магнитудой 5,8, в ходе которого максимальное ускорение грунта в районе площадки достигало ~ 0,25 g. Наиболее сейсмоустойчивая действующая АЭС в США – «Дьябло-Каньон»: она рассчитана на максимальное ускорение грунта на площадке в 0,75 g и работу до автоматического останова при 0,4 g (хотя

СУЗ выставлена на более раннее срабатывание защиты). На втором месте – закрытая АЭС «Сан-Онофре», для которой максимальное ускорение для уровня SL-2 составляло 0,67 g.

Высокая сейсмическая активность характерна для регионов размещения действующих атомных станций в Азии. Так, на территории современного Ирана на протяжении последних 100 лет произошло множество сильных землетрясений магнитудой до 7,8. По всей стране встречаются районы, где раз в <500 лет вероятны землетрясения с ускорением грунта в 0,45-0,5 g, а в отдельных областях – до 1 g и выше. В районе размещения АЭС «Бушер» землетрясения с такой повторяемостью достигают 0,3 g и более.

Сейсмической активностью отличается и Пакистан. В средней части страны проходит граница Индийской литосферной плиты, изобилующая активными разломами. Только за последнюю сотню лет в Пакистане произошел целый ряд сильных землетрясений магнитудой до 8,0, в том числе с очагами в Аравийском море около побережья Пакистана. В областях, где размещаются атомные станции «Карачи» и «Чашма», вероятны с повторяемостью 1 раз в <500 лет землетрясения с ускорением 0,15-0,3 g и выше.

К числу наименее спокойных сейсмичных районов планеты относится Тайвань, где расположены три действующие и одна строящаяся АЭС с двумя реакторами каждая. За последние 100 лет на острове зафиксировано около двух десятков землетрясений магнитудой 6,0-8,0. На всей территории Тайваня, сравнимого по площади со средней областью в центре Европейской части России, имеются районы, где раз в <500 лет вероятны землетрясения с 0,5 g и выше.

В Китае высокой сейсмической активностью отличаются многие материковые провинции (где нет ни одной АЭС и пока приостановлено утверждение планов их строительства), а также отдельные прибрежные территории, прежде всего вокруг Ляодунского залива, в провинциях Чжецзян и Фуцзянь. Строящиеся атомные станции, расположенные в этих регионах («Саньмэнь», «Хайян», «Хунъянхэ» и другие) размещены с учетом локализации активных разломов.

Япония расположена в сейсмоактивном районе, где разрушительные землетрясения, которые часто приводят к цунами, происходят несколько раз в столетие. В связи с этим была выражена озабоченность по поводу конкретных рисков строительства и эксплуатации атомных электростанций в Японии. На заседании G8 по ядерной безопасности, состоявшимся в Токио в 2008 году, эксперты МАГАТЭ предупредили, что сильное землетрясение с магнитудой выше 7,0 может создать «серьёзные проблемы» для Японских атомных электростанций [IAEA warned Japan over nuclear quake risk: WikiLeaks, 2011. Однако агентство по ядерной и промышленной безопасности Японии, считало, что станции настолько хорошо спроектированы, что «такая ситуация практически невозможна»[6]. На сегодняшний день, наиболее серьёзный инцидент, связанный с сейсмической активностью, произошёл на станции «Фукусима-1» после землетрясения и цунами 2011 года.

Общие вопросы обеспечения сейсмостойкости АЭС

Существует ряд общих принципов обеспечения сейсмостойкости АЭС, используемых в том или ином виде в различных странах. Как правило, идут от общего к частному: от сейсмического районирования, позволяющего выбрать потенциальный регион размещения, к микрорайонированию и тщательному исследованию собственно площадки и ее частей. Это дает исходный материал для определения возможных нагрузок на элементы АЭС и, соответственно, основных требований к этим элементам при их проектировании.

В рекомендациях МАГАТЭ и нормах целого ряда стран принято разделять сейсмичность, по крайней мере, на два уровня, определяемых всегда индивидуально для конкретной площадки. Первый (уровень Seismic Level-1 или SL-1 в терминологии МАГАТЭ, он же иногда обозначается как S-1) соответствует более вероятному – например, один раз в не-

сколько сотен или тысяч лет, – и менее сильному землетрясению, после которого станция может продолжить работу, как правило, после обследования, но без дорогостоящих восстановительных работ. Теоретически реакторы в ряде случаев могут функционировать при землетрясении первого уровня, но на практике в системах автоматического останова выставляются более низкие значения (обычно в диапазоне 0,1-0,2 g). Кроме того, стандартами ряда стран допускается выход из строя некоторых видов оборудования, не критичного для безопасности.

Второй уровень (SL-2) соответствует менее вероятному землетрясению – например, раз в 10 тыс. лет или реже, – в ходе которого должны гарантированно сохранять работоспособность и функционировать системы, обеспечивающие безопасность станции. Этот уровень часто называют «землетрясением безопасного останова», имея в виду, что при более сильном сейсмическом событии безопасность гарантирована не на 100%. Однако работоспособность другого оборудования, от которого зависит генерация электроэнергии, может быть нарушена, и станция не сможет продолжить функционирование после останова без длительных проверочных и восстановительных работ. К такому оборудованию нередко относят и машинный зал.

Уровни S-1 и S-2 индивидуальны, они могут различаться для разных стран и отдельных АЭС вероятностью и интенсивностью землетрясения, а также заданной реакцией СУЗ на достижение уровня S-1: если для одной станции, построенной, скажем, в 1970-е годы в сейсмически спокойном районе, колебания в 0,125 g превышают планку S-2, то в проекты некоторых АЭС (в Японии, США) заложена техническая возможность работы реактора до останова, например, при 0,3-0,4 g, считающихся экстремальным запроектным землетрясением для большинства других станций.

Нормами ряда государств (США, Великобритании и некоторых других) также предусмотрена возможность анализа «запредельных» сейсмических рисков – гипотетического землетрясения наибольшей интенсивности, в результате которого критически важное для безопасности оборудование сохранит работоспособность с установленной высокой (свыше 90-95%) вероятностью. При этом прочие системы АЭС рассматриваются по остаточному принципу. Этот уровень может превышать S-2 на десятки процентов.

Многоуровневый подход требует разделения элементов АЭС на категории с точки зрения важности функций. Абсолютным приоритетом (первая категория) признаются функции безопасности, включая оборудование неядерной части, ответственное за автономное энергоснабжение, и другие.

Из полученных данных о сейсмике площадки выводятся индикаторы ускорения, включая наиболее наглядный интегрированный показатель – максимальное ускорение грунта. Эти данные становятся отправными для проектных расчетов, и прежде всего для расчетов взаимодействия строений с грунтом, зависящего от характеристик самого грунта (предпочтительны более твердые породы и прочные, необводненные грунты), особенностей геологического основания под осадочными породами, на которых в большинстве случаев покоится станция, а также отклика на колебания элементов зданий, сооружений и оборудования. Последний зависит от множества факторов, таких, как конфигурация зданий, их высота и этажность (на более высоких уровнях амплитуда и нагрузки увеличиваются), собственная частота колебаний конструкций, определяющая возможные резонансы и параметры их затухания, прочностные характеристики материалов и так далее. При проектировании АЭС строятся трехмерные модели колебаний с учетом их распределения по векторам и частоте, модуль и диапазон которой обычно составляет первые несколько десятков герц.

Магнитуда и интенсивность землетрясений, которые могут затронуть данный район, позволяют понять, на какую сейсмику рассчитывать станцию и стоит ли ее строить здесь вообще (если такой выбор имеется; например, при размещении АЭС российских проектов принято избегать районов с возможной интенсивностью выше 9 баллов по MSK). Однако

параметры землетрясений, зафиксированных в новейшей истории человечества, для этого не годятся: научные знания о Земле и теория вероятности свидетельствуют о том, что катаклизмы последних сотен лет – как правило, не самые сильные из возможных в данном районе. Необходимо учитывать редкие события, выходящие за рамки исторического периода развития человечества. При этом во многих странах принято устанавливать определенный лимит «редкости», оставляя за рамками рассмотрения катаклизмы, вероятность которых в данном районе признается ничтожной. Эти лимиты устанавливаются на уровне вероятности, например, один раз в тысячу или десять тысяч лет, иногда больше. Таким образом, для размещения АЭС используются карты (готовые – для районирования и специально созданные – для микрорайонирования) не фактически зафиксированных сейсмических событий, а землетрясений, возможных в данном районе с определенной установленной вероятностью. При этом за основу берутся геодинамические и статистические факторы.

Сейсмические явления могут вызываться как глобальными причинами (движение тектонических плит, деформация Земной коры в зонах спрединга или коллизий, вулканические проявления), так и носить местный характер (карстовые явления, оползни). При проектировании АЭС обычно выбирают районы для их размещения с низкой сейсмичностью. По этой причине до последнего времени вопросам защиты АЭС от сейсмических воздействий не уделялось должного внимания. В таблице 1 приведены данные о крупных авариях на АЭС за последние годы с указанием причин. В основном аварии происходили из-за ошибок персонала. Однако после аварии на АЭС Фукусима (2011 год, Япония), вызванной катастрофическим морским землетрясением, сопровождавшимся цунами, вопросам сейсмической безопасности АЭС стали уделять особое внимание. На большинстве АЭС были развернуты системы сейсмического мониторинга и сейсмической защиты, т. е. аврального предупреждения об опасных подвижках земной поверхности [Антоновская и др., 2001; Гатинский и др., 2011].

После определения сейсмических рисков на самом общем уровне следует стадия детального районирования и микрорайонирования, которые позволят локализовать площадку. Современные стандарты требуют ее размещения в пределах однородного, не нарушенного разломами блока земной коры: размещение на разломе опасно не только интенсивными колебаниями, но и смещениями грунта под строениями и сооружениями станции. Однако в прошлые десятилетия этому принципу следовали далеко не всегда (из-за недооценки рисков либо недостаточных геологических знаний), отчего мир получил целый ряд АЭС, расположенных в опасной близости от разломов, например, в Японии и США.

Помимо сейсмики важными параметрами исследования района площадки являются его геологическое строение, гидрология и преобладающие грунты – все это в совокупности тем или иным образом «преломляет» землетрясение, усиливая или ослабляя его воздействие на инфраструктуру. В идеале, который заложен в стандарты ряда стран, включая Россию, такие исследования масштабируются до уровня даже не всей площадки, а отдельных участков, строений и сооружений атомной станции, для которых может быть определена разная сейсмичность. Сейсмичность площадки отражает наибольший показатель для мест размещения строений и сооружений, важных для обеспечения безопасности станции.

При проектировании АЭС недостаточно учитывать магнитуду и интенсивность предполагаемых землетрясений, поскольку эти характеристики являются слишком обобщенными. Для инженерных расчетов используются конкретные параметры колебаний. Среди них важнейшее место занимает ускорение грунта, по которому можно с максимальной уверенностью судить о потенциальных нагрузках на сооружения и оборудование в зоне землетрясения. Поскольку землетрясение сопровождается колебаниями разных параметров, используется понятие «максимальное ускорение грунта», соответствующее наибольшему значению ускорения.

Помимо модуля, важен и вектор колебаний грунта. Любое землетрясение вызывает колебания точки грунта в разных плоскостях, но вертикальные, как правило, менее разруши-

тельны. К примеру, знаменитое катастрофическое землетрясение в Ташкенте, разрушившее город в апреле 1966 года, сопровождалось относительно небольшим числом человеческих жертв именно из-за преобладания вертикальных колебаний. Если в краткой характеристике сейсмоустойчивости АЭС указывается одна цифра для максимального ускорения грунта, то нередко речь идет о наиболее критичной горизонтальной составляющей (хотя для отдельных элементов вертикальные не менее опасны). Между тем определение ускорения грунта – лишь отправная точка для расчетов необходимой сейсмостойкости. Ведь важны не только и не столько колебания самого грунта, сколько отклик на них элементов зданий, сооружений и оборудования АЭС.

Системы сейсмического контроля и сейсмической защиты для АЭС

Все атомные электростанции европейской части России расположены в пределах Северо-Евразийской литосферной плиты со слабым проявлением сейсмичности и современных тектонических подвижек. В связи с этим, в проектах построенных ранее АЭС не предусматривались специальные меры сейсмического контроля и сейсмической защиты. Однако по результатам анализа воздействия аномальных природных явлений на безопасность АЭС, который был проведен после катастрофических событий на АЭС Фукусима-1 (2011 г., Япония), было принято решение об оснащении всех российских АЭС системами сейсмического мониторинга и сейсмической защиты.

Система сейсмической защиты АЭС

В 2012-2015 годах в ООО «Атомсейсмоизыскания» была разработана, внедрена и пущена в опытную эксплуатацию модернизированная система сейсмической защиты (ССЗ-1М) энергоблоков Смоленской АЭС. Работы выполнялись по заданию АО «Концерн Росэнергоатом». При проектировании был учтён опыт создания и эксплуатации отечественных и зарубежных подобных систем. При этом основное внимание было направлено на надёжность, отсутствие ложных срабатываний, стабильность параметров во времени, защиту от внешних несанкционированных воздействий, оперативную ремонтопригодность [Radeva, 2010; Carlos, Tianjian, 2015; Аракелян и др., 1988, 2017; Аракелян, 2009; Сейсмичность…, 2005; Карты…, 2000].

Следует отметить, что сейсмическая активность в Смоленской области, как и на всей территории Центрально-Европейской платформы России, носит весьма умеренный характер. Вероятность превышения сотрясения в 5 баллов по шкале MSK-64 составляет 0.5% в течение 50 лет при периоде повторяемости 10 тысяч лет [Сейсмичность…, 2005; Карты…, 2000]. Однако, согласно особым нормам, проектирование АЭС производится с учетом двух уровней сейсмичности (а не одного, как для обычных сооружений), а именно: – проектное землетрясение (ПЗ) с повторяемостью 1 раз в 1000 лет; – максимальное расчетное землетрясение (МРЗ) с повторяемостью 1 раз в 10000 лет. Система сейсмической защиты должна быть спроектирована на воздействие максимального расчетного землетрясения с пиковым ускорением грунта не ниже 0,1*g* (7 баллов по шкале MSK-64).

Новую систему сейсмической защиты ССЗ-1М отличает применение современного технического и программного обеспечения, привязка к реальному времени с помощью спутниковой системы ГЛОНАС, оперативная доступность для контроля всех параметров, диагностика возможных неисправностей, архивирование действий оператора и долговременное хранение накопленной информации, подача световой и звуковой сигнализации. Для исключения несанкционированного воздействия на аппаратуру ССЗ-1М извне, внутренняя коммуникационная сеть системы не выходит в Интернет.

Основными требованиями к системе сейсмической защиты являются:

– Надежное выделение сейсмических событий, опасных для работы АЭС.

– Возможность автоматического включения систем защиты реактора.
– Обеспечение своевременного оповещения операторов,
– Уменьшение до минимума вероятности ложных тревог,
– Исключение несанкционированного доступа к системе,
– Регулярный автоматический контроль работоспособности.

Под технической надежностью понимается сохранение работоспособности системы при существенных изменениях внешних условий (температуры, напряжения питания и др.), стабильность параметров элементов во времени, возможность периодической проверки работоспособности аппаратуры без прерывания ее функционирования. Под методической надежностью следует понимать обеспечение уверенного обнаружения критического явления и безусловного оповещения операторов станции, а также регистрация этого явления для последующего анализа результатов его воздействия. Сюда можно отнести выбор места установки датчиков по отношению к охраняемому объекту, выбор и обоснование уровня порогов срабатывания. Организационная надежность подразумевает комплекс мер по безопасному размещению аппаратуры, исключению возможности несанкционированного доступа, регулярного контроля работоспособности.

Работа системы сейсмической защиты ССЗ-1М основана на мажоритарном принципе совпадения сигналов существенных сейсмических событий, зарегистрированных в районе АЭС, в пространстве и во времени (рис. 6). Этот принцип реализуется путем разноса датчиков сейсмических сигналов на определенное расстояние вокруг охраняемого блока АЭС и применением схемы совпадений с определенным временным интервалом. Такой принцип работы предохраняет систему от ложных срабатываний за счет местных помех (транспорт, грузоподъемные операции и др.) и сохраняет чувствительность к сигналам от удаленных сейсмических источников достаточной интенсивности.

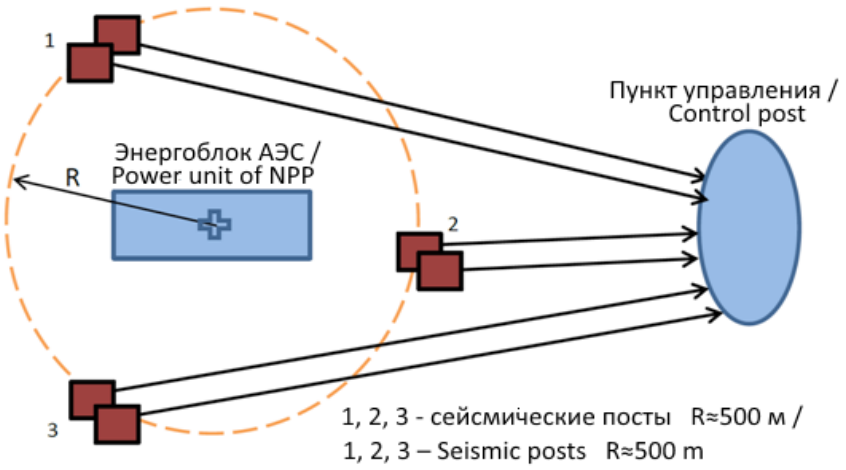

Рис. 6. Принцип организации системы сейсмической защиты ССЗ-1М для АЭС в России.
Fig. 6. The principle of organization of the SSZ-1M seismic protection system for nuclear power plants in Russia.

Система состоит из шести сейсмических групп – по две группы на каждый энергоблок АЭС. Группа содержит три независимых сейсмоизмерительных тракта, датчики которых разнесены по поверхности на расстояния до 500 м вокруг соответствующего блока. В каждом тракте измеряются три компоненты сейсмического сигнала, вычисляется вектор ускорения и сравнивается с установленным порогом. Сигналы, превышающие порог, поступают на схему совпадений с алгоритмом срабатывания два изтрех. Такая схема исключает возникновение ложного сигнала тревоги при локальном воздействии на один из трактов.

Система сейсмического контроля площадок АЭС

Требования к структуре и функционированию региональной сети сейсмического контроля для атомных электростанций имеют существенные особенности, а именно:

– Регистрируются ускорения, а не скорости смещения грунта, в отличие от большинства обычных сейсмологических сетей.

– Сейсмоприемники располагаются на постаменте в непосредственной близости от основных объектов АЭС на свободной поверхности, на средних и скальных грунтах.

– При этом выбор мест расположения аппаратуры и способы ее установки должны минимизировать влияние помех от производственных объектов, транспортных путей, природных источников помех.

– Осуществляется максимальная автоматизация процесса регистрации для уменьшения влияния человеческого фактора на результаты оценки сейсмической опасности.

– Обеспечивается высокая степень технической и организационной надежности всей системы регистрации сигналов, передачи информации в пункт сбора и ее оперативной оценки, и дальнейшего анализа.

Сейсмический контроль на свободной поверхности площадок действующих АЭС выполняется на специально выбранных опорных пунктах регистрации ускорения грунта на 9 площадках действующих АЭС РФ (кроме Билибинской). Постаменты для регистрации сейсмических сигналов опираются на средние грунты, ниже уровня сезонного замерзания и защищены от помех и микросейсм. На рисунке 7. показана структура и схема функционирования региональной сети сейсмологического контроля и регистрации ускорения грунта на площадках АЭС РФ.

Рис. 7. Структура и схема функционирования региональной сети сейсмологического контроля и регистрации ускорения грунта на площадках АЭС РФ. /
Fig. 7. The structure and functioning scheme of the regional network of seismological monitoring and registration of soil acceleration at the NPPs of the Russian Federation.

Опорные пункты на площадках АЭС обеспечивают сейсмический контроль и регистрацию ускорения грунта от локальных, местных и далеких землетрясений по району размещения АЭС.

– Акселерографы способны регистрировать более широкий динамический диапазон колебаний грунта в используемом диапазоне частот 0,02-50 Гц, при пороге чувствительности к ускорениям до 0,001g. При этом лучше регистрируются вступления импульсных воздействий. В сейсмологии сильных движений грунта ключевыми параметрами являются

пиковые ускорения и длительность главной фазы сотрясения, которые определяются по записям акселерограмм.

– В расчетах сейсмостойкости или сейсмической реакции сооружений непосредственно используются акселерограммы колебаний грунта. Частотный состав колебаний в записях акселерограмм и собственных колебаний крупных сооружений в основном достаточно близки друг другу. Записи ускорений служат основой при разработке реальных акселерограмм для проектных рассчетов сейсмостойкости.

– Погрешности, связанные с оцифровкой записей акселерограмм, легче устраняются при числовой обработке. Устанавливается исходное нулевое значение запуска акселерограмм и в последующих расчетах скоростей и смещений корректировки уже не требуются. Записи акселерограмм достаточно легко подвергаются гармоническому анализу и обработке. Специально для нужд проектировщиков существуют современные вычислительные средства по корректировке, фильтрации, конвертации, нормированию и масштабированию этих записей.

В соответствии с принятыми решениями регистрация акселерограмм на площадках АЭС должна проводиться непрерывно с передачей данных по телеметрическим каналам в центр сбора и обработки информации. Системы контроля и регистрации должны быть построены с максимальным использованием однотипной сертифицированной отечественной аппаратуры.

Пункты наблюдения размещаются в специальных металлических утеплённых контейнерах (рис. 8 и 9), установленных на бетонных фундаментах. К контейнеру подводится напряжение 220 В, которое поступает на аппаратуру через блок бесперебойного питания (ББП). Корпус контейнера заземлен. Пункт регистрации оснащен системой связи по интерактивному телеметрическому каналу.

Рис. 8. Контейнер пункта сейсмического контроля Смоленской АЭС. /
Fig. 8. The container of the seismic control point of Smolensk NPP

Рис. 9. Внутренний вид пункта сейсмического контроля Смоленской АЭС. /
Fig. 9. The internal view of the seismic control point of Smolensk NPP

Заключение

Атомная энергетика вносит существенный вклад не только в общий объем производимой и потребляемой энергии, но и в развитие наукоемких технологий, общий интеллектуальный потенциал России.

В настоящее время происходит не только дальнейший рост строительства объектов атомной энергетики, но и особо ответственных объектов – химических заводов, плотин, и других. Несмотря на то, что последние годы наблюдается общее увеличение сейсмической активности, безопасность эксплуатации АЭС постоянно растет. Это во многом связано с

тем что внедряются новые методы автоматического управления АЭС, расширяются функции принятия управленческих решений, требующих быстрого и правильного реагирования, полнее контролируется сейсмичность площадок АЭС. Используются новые материалы при строительстве, снижается вероятность разрушения, это эквивалентно снижению сейсмических ускорений при сильных землетрясениях.

Принимая во внимание постоянное улучшение физико-механических свойств строительных материалов, приходим к выводу, что уже в близком будущем антисейсмическое строительство решит те задачи, которые сейчас требуют усиления и наращивания систем контроля сейсмичности.

Стечение природных катаклизмов на территории расположения АЭС в России, которые могут повлечь за собой аварию, сопоставимую с аварией на станции «Фукусима-1», невозможно. В настоящее время все российские АЭС находятся в зонах низкой сейсмоопасности. В европейской части русской платформы, которая считается устойчивым массивом, землетрясения либо не происходят вовсе, либо происходят, но с небольшой интенсивностью (не более 5-6 баллов по шкале MSK-64). Однако, вследствие высокой социальной ответственности было принято решение оснастить все АЭС России системами сейсмического контроля и сейсмической защиты.

В 2012-2015 годах в ООО «Атомсейсмоизыскания» была разработана, внедрена и пущена в опытную эксплуатацию система сейсмической защиты энергоблоков Смоленской АЭС, которая успешно прошла этап опытной эксплуатации без существенных замечаний.

В 2011-2013 годах была создана региональная сеть сейсмического контроля площадок действующих АЭС. При проектировании был учтён опыт создания и эксплуатации отечественных и зарубежных подобных систем.

Основные аварии на атомных станциях происходили за счет ошибочных действий персонала (Три-Майл-Айленд, США, Чернобыльская АЭС, СССР и др.). Поэтому при разработке систем сейсмической защиты для Российских АЭС существенное внимание уделялось вопросам автоматизации процессов измерений сейсмичности и выработки решений на остановку работы реакторов с минимальным участием операторов. За последние 16 лет на российских АЭС не зафиксировано ни одного серьезного нарушения безопасности, классифицируемого выше первого уровня по Международной шкале ИНЕС.

Литература

1. Антоновская Г. Н., Капустян Н. К., Рогожин Е. А. Сейсмический мониторинг промышленных объектов: проблемы и пути решения. // Сейсмические приборы. – 2015. – Т. 51. №1. – С. 5-15.

2. Аракелян Ф. О. Методика и результаты исследований сейсмической опасности площадок АЭС. – Ереван: Егея, 2009. – 108 с.

3. Аракелян Ф. О., Зубко Ю. Н., Левченко Д. Г. Особенности создания и эксплуатации системы сейсмической защиты для АЭС. // Сейсмические приборы. – 2017. – Т. 53. №3. – С. 20-30.

4. Аракелян Ф. О., Мнацаканян В. Л., Акопян Г. А. Экспериментальные исследования по сейсмозащите сооружений АЭС. // В сб. Экспресс-информация «Энергетика электрификация». Сер. Сооружения атомных электростанций. Вып. 9. – 1988. – С. 11-74.

5. Баутин А. В. Безопасность атомных электростанций: от Чернобыля до Фукусима – 1. // Материалы двадцать первой научно-технической конференции «Системы безопасности – 2012». – М.: Академия ГПС МЧС России, 2012. – С. 42-46.

6. Гатинский Ю. Г., Рундквист Д. В., Владова Г. Л., Прохорова Т. В. Анализ геодинамики и сейсмичности в районах расположения главнейших электростанцийевропейской части России и ближайшего зарубежья. // Пространство и время. – 2011. – Вып. 4. – С. 196-204.

7. Кайоль А., Щапю К., Щоссидон Ф., Кюра Б., Дюонг П., Пелль П., Рище Ф., Воронин Л. М., Засорин Р. Е., Иванов Е. С., Козенюк А. А., Куваев Ю. Н., Филимонцев Ю. Н. Безопасность атомных станций. – Париж: EDF-EPN-DSN, 1994. – 256 с.

8. Карты общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-97. – М. – 2000.

9. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций: НП-031-01. // Ростехнадзор РФ. – 2001.

10. Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. / Отв. ред. Уломов В. И. // ИФЗ РАН. Т. 1-3. – 1993. – 490 с.

11. Andrews A., Folger P. Nuclear Power Plant Design and Seismic Safety Considerations. // Energy and Natural Resources Policy. – 2012 January 12. – Pp. 20-23.

12. Carlos Medel-Vera, Tianjian Ji. Seismic protection technology for nuclear power plants: a systematic review. // Jour. Nucl. Sc. Techn. – 2015. – V. 52. Is. 5. – Pp. 607-632.

13. Forni M. et al. Seismic Isolation of the Iris Nuclear Plant. // Proc. of the 2009 ASME pressure Vessel and Piping Conference. Prague. Czech Republic. July 26-30.

14. IAEA warned Japan over nuclear quake risk: WikiLeaks. March 17, 2011 [Electronic resource]. / https://phys. org/news/2011-03-iaea-japan-nuclear-quake-wikileaks. html

15. Nuclear containments. / State-of-art report prepared by Task Group Containment Structures. – Stuttgart: Federation international du beton, 2001. – Pp. 100.

16. Nuclear & Uranium. August 29, 2019 [Electronic resource]. / https://www. eia. gov/nuclear/generation/

17. Nuclear Power in the USA. August, 2019 [Electronic resource]. / https://www. world-nuclear. org/information-library/country-profiles/countries-t-z/usa-nuclear-power. aspx

18. Operational & Long-Term Shutdown Reactors. 2019 [Electronic resource]. / https://pris. iaea. org/PRIS/WorldStatistics/OperationalReactorsByCountry. aspx

19. Paul Ih-fei Liu. Energy, technology, and the environment. – New York: ASME, 2005. – 275 p.

20. Radeva S. Multiple-model structural control for seismic protection of nuclear power plant. // Nuclear. Engineering and Design. – 2010. – V. 240. Is. 4. – Pp. 891-898.

21. Swarup R., Mishra S. N., Jauhari V. P. Environmental Science And Technology. – New Delhi: Mital publications, 1992. – 329 p.

22. The Database on Nuclear Power Reactors. 2019 [Electronic resource]. / https://pris. iaea. org/pris/

References

1. Antonovskaya G.N., Kapustyan N.K., Rogozhin E.A. Seismic monitoring of industrial facilities: problems and solutions. Seismic instruments. 2015. Vol. 51. No. 1. pp. 5–15. (In Russ.)

2. Arakelyan F.O. Methodology and the results of seismic hazard studies of NPP sites. Yerevan: Egeya, 2009. 108 p. (In Russ.)

3. Arakelyan F.O., Zubko Yu.N., Levchenko D.G. Features of the creation and operation of a seismic protection system for nuclear power plants. Seismic instruments. 2017. Vol. 53. No. 3. pp. 20–30. (In Russ.)

4. Arakelyan F.O., Mnatsakanyan V.L., Akopyan G.A. Experimental studies on seismic protection of NPP facilities. In the collection Express information “Power Electrification”. Ser. The construction of nuclear power plants. 1988. Vol. 9. pp. 11–74. (In Russ.)

5. Bautin A.V. Safety of nuclear power plants: from Chernobyl to Fukushima – 1. Materials of the twenty-first scientific and technical conference “Security Systems – 2012”. M.: Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergencies of Russia, 2012. pp. 42–46. (In Russ.)

6. Gatinsky Yu.G., Rundkvist D.V., Vladova G.L., Prokhorova T.V. Analysis of geodynamics and seismicity in the areas where the most important power plants are located in the European part of Russia and the neighboring countries. Space and time. 2011. Issue 4. pp. 196–204. (In Russ.)

7. Kajol' A., Shchapyu K., Shchossidon F., Kyura B., Dyuong P., Pell' P., Rishche F., Voronin L.M., Zasorin R.E., Ivanov E.S., Kozenyuk A.A., Kuvaev Yu.N., Filimoncev Yu.N. Nuclear Safety. Paris: EDF-EPN-DSN. 1994. 256 p. (In Russ.)

8. Maps of general seismic zoning of the territory of the Russian Federation GSZ-97. Moscow, 2000. (In Russ.)

9. Design norms for earthquake-resistant nuclear power plants: DN-031-01. Rostekhnadzor of the Russian Federation. 2001. (In Russ.)

10. Seismicity and seismic zoning of Northern Eurasia. Ans. ed. Ulomov V.I. IFZ RAS. Vol. 1-3. 1993. 490 p. (In Russ.)

11. Andrews A., Folger P. Nuclear Power Plant Design and Seismic Safety Considerations. Energy and Natural Resources Policy. 2012 January 12. pp. 20–23.

12. Carlos Medel-Vera, Tianjian Ji. Seismic protection technology for nuclear power plants: a systematic review. Jour. Nucl. Sc. Techn. 2015. Vol. 52. Issue 5. pp. 607–632.

13. Forni M. et al. Seismic Isolation of the Iris Nuclear Plant. Proc. of the 2009 ASME pressure Vessel and Piping Conference. Prague. Czech Republic. July 26-30.

14. IAEA warned Japan over nuclear quake risk: WikiLeaks. March 17, 2011 [Electronic resource]. https://phys.org/news/2011-03-iaea-japan-nuclear-quake-wikileaks.html

15. Nuclear containments. State-of-art report prepared by Task Group Containment Structures. Stuttgart: Federation international du beton, 2001. pp. 100.

16. Nuclear & Uranium. August 29, 2019 [Electronic resource]. https://www.eia.gov/nuclear/generation/

17. Nuclear Power in the USA. August, 2019 [Electronic resource]. https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/usa-nuclear-power.aspx

18. Operational & Long-Term Shutdown Reactors. 2019 [Electronic resource]. https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalReactorsByCountry.aspx

19. Paul Ih-fei Liu. Energy, technology, and the environment. New York: ASME, 2005. 275 p.

20. Radeva S. Multiple-model structural control for seismic protection of nuclear power plant. Nuclear. Engineering and Design. 2010. Vol. 240. Issue 4. pp. 891–898.

21. Swarup R., Mishra S.N., Jauhari V.P. Environmental Science And Technology. New Delhi:Mital publications, 1992. 329 p.

22. The Database on Nuclear Power Reactors. 2019 [Electronic resource]. https://pris.iaea.org/pris/