

УДК 621.039.58

АНТОЛОГИЯ КАТАСТРОФЫ НА ЯПОНСКОЙ АТОМНОЙ СТАНЦИИ «ФУКУСИМА-1»

М.Н. Тихонов

Межотраслевой экспертно-сертификационный, научно-технический и контрольный центр ядерной и радиационной безопасности, Международный клуб учёных, Россия, 191028, г. Санкт-Петербург, ул. Моховая, 31

На основе анализа открытых государственных данных и результатов научных исследований систематизирован и обобщён обширный материал о возникновении, углублении вплоть до превращения в катастрофу и ликвидации нештатной ситуации на атомной электростанции «Фукусима-1». Хронологически изложены события, которые имели следствием разрушение зданий и сооружений, гибель людей, эвакуацию населения из зоны радиационного загрязнения. Статья иллюстрирует масштабность и сложность проблем, существующих в сфере обеспечения ядерной и радиационной безопасности населения. Описаны пути минимизации риска возникновения аварийных ситуаций и снижения опасности негативного воздействия на окружающую среду и здоровье населения. Даны представления о различных подходах стран мира к перспективам развития атомной энергетики с учетом последствий аварии на АЭС «Фукусима-1». Приведены сравнительные характеристики различных типов технических решений с позиций безопасности.

Ключевые слова: ядерная энергетика, атомная электростанция, радиационная авария, чрезвычайная ситуация, радиоактивное загрязнение, радиационная безопасность, риски для здоровья.

Катастрофа на японской АЭС «Фукусима-1» в марте 2011 г. – крупнейшая радиационная авария в мире после Чернобыльской АЭС. Осознание причин произошедшего и масштаба последствий этой катастрофы позволяет извлечь полезные уроки на будущее и выработать взвешенное отношение к дальнейшему развитию атомной энергетики с учетом рисков для жизни и здоровья людей.

Следует отметить, что Япония, в отличие от СССР и России, которые полностью раскрыли причины, меры безопасности и прогноз последствий Чернобыльской аварии, крайне неохотно делится информацией об этой катастрофе [16, 24]. В правительственном докладе Японии отсутствует описание необходимых деталей для полного понимания (как специалистами, так и неспециалистами в области проектирования и эксплуатации таких АЭС) произошедших процессов.

Ядерная энергетика в Японии стала приоритетной с 1973 г. В 2010 г. в стране эксплуа-

тировалось 54 блока атомных станций, вырабатывающих 46823 МВт (э), строились ещё 2 блока мощностью 2650 МВт, всего планировалось построить 14 блоков. За счёт действующих станций покрывалось 30 % энергетических потребностей. По установленной мощности Япония занимала третье после США (104 реактора) и Франции (58) место в ядерной мировой энергетике. К 2017 г. планировалось довести уровень ядерной энергетики в стране до 40 %, в 2030 г. – до 50 % и обеспечить замкнутый ядерный цикл. По плотности размещения АЭС (в кВт на 1 км²) Япония (86,1) занимала пятое место после Бельгии – 194,1, Южной Кореи – 188,5, Тайваня – 138,3 и Франции – 116,0.

В трёх северных префектурах Мияги, Фукусима, Ибараки находится 14 ядерных энергоблоков. В результате мартовского землетрясения 2011 г. 11 блоков были остановлены автоматически. Все реакторы на северо-востоке Японии относились к типу кипящих корпусных водо-водяных реакторов BWR, второй по рас-

© Тихонов М.Н., 2015

Михаил Николаевич Тихонов – специалист, академик Международной академии наук экологии, безопасности человека и природы (МАНЭБ) (e-mail: dtrec@peterlink.ru; тел.: 8 (812) 233-58-06).

пространённости конструкции ядерных реакторов в мире с проектным сроком эксплуатации 40 лет [24].

Атомная электростанция «Фукусима-1» входила в число 25 крупнейших АЭС мира (6 энергоблоков мощностью 4,7 ГВт). Это первая АЭС (первый энергоблок введён в эксплуатацию в 1970 г.), построенная и эксплуатирующаяся японской компанией ТЕРСО по проектной документации, разработанной в 60-х – начале 70-х гг. прошлого века. За вычетом времени на плановые ремонты и перегрузки топлива, срок эксплуатации первого энергоблока приближался к 40 годам, и в 2014–2015 г. он должен был выводиться из эксплуатации. В 11,5 км южнее расположена АЭС «Фукусима-2» общей мощностью 4, ГВт, также находящаяся в эксплуатации этой компании.

Реакторные установки для I, II и VI энергоблоков были сооружены американской корпорацией General Electric, для III и V – Toshiba, для IV – Hitachi. Все 6 реакторов спроектированы корпорацией General Electric. Архитектурное проектирование энергоблоков выполняла компания Ebasco.

Строительные конструкции возводила японская фирма Kajima. Реакторная установка оснащена системами поддержания качества теплоносителя, газового удаления (прежде всего водорода, образующегося в процессе радиолиза воды в активной зоне), отвода остаточного тепла от активной зоны при остановке реактора и системами безопасности. В 1990–2000 гг. эксплуатирующая организация приняла ряд дополнительных мер по управлению запроектными тяжёлыми авариями и внесла изменения в схемы и процедуры АЭС [20, 24]. За время, прошедшее с начала пуска этих блоков, на них были проведены реконструкции, направленные на исключение ошибок персонала.

Уровень планировки земельного участка для размещения основных зданий находится на 10 м выше уровня моря. Для защиты причала и водозаборных сооружений от воздействия волн построена защитная дамба высотой 5,7 м.

26 марта 2011 г. I блоку «Фукусимы-1» исполнилось 40 лет. За месяц до аварии было получено разрешение на продление лицензии на его эксплуатацию.

К строительству атомных станций в зонах повышенной сейсмической активности предъявляются очень строгие требования, реакторы отключаются при малейшей угрозе подземных толчков поблизости [3]. Несмотря на постоян-

ную сейсмическую активность, до определённого времени удавалось избежать серьёзных инцидентов на ядерных реакторах. Землетрясения происходят в Японии почти ежедневно, большинство из них незначительны и не приносят никакого урона. Однако, по оценкам специалистов Комитета изучения землетрясений Японии, вероятность появления в течение 30 лет у побережья префектуры Мияги землетрясения с магнитудой 7,5 балла составляет 99 %. Разрушительное землетрясение может произойти в любой точке страны, лежащей на стыке сразу четырёх тектонических плит – Тихоокеанской, Североамериканской, Евразийской и Филиппинской. Плиты подползают под Северо-Американскую и Евразийскую плиты со скоростью 8,5 и 6,5 см в год соответственно. Вдоль восточного склона острова Хонсю тянется Японский жёлоб протяженностью 1000 км и глубиной до 8412 м. Области с большим скольжением во время анализируемого землетрясения находились недалеко от южного разлома с максимальным скольжением более 20 см.

За подводными толчками очень часто следует цунами. При этом от эпицентра расходятся гигантские волны, скорость которых может достигать 1000 км/ч. Вблизи побережья скорость волны снижается до 500 км/ч, её высота растёт, а сила становится ещё более разрушительной. На сей раз высота волн цунами составила 23 м. По мнению специалистов, нынешнее землетрясение на северо-востоке Японии по мощности превосходит самые крупные землетрясения в 1923 и 1995 г. Область источника этого землетрясения была свыше 400 км длиной и около 200 км шириной. Процесс разрыва земной коры продолжался в течение 170 с. Последовательность разрыва и магнитуда землетрясения в 9,1 балла были сверх ожидания. Интенсивности в районе АЭС Онагава, «Фукусима-1, -2» и «Токай» составили более 5 баллов. Средний уровень оседания земли вдоль побережья района Мияги в префектуре Фукусима во время этого землетрясения составлял около 0,8 м.

Авария на АЭС «Фукусима-1» продемонстрировала, насколько высока вероятность реализации самого мрачного сценария в ядерной энергетике. Атомная станция подверглась практически одновременно воздействию двух природных факторов: рекордного по мощности землетрясения (магнитудой 9,1 балла по шкале Рихтера) и рекордной по высоте волны цунами. Эпицентр землетрясения находился в океане в 70 км от острова Хонсю на глубине 24 км,

в 80 км восточнее территории, где расположена АЭС «Онагава», и в 150 км северо-восточнее от обеих АЭС «Фукусима-1, -2». Волна цунами вблизи АЭС превысила высоту 7 м [17, 18, 24].

Хронология начальных событий на АЭС «Фукусима-1» следующая [15, 18, 20, 24].

11 марта в 14:46 у побережья острова Хонсю на глубине 24 км произошло 9-балльное землетрясение. В момент землетрясения сработала антисейсмическая защита реакторов, отключившая I, II и III энергоблоки «Фукусимы-1» и соответственно турбогенераторы. IV, V и VI энергоблоки не работали из-за прохождения планового технического обслуживания. Топливо из IV реактора было изъято в ноябре 2010 г. Блок № 5 с 3 января 2011 г., как и блок № 6 с 14 августа 2010 г., находились в плановом ремонте. В день землетрясения блок № 5 был загружен топливом и проходил гидравлические испытания на плотность, блок № 6 был загружен топливом, уплотнён и расхоложен.

Подземные толчки спровоцировали отключение атомной станции от японской электросети, но автоматически подключились все 13 аварийных резервных дизельных генераторов, которые продолжили охлаждение. Оператор станции – Токийская электроэнергетическая компания (TEPCO) – уведомила соответствующих должностных лиц о произошедшем событии на АЭС. После фиксации землетрясения была задействована система оповещения о возможности появления цунами. О цунами объявлялось трижды: через 3, 28 и 44 мин после землетрясения. Организация оповещения была осложнена многочисленными разрушениями после землетрясения систем связи и отсутствием их электроснабжения.

В **15:27** первая волна цунами ударила по атомной электростанции. Наблюдаемый уровень цунами в точке Miako составлял 8,5 м и более, в точке Ayukawa в г. Ishinomaki – 8,6 м и более и в точке Soma – 9,3 м и более. Вторичное, основное цунами прибыло в **15:35**. Уровень воды на шкале датчика составлял 7,5 м. Общая площадь затопления достигла 561 км².

Поврежден аварийный конденсатор первого энергоблока, предназначенный для охлаждения пара внутри резервуара под давлением. В **15:46** 14-метровая волна цунами превысила заграждающую дамбу, затопив сооружения АЭС «Фукусима-1», вывела из строя резервные дизельные генераторы 1, 2-го и 3-го блоков (кроме одного, расположенного в своём здании на относительно высоком месте на первом цокольном этаже здания реактора № 6) и смыла

топливные баки. Генераторы предназначались для аварийного расхолаживания реакторов. Реакторные установки блоков № 1–5 остались без аварийного электроснабжения, блок № 6 при одном действующем дизель-генераторе не полностью потерял переменный ток. Были также затоплены все системы водоснабжения морской водой систем отвода тепла от оборудования АЭС.

В первые часы после полного обесточивания в 15:37 11 марта персоналом станции были приняты меры по восстановлению работы важных приборов, освещения блочных пунктов управления (БПУ) и по организации подачи воды в реакторы и бассейны хранения топлива с помощью системы пожаротушения, имеющей не только электронасосы, но и насосы с приводом от двигателей внутреннего сгорания. Работы практически проводились в полной темноте. Использовались ручные фонарики. Для восстановления работы приборов были использованы аккумуляторы большегрузных автомобилей, для восстановления электроснабжения привлекались передвижные дизельные электростанции. Были приняты меры по восстановлению подачи энергии от внешних источников. Постоянные повторные землетрясения и предупреждения о повторных цунами дезорганизовывали работу.

Из-за отсутствия электропитания приборов и возможности дистанционного управления оборудованием персонал станции столкнулся с огромными трудностями при проведении противоаварийных операций. Была нарушена телефонная связь. Остался один проводной канал между БПУ и центром управления аварией. Система начала использовать паровые насосы с батарейным питанием клапанов.

В **18:00** уровень воды в первом реакторе понизился до вершин топливных стержней. В **19:03** премьер-министр Наото Кан объявляет 4-й аварийный ядерный статус по Международной шкале ядерных событий INES (авария с локальными последствиями).

В **19:30** топливные стержни первого реактора полностью показываются над поверхностью воды. В **21:23** Правительство Японии издаёт распоряжение об эвакуации людей в радиусе 3 км вокруг АЭС «Фукусима-1» и о необходимости оставаться в помещениях для жителей 10-километровой зоны.

Продолжительная нехватка электричества на Фукусиме Даичи истощает батареи резервных модулей постоянного тока, стало невозможно контролировать параметры и дистан-

ционно управлять трубопроводной арматурой. Уровень воды в реакторе уже не контролировался. Давление в ядерных реакторах возрастает из-за снижения уровня теплоносителя. ТЕРСО объявила, что уровень давления в первом реакторе вдвое превышает нормальный. В **16:36** в связи с отказом системы охлаждения активной зоны ТЕРСО в соответствии с действующими правилами объявила о чрезвычайной ситуации на АЭС.

Пар отводился и конденсировался в тороидальном бассейне, в нижней части реакторного помещения. Когда несколько метров воды над активной зоной испарились (в первом блоке это произошло через 8 ч), тепловыделяющие элементы (ТВЭЛы) начали обнажаться и перегреваться. При температуре 1200 °С водяной пар вступил в реакцию с циркониевыми оболочками ТВЭЛов. Скорость этой экзотермической реакции зависит не только от температуры, но и от давления пара. Давление в защитной оболочке (контейнменте) и тороидальном конденсаторе (компенсаторе давления – барботёре) быстро росло. В **4:15 12 марта** давление в контейнменте по записям персонала достигло 840 кПа (проектное – 427 кПа). В 05:14 продолжается рост радиации на площадке, затрудняющий проведение работ.

Руководство ТЕРСО оказалось перед выбором: сбросить давление для уменьшения угрозы взрыва или ждать, когда расплавится активная зона. Слабым местом оказался тор, он взорвался. Водород попал в помещение реакторного блока после продувки барботёра в вентиляционную трубу (помещения реакторного здания по проекту использовались в качестве вторичной защитной оболочки). Первая искра привела к взрыву гремучей смеси. Этого можно было избежать, если бы руководство станции своевременно приняло решение о подаче в реакторы морской воды. Но морская вода делала реакторы непригодными для дальнейшей эксплуатации. Из-за интересов коммерции решение об использовании морской воды на тот момент было отложено.

В **05:30**, несмотря на высокий риск воспламенения водорода вследствие реакции с кислородом, принимается решение сбросить пар, содержащий небольшое количество радиоактивных веществ в защитную оболочку, чтобы ослабить давление внутри реактора 1 «Фукусимы-1». В связи с закачкой свежей (пресной) воды в первый реактор в 05:46 12 марта развитие повреждения корпуса реактора приостано-

вилось. В 06:50 ядро первого реактора расплавилось и упало на дно корпуса реактора (в тот момент это было неизвестно). Для предотвращения разрушения контейнмента в 09:15 вручную был открыт на 25 % моторный клапан сброса парогазовой смеси из защитной оболочки в вентиляционную трубу.

В 10:09 небольшое количество пара было сброшено в атмосферу для снижения давления в реакторе I блока «Фукусимы-1». Снижение давления также было необходимо для того, чтобы позволить пожарным в связи с исчерпанием запасов чистой воды закачать морскую воду непосредственно в реактор. В 14:00 был произведён ручной сброс давления в защитной оболочке. В 14:50 закачка воды в первый реактор останавливается.

Около 15:36 произошёл взрыв в верхней части реакторного здания. Расчёты показывают, что в реакторе блока № 1 могло выделиться около 800 кг водорода. В результате взрыва крыша и внешние стены операционного зала в верхней части здания реактора, а также крыша здания переработки отходов были разрушены. Радиоактивные вещества были выброшены при взрыве в окружающую среду. В результате плавления топлива и последующих утечек газов из защитной оболочки в окружающую среду были выброшены все благородные газы, около 1 % теллура, около 0,7 % йода и около 0,3 % цезия.

В **19:04** в реактор первого блока начинается закачка морской воды непосредственно в защитную оболочку реактора с помощью пожарных машин.

Давление во втором реакторе «Фукусима-1» регулировалось автоматически предохранительными клапанами, работа которых совместно с системой охлаждения изолированной активной зоны RCIC привела к росту температуры в барботёре. В 15:30 зафиксирована тенденция к повышению температуры в барботёре. В 15:36 насосы системы отвода остаточного тепла RHR последовательно остановились из-за повреждения цунами систем электроснабжения. Из-за наводнения были потеряны два дизель-генератора, панели распределения питания и аварийные шины, включая систему постоянного тока, насосы морской воды для охлаждения. Наступило полное обесточивание блока. Были отключены средства дистанционного контроля, освещения, отвода остаточного тепла от реактора.

В 22:00 11 марта уровень воды в реакторе был достаточным (+3 м). С 04:20 по 05:00 12 марта уровень воды в баке запаса конденсата сни-

жался, а в барботёре – увеличивался. Для продолжения работы системы RCIC забор воды для неё был переведён на барботёр, то есть была заменена холодная вода из бака запаса конденсата на воду барботёра, разогреваемую сбросами пара из реактора через предохранительные клапаны. Около 12:00 12 марта давление в барботёре превысило таковое в защитной оболочке. Возник обратный переток неконденсирующихся газов из барботёра в защитную оболочку; 13 марта давление остаётся высоким. Для его снижения принимается решение сбросить радиоактивный пар в атмосферу.

12 марта ТЕРСО признала отказы систем расхолаживания трёх из четырёх блоков АЭС. Из-за отсутствия охлаждения температура в активной зоне реакторов превысила 1800 °С. В результате термической диссоциации оставшаяся в активной зоне вода стала разлагаться на кислород и водород. По достижении предельного давления газов и взрывоопасной концентрации водородно-кислородной смеси произошёл взрыв, вызвавший разрушение конструкций, включая оболочку и защитный корпус реактора. Вследствие этого случился выброс в атмосферу радиоактивных нуклидов и значительное тепловое, газовое и химическое загрязнение окружающей среды. В прессе появляется информация об обнаружении вблизи станции радиоактивного цезия. Интенсивное тепловое загрязнение привело к возникновению высокотемпературных пожаров. Дальнейшее выделение тепловой энергии в активной зоне реакторов при отсутствии отвода тепла привело к расплаву ТВЭЛов и образованию кориума, который под действием высоких температур начал испаряться.

Топливные стержни первого блока стали видны над водой через 4 ч после аварийного отключения станции, полностью расплавились через 16 ч. На расплавление ТВЭЛов блоков понадобилось 60 ч, на расплавление ректора – 100 ч.

В **02:40** батареи резервного питания компенсатора давления III реактора вышли из строя. В **04:15** обнажились топливные стержни III реактора. Из-за цунами были потеряны насосы морской воды, осуществляющие отвод тепла от остановленных реакторов № 5 и 6. После потерь систем охлаждения давление в реакторах за счёт остаточного тепла увеличилось, достигнув в блоке № 5 почти 8 МПа. В 06:06 12 марта был сделан сброс давления из корпуса реактора № 5, однако оно вновь продолжало расти из-за остаточного тепловыделения.

12 марта в 05:44 эвакуация объявлена из 10-километровой зоны. В 15:30 объявляется эвакуация жителей трёхкилометровой зоны в радиусе станции «Фукусима-2», а в **18:25** – жителей из 20-километровой зоны вокруг АЭС «Фукусима-1». В **15:36** происходит мощный взрыв водорода во внешней оболочке первого блока, что приводит к её разрушению. Ранено четверо рабочих.

В **21:40** зона эвакуации вокруг «Фукусимы-2» расширяется до радиуса 10 км.

На блоке № 3 после остановки 13 марта в 02:42 системы НРСИ подача воды в реактор началась только в 09:25, плавление топлива – в 07:40. Так же, как и на блоке № 2, задержка подачи воды в реактор связана с проблемами со сбросной пневмоарматурой, возникшими при проведении операции по снижению давления в реакторе. Проблемы управления пневмоарматурой возникали и в другие моменты аварии, в том числе при сбросе давления из защитной оболочки, чего требовала технология «сброс-подпитка».

13 марта в 04:00 давление в корпусе реактора падало до 0,5 МПа, а в 14:00 зафиксирован подъём давления до 0,6 МПа, в 18:00 давление под оболочкой снова начало падать. Предполагают, что эти явления связаны с процессами разуплотнения корпуса реактора и защитной оболочки.

13 марта объявлено о возможном частичном расплавлении III реактора. К **13:00** в I и III реакторах снижено давление и заново заполнены водой и борной кислотой для охлаждения и сдерживания ядерных реакций.

Началась массовая эвакуация населения из 20-километровой зоны вокруг «Фукусимы-1» (эвакуировано около 170 тыс. человек) и 10-километровой зоны вокруг «Фукусимы-2» (около 30 тыс. человек).

13 марта с помощью конденсатного насоса подпитки, который получил электропитание от аварийного дизель-генератора блока № 6, в реакторы № 5 и 6 успешно была закачана вода. После 14 марта давление в реакторах регулировалось с помощью управления предохранительными клапанами реакторов, а уровень воды – посредством неоднократной заливки реакторов водой из бака запаса конденсата конденсатным насосом подпитки.

Утром 14 марта ускорился рост давления в корпусе реактора № 2, с 11:30 уровень воды в реакторе начал падать. Рост давления продолжался до 13:25, около 12:00 система RCIC

остановилась, в 16:20 уровень воды в реакторе упал до верхнего уровня топливных сборов, что означало потерю охлаждения реактора. Эксплуатирующая организация сделала об этом сообщение. В 16:34 началась операция по открытию предохранительных клапанов с целью снижения давления в корпусе реактора альтернативной закачкой воды низконапорными пожарными насосами, к 18:00 зафиксировано снижение давления, уровень воды в реакторе упал.

В связи с возникшими проблемами подачи воздуха для управления пневмоприводами предохранительных клапанов до первых часов 15 марта происходило труднообъяснимое изменение давления в корпусе реактора и защитной оболочке и соответственно уровня воды в реакторе. В 19:54 начата закачка морской воды в реактор с помощью пожарных насосов. Таким образом, перерыв в охлаждении активной зоны с 13:25 составил 6 ч 29 мин, топливо расплавилось и переместилось в нижнюю часть корпуса реактора. Альтернативная закачка воды была мала, и через 80 ч после землетрясения, приблизительно в 22:50 14 марта – 04:00 15 марта, корпус реактора был повреждён. Предполагалось, что вода уходила из нижней части корпуса реактора через его неплотности.

В 00:00 15 марта сделан повторный сброс давления в защитной оболочке. В 06:10 произошёл взрыв водорода. Реакторное здание не повреждено, частично разрушена крыша соседнего здания обработки отходов. Произошёл сброс радионуклидов в окружающую среду, дозы облучения в помещениях увеличились. Предполагается, что к этому времени в реакторе произошла пароксидокислородная реакция, и образовавшийся водород (по расчётам от 350 до 800 кг) через открытые предохранительные клапаны реактора попал в барботёр, где и взорвался. Расчётами показано, что в окружающую среду были выброшены благородные газы, 0,4–7,0 % йода, 0,4–3,0 % теллура и 0,3–6,0 % цезия.

14 марта около 9 ч у побережья Хонсю происходит новое сильное землетрясение мощностью в 6,2 балла.

14 марта в 11:01 произошёл взрыв водорода (по расчётной оценке около 600 кг) в верхней части здания III энергоблока, ранено 11 человек. Реактор и его защитная оболочка не повреждены. Взрыв разрушил зал обслуживания реактора, северную и южную наружные стены этажа, расположенного под этим залом, и здание по переработке отходов, произошло возгорание масла системы управления частотой

вращения насосов рециркуляции, расположенной в сильно повреждённой западной стороне на четвёртом этаже этого здания, нарушено водоснабжение второго блока. II реактор содержал воды меньше нормального уровня (считалось, что он стабилен, несмотря на то что давление внутри реактора было высоким). По заявлениям ТЕРСО, выбросов радиоактивных веществ не произошло, кроме того, что выброшено при сбросе пара.

Взрыв повредил временные охлаждающие системы, возникли проблемы с вентиляционными системами, в результате чего II реактор оказался в самом тяжёлом состоянии. Взрыв в компенсаторе давления **15 марта** вызвал повреждение оболочки II блока. В IV энергоблоке вспыхнул пожар, затронувший отработавшие топливные стержни. Уровень радиации на станции значительно возрос. Расчётами показано, что в окружающую среду были выброшены благородные газы, 0,4–0,8 % йода и 0,3–0,6 % других нуклидов. Радиационная эквивалентная доза в помещении в непосредственной близости от III энергоблока составила 400 мЗв/ч (естественным уровнем природной радиации считается 0,1 мкЗв/ч) [1].

Зона в радиусе 30 км вокруг станции объявляется закрытой для полётов самолётов. По некоторым данным, на 15 марта были эвакуированы от 185 до 200 тыс. человек. Начинается исход иностранцев – многие зарубежные компании и представительства эвакуируют своих работников из Японии. В США начинают готовиться к возможному приходу радиоактивного облака. В мире прокатывается новая волна протестов против атомных станций [2, 4, 22].

В здании блока № 4 11 марта с приходом цунами остановились один работающий аварийный дизель-генератор, насосы морской воды и были затоплены распределительные устройства. Функции охлаждения и водоснабжения бассейна отработавшего топлива были потеряны. К 04:08 14 марта охлаждение воды в бассейне отработавшего топлива блока № 4 отсутствовало и температура воды поднялась до 84 °С. Хранившееся отработавшее топливо нагрелось до высокой температуры из-за низкого уровня воды, и взрыв был вызван водородом вследствие реакции паров воды с цирконием оболочек ТВЭЛов. Кроме того, на соседнем блоке № 3 образовалось большое количество водорода в результате повреждения активной зоны, и его часть была выпущена из контеймента в вентиляционную трубу, общую для блоков

№ 3 и 4 (вытяжной воздуховод блока № 3 соединяется с таким же воздуховодом блока № 4 до ввода их в ствол вентиляционной трубы).

Водород при вентиляции контейнмента блока № 3 мог затечь в помещения блока № 4. В 06:10 15 марта произошёл взрыв водорода в здании реактора № 2. Вся верхняя часть зала обслуживания реактора, западная стена и стена этажа ниже этого зала вдоль лестницы рухнули. В результате внешнего осмотра после взрыва утечек воды и трещин не обнаружено, топливо в бассейне отработавшего топлива блока № 4 не повреждено.

Из-за опасно возросшего уровня радиации (до 1 Зв/ч) ТЕРСО приостановила работы на станции и эвакуировала персонал. Утром 15 марта их было 800 человек, к вечеру осталось только 50. Из-за высокой радиации сотрудники могли находиться на пункте управления не более 10 мин.

16 марта в 14:30 ТЕРСО объявила, что вода в хранилище топливных стержней IV энергоблока может закипеть, увеличивая вероятность достижения критического уровня уязвимости топливных стержней. В 09:38 обнаружен пожар в северо-западной части четвёртого этажа здания реактора, но около 11:00 он прекратился. В 05:45 над станцией «Фукусима-1» появился белый дым, предположительно исходящий от III энергоблока. В прессе появляется информация об обнаружении вблизи станции радиоактивного цезия. С телеобращением к нации выступил император Акихито, что происходит лишь в исключительных случаях. В V и VI энергоблоки стали заливать воду.

17 марта вертолёты гражданской обороны четырежды сбрасывали воду на реакторы III и IV энергоблоков. Во второй половине дня было объявлено, что IV реактор заполнен водой и ни один из топливных стержней не остаётся открытым.

Начаты восстановительные работы внешнего электрического снабжения всех шести энергоблоков «Фукусимы-1». Затопление нижних отметок турбинного здания, где находилась основная масса кабельных трасс, радиоактивной водой, которую некуда было откачивать, затрудняло прокладку новых кабелей и ввод их в щитовые устройства. Большое количество щитовых устройств требовало сушки и испытаний перед подачей напряжения. Местность была загромождена остатками разрушенных землетрясением и цунами зданий и транспорта. Требовалось устранить повреждения оборудо-

вания внешнего электроснабжения или создать временные обходные схемы.

Взрывы привели к повреждению временных коммуникаций и пожарных машин. Для тушения пожаров и охлаждения повреждённых реакторов ликвидаторы использовали уцелевшие стационарные средства, переносные приспособления, плавательные средства и летательные аппараты, способные подавать к очагу аварии морскую воду, пожарные машины, имеющие насосы с моторным приводом. Для подачи воды через разрушенные взрывами перекрытия были привлечены водомёты для разгона демонстраций и строительные бетононасосы, которые оказались наиболее приемлемыми для таких операций. Но их производительность была недостаточной для устранения интенсивного тепловыделения в повреждённых реакторах.

С 19:00 полицейские и пожарные при помощи пожарных рукавов с высоким давлением воды пытались распылить воду над III энергоблоком. Вода подавалась в верхнюю часть разрушенного защитного корпуса реактора, попадала в зону высоких температур, не на источник теплового выделения, мгновенно превращалась в пар, разлагавшийся на кислород и водород, приводящих к новым взрывам. Для распыления воды непосредственно в реакторы президент компании Chio Construction предложил использовать два установленных на грузовиках бетононасоса.

Разрушение зданий I, III и IV блоков сыграло и положительную роль: улучшилось охлаждение контейнментов реакторов, а значит, и самих реакторов. Съёмка тепловизором показала, что температура кровельного покрытия II блока, здание которого было слабо повреждено, поднималась выше 150 °С. Можно представить, какой была температура в самом здании и тем более внутри реактора. Такая же картина характерна для блоков I и III.

18 марта токийский пожарный департамент направил тридцать пожарных машин с 139 пожарными и командой спасателей, включая пожарный грузовик с 22-метровым водонапорным насосом для распыления охлаждающей воды. **19 марта** их сменила команда из 100 токийских и 53 осакских пожарных. Вода распылялась в течение 7 ч, что позволило снизить температуру на III блоке до 100 °С, а уровень радиации понизить с 351,4 до 265 мЗв/ч. Высокий уровень радиации (150 мЗв/ч) был обнаружен на территории тридцати километров на северо-запад от станции «Фукусима-1». Япон-

ские власти присвоили ситуации уровень «5». Потеря охлаждения активной зоны IV энергоблока была классифицирована как уровень «3». Компания ТЕРСО сообщила, что все четыре энергоблока «Фукусимы-1» перешли в режим «холодного останова», то есть температура охладителя в них стала ниже 100 °С, и все системы охлаждения полностью работоспособны, налажена их стабильная работа.

19 марта был установлен временный насос морской воды для активации системы охлаждения реакторов RHR блоков № 5 и 6. Топливо в реакторах и в бассейнах хранения поочерёдно охлаждается путём переключения системы RHR. 20 марта в 14:30 реактор № 5 и в 19:27 реактор № 6 приведены в состояние «холодного останова».

20 марта ко II энергоблоку было подключено внешнее электричество, продолжились работы по восстановлению оборудования. Отремонтированные дизельные генераторы VI энергоблока позволили запустить охлаждение V и VI энергоблоков, что снизило температуру воды в их бассейнах до нормальной. Генеральный секретарь Кабинета министров Эдано объявил, что ядерный комплекс «Фукусима-1» будет закрыт, как только минует кризис. С 21 марта введены ограничения на употребление различных сельскохозяйственных культур.

В **15:55 21 марта** над III энергоблоком появился серый дым. Работы по восстановлению энергоснабжения приостановились из-за вероятного возникновения пожара. В **18:22** белый дым, сопровождавшийся временным повышением уровня радиации, был замечен над II энергоблоком. **21 марта** ТЕРСО было заявлено, что с восстановлением энергоснабжения кризис не закончится, так как повреждённые системы охлаждения ремонту не подлежат, их нужно менять. **22 марта** дым над II и III энергоблоком сохраняется. Возобновились ремонтные работы, так как повышения уровня радиации нет. Продолжилась закачка морской воды в I, II и III энергоблоки. Ко всем шести энергоблокам подведены кабели резервного энергоснабжения.

Из-за чёрно-серого дыма, вновь появившимся над III реактором **23 марта**, сотрудников снова эвакуировали. Внутри повреждённого здания реактора возник небольшой пожар. За счёт восстановленной системы водоснабжения I энергоблока увеличено количество воды внутри реактора. В токийской питьевой воде выявлен уровень радиации, вдвое превышающий норму.

21 марта подано напряжение от внешнего источника на блок № 5, 22 марта – на блок № 6, восстановлено освещение БПУ блока № 3; 23 марта велось подключение кабелей для питания механизмов на блоке № 2; 24 марта восстановлено освещение на БПУ блока № 1.

На 23 марта эвакуировано более 320 тыс. человек, с учётом и людей, эвакуированных из-за цунами. К 24 марта уровень радиации вблизи станции снизился до 200 мЗв/ч. Трое рабочих подверглись радиоактивному облучению из-за просочившейся в защитные костюмы радиоактивной воды, двоим работникам понадобилась срочная госпитализация. Инфракрасное обследование зданий реакторов показало, что температура I, II, III и IV энергоблоков снизилась до 11–17 °С, температура в контуре реактора 30 °С.

25 марта в турбинах I и II энергоблоков была также обнаружена радиоактивная вода. По-видимому, в защитной оболочке реактора появилась пробоина. Содержание йода-131 в морской воде составило 50 Бк/мл, что в 1250 раз превышало норму. **26 марта** уровень радиации около станции ещё высок – 170 мЗв/ч. Появилась возможность заполнения реакторов пресной водой, доставленной на двух баржах ВМС США, вместо морской до необходимого уровня. **27 марта** уровень радиационного загрязнения воды на II и III энергоблоках был выше 1000 и 750 мЗв/ч соответственно. Технические работы по восстановлению системы охлаждения повреждённых энергоблоков отложены. Видеозапись вертолетами сил гражданской обороны позволила получить более точную картину повреждений:

- белый дым-пар над зданиями II, III и IV энергоблоков;
- крыша здания II энергоблока сильно повреждена, но ещё цела;
- на здании III энергоблока отсутствует крыша, разрушенная взрывом водорода, произошедшего через две недели после катастрофы;
- стены здания IV энергоблока также разрушены.

28 марта радиоактивная, по-видимому, субстанция из расплавленных топливных стержней II энергоблока попала в воду, используемую для охлаждения, которая просочилась в подвал здания, где расположены турбины II энергоблока. Количество закачиваемой воды во II энергоблок было уменьшено с 16 до 7 т, что могло вызвать повышение температуры реактора. Из-за высокорadioактивной воды приостановлены работы по восстановлению насо-

сов охлаждения и других мощностей с I по IV энергоблок. Небольшое количество плутония обнаружено в пяти образцах, найденных с **21 по 22 марта** в двух местах на станции (в области твёрдых отходов и в поле).

29 марта продолжилось распыление воды над I–III реакторами. Радиоактивная вода начала поступать в каналы технического назначения за пределами зданий трёх энергоблоков. Это не позволяло продолжить восстановление охлаждающих и других автоматизированных систем.

30 марта председатель совета директоров ТЕРСО Ц. Катсумата объявил на пресс-конференции, что не ясно, как могли бы быть решены проблемы на станции. Безотлагательным было удаление радиоактивной воды из подвалов зданий и соли из реакторов, образовавшейся из-за использования морской воды.

31 марта выкачена радиоактивная вода из канала технического назначения около I реактора в спецёмкость рядом с IV реактором. Вода из конденсаторов II и III энергоблоков выкачена во внешние резервуары. Самый большой в мире бетононасос направлен в Фукусиму из США. 62-метровый насос пожертвовал китайский производитель SANY.

2 апреля обнаружено, что через 20-сантиметровую трещину в бетонном канале для кабеля энергоснабжения насосов, соединяющим море и II энергоблок, загрязнённая вода со II энергоблока сливается в море.

3 апреля, несмотря на введение водопоглощающей смеси из полимеров, опилок и измельченной бумаги, утечка радиоактивной воды в море продолжается. Уровень радиационного загрязнения воды составлял 1 Зв/ч.

3 апреля осуществлён перевод насосов, закачивающих воду в реакторы блоков № 1, 2 и 3, на электроснабжение от внешнего электроисточника.

4 апреля ТЕРСО начала сбрасывать низко-радиоактивную воду в Тихий океан. Это позволило использовать станционное хранилище РАО для хранения более опасной радиоактивной воды. Планировалось слить 11 500 т радиоактивной воды в море.

6 апреля МАГАТЭ настояло на введении в отверстие силиката натрия (жидкое стекло) для предотвращения утечки радиоактивной воды. Министром экономики, торговли и промышленности принято решение о вводе азота в защитную оболочку с целью предотвращения взрыва водорода в оболочке блока № 1.

В течение всего марта и апреля происходят новые подземные толчки в районе острова Хонсю.

7 апреля в 01:31 начат ввод азота в защитную оболочку I реактора для того, чтобы разбавить накопленный водород и исключить атмосферный кислород, давление в оболочке было увеличено на 0,05 МПа. Предполагалось, что трубы ввода парогазовой смеси в барботёр не погружены в воду. В связи с этим прилагались усилия по определению уровня воды в барботёре.

Повторились толчки силой до 7,4 балла. Большинство рабочих были эвакуированы со станции. Новых повреждений после землетрясения нет, но температура I реактора увеличилась и сопровождалась выбросом радионуклидов (100 Зв/ч) в колодец. Приборы показывали рост давления в реакторе.

9 апреля Япония всё ещё борется за сохранение воды в реакторах для их охлаждения, чтобы предотвратить дальнейшее расплавление ядерных топливных элементов. ТЕРСО приобрела два 95-тонных автобетононасоса, доставленных из России самолётами АН-124. Ими можно управлять дистанционно на расстоянии 2 миль, и воду можно направлять непосредственно в повреждённые реакторы.

11 апреля прервана подача охлаждающей жидкости в I и III энергоблоки из-за потери энергоснабжения вследствие землетрясения.

12 апреля Япония официально повысила уровень аварии до 7-го уровня по Международной шкале ядерных событий (аналогично аварии на Чернобыльской АЭС). Вследствие взрыва водорода на I энергоблоке **12 марта** и выбросов с III энергоблока сумма выбросов радиоактивного йода достигла 190000 трлн Бк.

Во время Чернобыльской аварии в атмосферу было выброшено в 10 раз больше радиоактивных нуклидов, чем при аварии на «Фукусиме-1» до 12 апреля. Общее количество радиоактивных материалов, хранящихся на «Фукусиме-1», в 8 раз больше, чем хранилось в Чернобыле. Выбросы на «Фукусиме-1» продолжались. После приостановки действий по охлаждению бассейна выдержки IV блока (из-за ложного предупреждения о наполненности бассейна) температура воды в бассейне выросла до 90°C. Уровень радиации от поверхности бассейна достиг 84 мЗв/ч.

15 апреля сообщается о том, что уровень радиации воды в некоторых зонах станции составил 1000 мЗв/ч, что свидетельствует о продолжающейся утечке радионуклидов из активной зоны.

Шестая неделя: в I, II, III реакторах ТВЭЛы расплавились, топливо ушло в нижние секции реакторов. Предполагалось, что топливо равномерно рассредоточилось по нижним частям реакторов, что делало «маловероятным» дальнейшее возобновление процесса деления.

17 апреля была принята программа неотложных аварийных мер: охлаждение реакторов и бассейнов отработавшего топлива путём организации непрерывной замкнутой циркуляции охлаждающей воды через них; надёжный отвод тепла от отработавшего топлива, находящегося в бассейнах; локализацию, сбор, хранение, переработку и повторное применение загрязнённых вод; защиту от несанкционированного проникновения загрязнённых грунтовых вод в море; уменьшение последствий выброса радионуклидов в атмосферу и на поверхность земли и ветровой перенос путём временного укрытия разрушенных зданий полимерными покрытиями и распыления закрепляющих почву и пыль полимерных составов; мониторинг доз облучения ликвидаторов аварии и населения и планирование эвакуаций; прогнозирование возможных последствий и защитные меры против цунами; повышение сейсмостойкости повреждённых зданий и сооружений.

18 апреля два робота вошли в I и III энергоблоки «Фукусимы-1» и измерили температуру, давление и уровень излучения (49 мЗв/ч в I энергоблоке и 57 мЗв/ч внутри III энергоблока). Роботы также вошли в здание II энергоблока, однако высокая влажность (более 90 %) внутри здания препятствовала обследованию (объектив камеры запотел).

Проводятся пробные распыления химических реагентов для осаждения радиоактивной пыли на территории 1200 м².

19 апреля начали выкачивать радиоактивную воду из подвала II энергоблока и тоннелей в приспособление для переработки отходов. По данным замеров от 20 апреля, в морской воде в 15 км от станции уровень радиации превышает норму в 5 раз. 21 апреля в 11:00 даны распоряжения об уточнении границ зон эвакуации в соответствии с требованиями законодательства о стихийных бедствиях.

22 апреля президент ТЕРСО М. Шимуцу официально извинился перед губернатором префектуры Фукусима Ю. Сато за ядерный кризис, последовавший за землетрясением и цунами 11 марта 2011 г. В 14:30 даны распоряжения об определении на случай возникновения опасности зон с укрытием в помещениях, зон возможной эвакуации и зон эвакуации.

26 апреля проводится распыление химических реагентов для осаждения радиоактивной пыли.

27 апреля уровень радиации, измеренный роботами внутри I энергоблока, достиг самого высокого показателя 1120 мЗв/ч.

28 апреля советник премьер-министра признаёт, что правительство Японии во избежание паники умышленно занижало истинные значения выбросов радионуклидов. Уровень опасности с самого начала соответствовал «7» по шкале событий.

Первые результаты новой стратегии компании ТЕРСО по созданию большого «водяного саркофага» в первых трёх реакторах оказались положительными, и к концу мая обстановка на АЭС «Фукусима-1» относительно стабилизируется.

В мае для предотвращения распространения радиоактивной пыли над зданиями аварийной АЭС произведено распыление склеивающего вещества. Уровень радиации у границ территории станции достиг нормы (менее 1 мЗв/год). Несмотря на достижение «холодного останова» АЭС «Фукусима-1», по-прежнему происходила утечка радиоактивной воды, в результате чего в Тихий океан попало большое количество радиоактивных веществ. Из-за пробойны в одном из каналов системы очистки из неё вылилось 120 т высокорadioактивной воды. Уровень радиации на участке разлива в сотни раз превысил норму – 140 тыс. Бк/см³. Уровень радиоактивного цезия в рыбе, выловленной в близлежащей префектуре Мияги, превысил 360 Бк/кг при норме 100 Бк/кг, что заставило местных рыбаков остановить промысел морского окуня [24].

С помощью компьютерного моделирования японское Агентство по изучению Земли и океана JAMSTEC создало карту распространения в океане цезия-137 в период с марта 2011 г. по 27.01.2012 г. Учёные рассчитали движение радиоактивных частиц, обусловленное океанскими течениями, с учётом периода полураспада радионуклидов. Анализ показал, что через 2 месяца загрязнённость ближайшей акватории будет ниже возможности обнаружения стандартными приборами.

5 мая рабочие вошли в здание I реактора, чтобы подключить системы фильтрации воздуха для поглощения радионуклидов внутри здания, что позволит начать замену охлаждающих систем; 8–9 мая были открыты двойные двери на северной стороне, чтобы проветрить здание.

11 мая уровень цезия-134, -136, -137, йода-131 повысился.

12 мая инженеры ТЕРСО подтвердили, что произошло расплавление ядерных топливных элементов реактора, и топливные элементы упали на днище реактора. Топливные стержни I реактора полностью покрыты водой. Подтверждено существование отверстий в основании защитной оболочки реактора, которые были прожжены расплавленной активной частью. Ядерное топливо просочилось в защитную оболочку, повреждённую взрывом во время аварии. Активная часть была повреждена в I, II, и III реакторах.

15 мая уровень радиации на первом этаже I энергоблока 2000 мЗв/ч. Рабочим разрешено находиться там не более 8 мин. Из защитной оболочки реактора в подвал вытекает большое количество воды. Одиннадцатиметровый по высоте подвал наполовину заполнен водой.

По данным ТЕРСО, топливные стержни I реактора стали видны над водой через 4 ч после землетрясения и аварийного отключения станции и полностью расплавились через 16 ч.

18 мая четверо рабочих вошли в здание II реактора, чтобы измерить уровень радиации. Они получили дозу облучения в 3 и 4 мЗв/ч.

С 10 по 22 мая 2011 г. в Тихий океан из III реактора вытекло не менее 250 т радиоактивной воды.

24 мая ТЕРСО признала факт расплавления активных зон II и III энергоблоков. На расплавление топливных стержней ушло 60 ч, на расплавление реактора – 100 ч (после 9-балльного землетрясения).

2 июня исследования, проведённые компанией Токио Дэнтэку в двух местах примерно в 3 км от побережья, обнаружили на морском дне стронций-89 и -90 с уровнем радиации до 44 Бк/кг. Исследования были проведены в 20 км к северу и к югу от ядерного комплекса. 12 июня концентрация радиоактивного стронция в морской воде в 240 раз превысила допустимые параметры. Радиоактивный стронций обнаружен также в грунтовых водах вблизи 1-го и 2-го энергоблоков на территории АЭС.

19 июня ТЕРСО приступило к демонтажу верхнего разрушенного этажа здания IV энергоблока. 28 июня сообщалось, что 3-й и 4-й энергоблоки аварийной АЭС будут накрыты 62 специальными листами толщиной в 1 мм, которые будут прикреплены к металлическим конструкциям зданий. **30 июня** низкорadioактивные воды с АЭС «Фукусима-1» начали закачивать в искусственный плавучий остров «Мегафлот» длиной 136 м, шириной – 46 м и высотой – 3 м, способный вместить 10 тыс. т воды.

16 июля первый этап ликвидации аварии на АЭС, который подразумевал начало стабильного охлаждения реакторов и закачивание азота для предотвращения взрыва водорода, выполнен.

Атака 11 марта 2011 г. была совершенно невиданной силы. Землетрясение и цунами породили техногенную катастрофу на атомной станции, которая, в свою очередь, стала причиной экологической и гуманитарной катастрофы на большой территории. Возникли пожары в 6 префектурах, в том числе на крупнейших нефтеперерабатывающих заводах Сендай и Итихара. Были полностью разрушены ряд автострад, железнодорожные пути, закрылись морские порты, затоплено 4 больших города. Сендайский аэропорт был смыт водой; 5 аэропортов, в том числе в Токио и Саппоро, прекратили работу. Более миллиона домов лишились водоснабжения и электропитания. Окружающая среда оказалась заражена, люди были вынуждены в спешке покинуть свои дома, возможно, навсегда. Число погибших в 12 префектурах Японии составило 15467 человек, 7482 – числятся пропавшими без вести, ранены 5388 человек. Экономический ущерб от цунами превысил 300 млрд долларов. Всё это вместе нанесло тяжёлую психологическую травму не только народу Японии, но и всему населению земного шара. Колоссальные экономические потери в результате аварии легли на плечи всего международного сообщества [13, 21, 23, 25].

Воздействие стихии ощутили на себе и российские территории, в частности, Южные Курилы и Сахалин. Вблизи острова Шикотан волны вздымались на высоту до трёх метров, возле Итурупа – до двух. Стоявшие в портах корабли отправили в открытое море, жителям предписали покинуть район побережья. После оповещения МЧС 11 тысяч человек покинули опасную зону [1, 19]. Лишь только гигантские волны достигли берегов Антарктики, угроза цунами была объявлена по всему Тихоокеанскому региону – на Филиппинах, в Индонезии и странах Латинской Америки [14].

В настоящее время ситуация на АЭС «Фукусима-1» полностью стабилизирована. Над I, II и IV блоками должны появиться защитные бетонные саркофаги. Сейчас они накрыты защитными колпаками из полиэфирных панелей. Началась подготовка к извлечению отработавших стержней из расположенных над реакторами бассейнов выдержки.

В части оценки последствий радиационного воздействия аварии по данным радиологиче-

ского анализа можно выделить два периода интенсивного выброса радиоизотопов: первый соответствовал взрывам на реакторах с 12 по 15 марта, когда в атмосферу были выброшены короткоживущие радионуклиды, второй период – с 20 по 24 марта во время сильного разогрева и разгерметизации реакторов.

Если на первом этапе уровень радиоактивности снижался весьма быстро, почти до естественных природных значений, то на втором этапе, когда территории вокруг АЭС были загрязнены радиоизотопами йода и цезия, спад активности стал менее динамичен. **30–31 марта** наблюдался существенный подъём радиоактивности вследствие взрыва водорода на I энергоблоке **12 марта** и выбросов с III блока. Сумма выбросов йода-131 достигла 190 тыс. ТБк (1 ТБк эквивалентен 1 трлн Бк). К **15 марта** уровень аварии на АЭС «Фукусима-1» был повышен до 7-го, достигнув оценки аварии на ЧАЭС.

В связи с господствующими в аварийный период ветрами в районе Японии основная масса выброшенных радионуклидов ушла в северо-восточном и восточном направлениях в сторону Тихого океана, достигнув берегов США (рис. 1).

Наличие радиоактивных изотопов было выявлено за тысячи километров от места аварии [1, 14]. Основные радионуклиды, выброшенные из реакторов, – йод-131 и цезий-137. Всего в воздух было выброшено $1,5 \cdot 10^{17}$ ($1,8 \cdot 10^{18}$ – на ЧАЭС) Бк йода-131 и $1,2 \cdot 10^{16}$ ($8,5 \cdot 10^{16}$ – на ЧАЭС) Бк цезия-137. Выполнен-

ная оценка количества радиоактивных веществ, сброшенных в море с загрязнённой водой, показала, что с блока № 2 сброшено $4,7 \cdot 10^{15}$ Бк, с блока № 3 – $2,0 \cdot 10^{13}$ Бк, с блоков № 5, 6 – $1,5 \cdot 10^{11}$ Бк.

На момент аварии правительство Японии имело запас в 250 тыс. доз йодистого калия, 200 тыс. доз было выделено населению для профилактики в самый первый период. Правительство Японии считает, что переоблучение щитовидной железы у населения маловероятно. Люди были отселены в радиусе 20 км от «Фукусимы-1». Живущим в радиусе 20–30 км от АЭС рекомендовано отселиться добровольно. Для некоторых пунктов принято решение об обязательной эвакуации. Заметного влияния радиации на здоровье населения не ожидается. Доз, превышающих нормы аварийного облучения, зафиксировано не было [1, 9, 13].

Уровень облучения, вызванного присутствием «японских» радионуклидов, обнаруженных в ряде стран мира, намного ниже фоновых значений [21, 22, 24, 25]. На расстоянии 30 км от АЭС уровень радиоактивного излучения 0,2–26 мкЗв/ч (фоновые значения – 0,05–0,1). Для сравнения: в самолёте на высоте 9 тыс. м – 4–7 мкЗв/ч, в горной местности – около 0,5 мкЗв/ч.

Ожидается, что системы охлаждения реакторов будут работать 2–3 года, по истечении которых эти системы можно будет отключить. В настоящее время существуют проблемы герметизации повреждений защитных оболочек реакторов № 1, 2, 3.

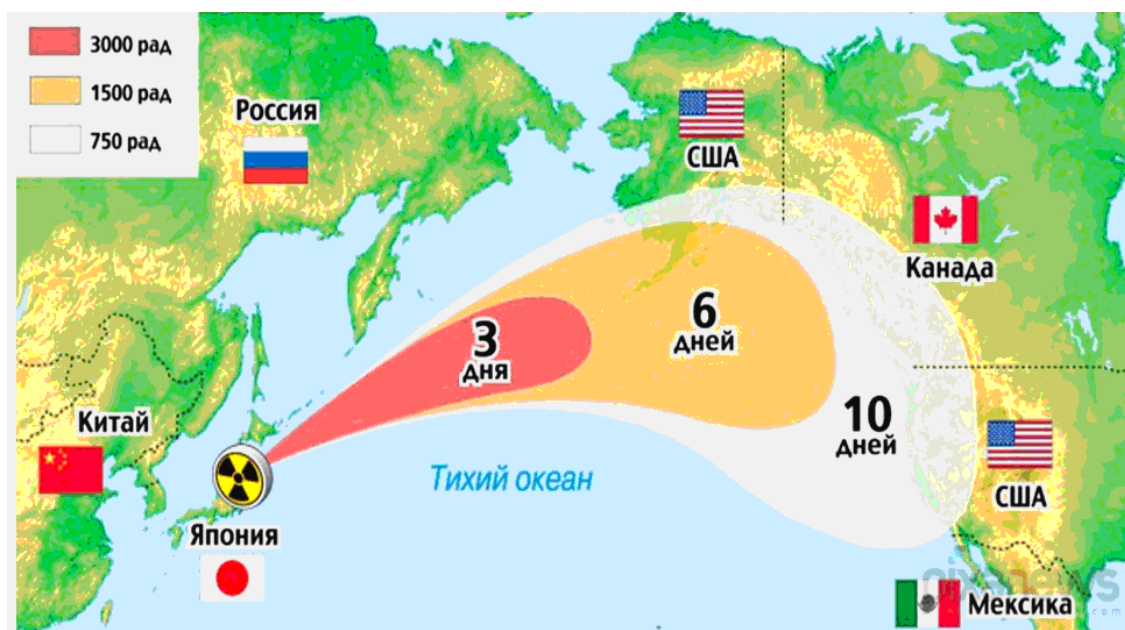


Рис. 1. Зона распространения ядерного облака в результате аварии на АЭС «Фукусима-1»

В течение 10 месяцев ТЕРСО могла лишь предполагать, что происходит внутри реакторов после расплавления топлива. В **январе 2012 г.** удалось получить первые кадры при помощи оптоволоконной камеры. Эндоскоп был введён через отверстие в II реакторе на высоте 7 м от дна защитной оболочки. Получено подтверждение, что топливо остаётся относительно холодным.

Из IV блока АЭС «Фукусима-1» продолжается утечка высокоактивной воды. Точно места протечек установить пока не удалось. Вытекающая вода поступает в цокольный этаж здания IV реактора.

Суммарный выброс радионуклидов йода и цезия на «Фукусиме-1» пока соответствует 10%-ному объёму того, что было выброшено во время Чернобыльской аварии (без учёта урана и плутония, которые были подняты при пожаре из активной зоны реактора ЧАЭС). Суммарная мощность разрушенных реакторов «Фукусимы-1» почти в 4 раза превосходит мощность IV энергоблока ЧАЭС. К этому необходимо добавить накопившиеся за 40 лет эксплуатации «Фукусимы-1» отработавшие ТВС, также сыгравшие негативную роль в развитии аварии.

На «Фукусиме-1» безвозвратно утрачены 4 энергоблока, на ЧАЭС – один. Уже через полгода после Чернобыльской аварии I, II и III блоки ЧАЭС были запущены в работу.

Авария на АЭС «Фукусима-1» принципиально отличается от Чернобыльской, где произошёл одномоментный выброс радиоактивных веществ [12, 19, 20]. На «Фукусиме-1» не было взрыва ядерного реактора, не произошло масштабного разлёта радионуклидов по воздуху. Объём радиоактивных выбросов на «Фукусиме-1» оказался в 7 раз меньше, чем на ЧАЭС, и был направлен в основном в сторону океана. Утечка радиоактивно заражённой воды со станции продолжается, устранить её значительно труднее. Продукты питания требуют контроля, так как из-за накопления по пищевой цепочке в овощах, молоке, мясе могут содержать больше радионуклидов. Также необходим строгий контроль воды из-за миграции радиоизотопов в водоносных слоях.

Содержание радионуклидов цезия и йода в значительной части проб, отобранных и исследованных в весенне-летний период в Дальневосточных регионах России, находилось на уровне чувствительности методов измерения или ниже. В пробах овощей и рыбы, отобранных в Приморском, Хабаровском и Камчатском краях, цезий-134 не обнаружен. В пробах

рыбы, отобранных в мае в Приморье (навага), и в морских водорослях определялся йод-131 (2,9 и 8,9 Бк/кг соответственно), максимальное содержание цезия-134 в пробах рыбы, отобранных в Сахалинской и Магаданской областях, составило 4,7 Бк/кг, в морепродуктах, отобранных в Приморском крае и Сахалинской области, – 5,7 Бк/кг. В пробах овощей в Магаданской и Сахалинской областях цезий-134 содержался в незначительных количествах – от 0,9 до 1,8 Бк/кг. Консервативная оценка максимальных годовых доз облучения населения за счёт радионуклидов цезия-137 и -134 даёт следующие величины: для островов Кунашир и Шикотан – 38 мкЗв/год, для Приморского края – 37 мкЗв/год, для острова Сахалин – 24 мкЗв/год. Максимальная индивидуальная годовая доза облучения населения по данным весенне-летних обследований может составить 81 мкЗв [1].

За время аварии на АЭС «Фукусима-1» погибло 3 человека, ранено 20 человек. По заключению врачей, болезненное состояние 149 пациентов из 610 человек, поступивших в 27 больниц префектуры Фукусима в первые два месяца после аварии, связано с радиофобией. Правительство Японии выделило 1,24 млрд долларов на мониторинг здоровья жителей префектуры Фукусима в течение 30 лет. Одобрён план создания Агентства по атомной безопасности, отвечающего за мониторинг уровня радиации, которым ранее занималось Министерство по делам науки и техники. На шестой неделе после начала аварии началась масштабная проверка влияния аварии на здоровье населения и окружающую среду.

Авария на АЭС «Фукусима-1» изменила отношение людей к атомной энергетике во всём мире. Двадцать одно государство из 24, в которых проживает 60 % населения Земли, сразу после аварии высказалось за закрытие атомных станций. Численность противников атомной энергетики в Китае, Японии, Южной Корее возросла вдвое.

Экономический ущерб, нанесённый компании ТЕРСО – владельцу АЭС «Фукусима-1», достиг 32 млрд долларов, что составляет 80 % её стоимости до аварии. Размер компенсаций пострадавшим может достигать 130 млрд долларов. Ущерб от остановки АЭС «Фукусима-1» и других атомных станций оценивается в 90 млрд долларов ежегодно.

ТЕРСО планирует построить морскую дамбу на северо-западе острова Хонсю для защиты крупнейшей в мире (по установленной мощно-

сти) АЭС «Касивадзаки-Карива» от мощных цунами. Правительственная комиссия по вопросам ядерной энергетики подготовила план поэтапной ликвидации атомной станции «Фукусима-1». Извлечение отработанного ядерного топлива из бассейнов начнётся в 2014 г. и закончится через 6 лет [1, 11]. Обнаруженное на глубине 7 м на дне бассейна выдержки III блока упавшее тяжёлое оборудование (перегрузочный узел весом 35 т, сорвавшийся в результате взрыва водорода на III блоке) может серьёзно осложнить операцию извлечения топлива из бассейна этого блока.

Начало наиболее сложного этапа ликвидации последствий аварии – извлечение расплавленного ядерного топлива из реакторов – планируется не раньше чем через 10 лет – в 2021 г. Этот процесс займет примерно 25 лет, после чего ещё 5 лет специалисты ТЕРСО будут демонтировать здания реакторов и другие строения на территории станции. Демонтаж АЭС «Фукусима-1» в общей сложности продлится 40 лет. Катастрофа на АЭС «Фукусима-1» поставила перед Японией сложные задачи по хранению и захоронению больших объёмов высокоактивных ядерных отходов. Их размещение на сейсмически активных островах не соответствует международным требованиям радиационной безопасности. Необходимы значительные территории с соответствующими геологическими условиями и согласие населения этих территорий на размещение иностранных ядерных отходов [7, 8].

Замещение выбывших энергетических мощностей в Японии будет компенсироваться дополнительной генерацией на природном газе. Терминалы приёма сжиженного природного газа и суда-газовозы от землетрясения не пострадали. Десять японских генерирующих компаний утратили использование нефтепродуктов. Потребление сжиженного газа возросло на 34 %.

Япония полностью перешла на тепловые станции, работающие на газе, угле, мазуте. Ежегодные расходы на закупки этих видов топлива могут возрасти примерно на 39 млрд долларов. Компания ТЕРСО сообщила об увеличении на 28,5 % топливной составляющей расходов на эксплуатацию генерирующих мощностей. О значительном росте расходов на топливо сообщают и другие генерирующие компании.

Из 50 оставшихся блоков в строю остаётся только один. Но может сложиться ситуация, при которой работающих атомных станций не останется из-за того, что прошедшие профилактику

два реактора АЭС «Оои» не успеют вступить в строй до 5 мая, когда будет остановлен последний работающий в стране реактор АЭС «Томари» на Хоккайдо.

Правительство вынесло решение о необходимости запуска реакторов, так как возникла угроза нехватки электроэнергии в промышленном районе Кансай, к которому относятся крупные промышленные центры Осака и Киото. При неблагоприятном стечении обстоятельств нехватка электричества может составить до 18,6 %. Если по крайней мере этим летом не начнут работать атомные электростанции, то ситуация в некоторых местах может стать напряжённой.

По состоянию на 1 января 2014 г. в Японии: в эксплуатации находится только 1 энергоблок; подтверждено строительство двух новых энергоблоков из 7 ранее запланированных; правительство и энергокомпании планируют перезапуск всех действовавших АЭС, кроме АЭС «Фукусима-1».

Новое японское правительство во главе с премьер-министром Синдзо Абэ, сформированное в 2013 г., приняло программу дальнейшего развития ядерной энергетики, содержащую положения об ужесточении безопасности АЭС. Несмотря на то что около 60 % населения страны пока выступают против АЭС, на парламентских выборах население проголосовало именно за эту партию, которая приняла решение о дальнейшем развитии ядерной энергетики. Примечательно, что на выборах мэра Токио победил Ёити Мацудзоэ, активно выступающий за продолжение использования атомной энергетики.

При подготовке к перезапуску АЭС в Японии проводятся следующие мероприятия:

- создан новый независимый регулирующий орган – агентство по ядерному регулированию (NRA), подчинённое непосредственно правительству;
- подано 16 заявок на переоценку безопасности и повторный пуск энергоблоков, наиболее близки к повторному пуску (2015 г.) 5 энергоблоков;
- по поводу безопасности ещё 28 блоков прошли общественные слушания. Таким образом, в итоге они могут быть перезапущены.

На конференции МАГАТЭ в июне 2013 г. японский представитель подтвердил, что Япония не отказывается от развития ядерной энергетики. Несомненно, развитие японской ядерной энергетики будет продолжено с новым уровнем безопасности.

Вероятность тяжёлых аварий на АЭС существует, что неоднократно было доказано практикой (Three Mile Island, ЧАЭС, «Фукусима-1», все три больших аварии АЭС произошли на реакторах 2-го поколения). С одной стороны, уроки аварии на японской АЭС обнадёживают, поскольку большинство станций островного государства после сильнейших ударов природной стихии остановились штатно. Это подтвердило устойчивость атомной энергетики к различным природным и техногенным воздействиям. На АЭС «Фукусима-1» не произошло ядерного взрыва реактора. АЭС «Фукусима-1», рассчитанная на 7-балльное землетрясение, выдержала 9 баллов. Если бы не наложение других факторов (цунами, проблемы с резервным энергоснабжением в первые часы после аварии), ситуацию можно было быстро нормализовать.

С другой стороны, вызывают тревогу просчёты конструкторов и неготовность руководства и персонала быстро принимать решения (сказался недостаток фундаментальных знаний у специалистов). Формально на момент начала аварии АЭС имела достаточно средств для предотвращения плавления топлива. Все блоки были сейсмостойки. Имеющиеся средства давали возможность за счёт внутренних ресурсов установок обеспечить отвод тепла без внешней подпитки водой не менее 8 ч, в течение которого можно подготовить реакторные установки к приёму воды от заранее предусмотренного аварийного источника. На всех реакторах задержка в подпитке водой составила 5–6 часов при крайне допустимой – не более 2,0–2,5 часа.

Реакторные установки имели многобарьерные системы защиты, но они не были взаимосвязаны с точки зрения ликвидации реальной нештатной аварии. Взрыв в реакторном здании блока № 1, повлиявший на ход аварийных работ, и взрывы на блоках № 2–4 свидетельствуют не только об отсутствии эффективных систем подавления аварийного водорода, но также о недостатках систем вентиляции реакторного здания и сомнительной необходимости его использования как вторичной защитной оболочки, что заведомо исключает ручные операции при выполнении противоаварийных мер. Следует указать также на отсутствие надёжной технологии работы с облучённым топливом внутри реактора после аварии с повреждением штатных подъёмных механизмов.

Ситуация на «Фукусиме-1» продемонстрировала неготовность японских операторов к

нештатным ситуациям. Инструкции на случай аварии отсутствовали. Руководство компании ТЕРСО, не оценив своевременно масштаб катастрофы, и в целях сохранения лица компании, пыталось самостоятельно разрешить возникшую экстремальную проблему, что только усугубило масштабы бедствия.

Задача минимизации рисков для жизни и здоровья населения требует усиления ответственности за принятие важнейших инженерных решений в условиях высокой сейсмической активности. При строительстве АЭС, исходя из российских норм безопасности в атомной энергетике, необходимо учитывать возможность появления цунами до 20 м в опасных районах [5–7]. АЭС должны иметь максимальные запасы прочности, надёжности и живучести. При их сооружении должны использоваться только высококачественные материалы. Требуются новые технологии защиты объектов с повышенной опасностью. АЭС является объектом сверхвысокой опасности, рассчитанным на долгие годы эксплуатации, больше чем жизнь одного поколения. Поэтому конструкторы должны закладывать в проекты решений максимальные запасы прочности, надёжности и живучести, невзирая на стоимостные показатели. Главным приоритетом проектирования АЭС является их безопасность. По оценкам ГК «Росатом», около 40 % стоимости энергоблока составляет стоимость систем безопасности. Следует особо отметить недостатки по выбору проектных значений внешних воздействий, связанных с недостаточностью знаний о вероятностном поведении цунами. Сегодня в связи с изменением климата повышается уровень океана, делая АЭС в прибрежных зонах ещё более уязвимыми. С установкой ловушек расплава и дополнительных постфукусимских систем доля стоимости систем безопасности ещё возрастет [10].

Аварии на атомных объектах, как правило, возникают внезапно и имеют тяжелейшие последствия планетарного масштаба. Ни одно государство в одиночку не в состоянии в полной мере и в короткие сроки ликвидировать последствия аварии на АЭС. Необходимо объединение сил и средств различных стран для решения вопросов безаварийной эксплуатации объектов ядерной энергетики. Для этого требуется своевременное представление достоверной информации в полном объёме, а также разработка единой концепции ликвидации последствий аварии.

При переговорах МАГАТЭ с Японией поднимался вопрос о приглашении на «Фукусиму»

российских специалистов, имеющих опыт ликвидации Чернобыльской аварии, но японская сторона от этого отказалась. Японцы чернобыльский опыт не изучали, будучи абсолютно уверены в невозможности аварии на японских АЭС.

Масштабность и периодичность происходящих в мире техногенных катастроф свидетельствуют о значительно возросшей роли специалистов технического профиля. Сложные технологические системы требуют строгого соблюдения технологий и регламентов. Качество подготовки кадров для обслуживания таких систем, а также ликвидации последствий аварий должны быть подняты на уровень, соответствующий сложности объектов, создаваемых в XXI в. Для принятия обоснованных решений в короткие сроки и повышения эффективности мероприятий по ликвидации последствий аварии на АЭС необходимо заранее моделировать сценарии вероятного развития аварии с учётом воздействия максимально возможного количества благоприятствующих аварии факторов. И на основе моделирования разрабатывать алгоритмы действий по ликвидации последствий аварии для конкретного атомного объекта.

Причиной многих крупных аварий последних десятилетий является порочная практика назначения на руководящие инженерные должности «универсальных» управленцев-менеджеров, не способных в силу отсутствия соответствующих знаний и опыта адекватно оценивать сложившуюся ситуацию и принимать на себя ответственность за действия по выводу из нештатной ситуации. Так, к примеру, когда на станцию были доставлены армейские дизель-генераторы с нестандартными разъёмами, вместо того чтобы подсоединить дизель-генераторы по нештатной схеме, их отправили обратно, что привело к дополнительной потере времени.

Важным фактором предотвращения и управления аварией является подготовленность персонала. Операторы АЭС «Фукусима-1» самостоятельно не смогли решить вопрос локализации аварии. Обслуживающий персонал самостоятельно не принимал решения. Каждый оператор по инструкции должен был сообщать обстановку своему вышестоящему начальнику, тот – своему и т.д. по цепочке.

Для обеспечения безопасности АЭС необходимо вводить системы охлаждения реактора, функционирующие на основе естественных физических принципов (система отвода тепла самотеком, естественная циркуляция), действующих без участия оператора и при полном отсут-

ствии основного и аварийного электропитания. Необходимо введение резервных систем охлаждения реакторов и их защитных корпусов, функционирование которых возможно в автономном режиме.

Неадекватное отражение событий, происходящих в результате аварии и последующей её ликвидации, официальными органами и средствами массовой информации не позволяют специалистам проанализировать ситуацию и оказать своевременную поддержку для быстрой ликвидации последствий аварии. Непонятны объяснения, представленные официальными органами, по поводу причин несрабатывания системы аварийного расхолаживания реакторов (ссылка на цунами, превысившего запроектную высоту).

Из-за взрыва гремучей смеси водорода и воздуха был разрушен контайнмент, в результате чего удержать в нем радиоактивные вещества не удалось. Таким образом, была нарушена и третья основа безопасности, влияющая на окружающую среду, – удержание радиоактивных веществ в контайнменте.

Согласно официальным данным, 13 дизельных генераторов с топливными баками были смыты волной. Но по проекту дизель-генераторы располагаются в подвальном здании реакторов. Если и были смыты, то не основные, а дополнительные передвижные дизель-генераторы. Прошло сообщение, что незадолго до аварии дизель-генераторы на АЭС «Фукусима-1» были заменены газогенераторами, снабжение которых газом осуществлялось централизованно.

Первые дни аварии проявили все недостатки проекта реакторной установки и ошибки, допущенные эксплуатирующей организацией. Но главной ошибкой оказалась высокая уязвимость систем аварийного энергоснабжения и системы забора морской воды. По проекту при превышении предельного давления должен срабатывать предохранительный клапан, и пар из корпуса реактора стравливаться во внешний корпус – контайнмент. Прочность контайнмента была недостаточной, поэтому потребовалось сбросить водородно-паровую смесь в здание реактора. После модернизации 1992 г. реакторы этого типа должны были иметь вентиляционную магистраль для сброса давления из тора за пределы здания. Но во время аварии в результате такой вентиляции водород почему-то оказался не снаружи, а в помещениях реакторных зданий.

Выводы, сделанные после аварии, касаются различных аспектов эксплуатации АЭС.

В России, Франции и США созданы организации, обладающие достаточными техническими средствами и квалифицированным персоналом, которые могут быть немедленно доставлены на любой аварийный энергоблок для реализации адекватных мер по устранению аварийной ситуации.

В июне 2011 г. на конференции МАГАТЭ по ядерной безопасности был рассмотрен и одобрен план действий по ядерной безопасности. Евросоюзом принято решение, что все станции должны быть подвергнуты дополнительной проверке. Решение о необходимости проведения стресс-тестов было единогласно принято странами ЕС ещё в марте 2011 г. после аварии на АЭС «Фукусима-1». В течение апреля и мая экспертная Европейская группа регуляторов в сфере ядерной безопасности ENSREG согласовывала методику проведения и критерии стресс-тестов, которые должны были представить полный анализ безопасности действующих и строящихся АЭС. Объём и содержание анализов были установлены западноевропейской ассоциацией ядерных регуляторов (Western European Nuclear Regulator Association, WENRA), организацией, объединяющей надзорные органы европейских стран. Ростехнадзор, не входящий в эту ассоциацию, на правах ассоциированного члена постоянно участвует во всех её заседаниях.

Ядерная инфраструктура Европы (143 АЭС), которая вырабатывает треть потребляемой Евросоюзом электроэнергии, подверглась жёсткой проверке на устойчивость ударов стихии (стресс-тесты) от землетрясения до падения тяжёлого самолёта. Стресс-тесты европейских АЭС проводились в три этапа: непосредственно операторами АЭС, национальными атомными агентствами и экспертами Еврокомиссии и Совета ЕС. Были проанализированы наихудшие сценарии, их комбинации и возможности персонала АЭС и местных экстренных служб по противодействию этим ситуациям. По итогам стресс-тестов было принято решение о резком ужесточении требований по безопасности, которые должны быть реализованы всегда и везде [10].

В 2012 г. в Российской Федерации все энергоблоки АЭС были оснащены дополнительными передвижными дизель-генераторами 0,4 кВ и 6 кВ, защищёнными от экстремальных внешних воздействий (в том числе резервуары с топливом для них), позволяющими обеспечить длительное поддержание блоков АЭС в безопасном состоянии в условиях полного обесточива-

ния АЭС; все энергоблоки АЭС оснащены дизельными насосами и мотопомпами для организации нештатной схемы подачи воды на охлаждение активных зон, парогенераторов, бассейнов выдержки отработанного топлива.

Дооснащение всех блоков АЭС рекомбинаторами водорода и системами контроля концентрации газов, образующих горючую смесь, будет выполнено к 2016 г. В случае обесточивания энергоблоков и невозможности подачи напряжения от штатных систем электроснабжения подача напряжения будет происходить от передвижной аварийной дизель-генераторной станции (ПАДГС), позволяющей осуществлять электроснабжение собственных нужд по заранее проложенным кабельным трассам или путём прокладки кабелей, имеющих на ПАДГС. Запас топлива рассчитан на 10 суток работы ПАДГС. Помимо дополнительных дизель-генераторов, каждый энергоблок оснащён аккумуляторными батареями, размещёнными в защищённом помещении. Заряд батарей обеспечивает их работу в течение 10 ч, это оборудование устанавливается на каждый энергоблок.

В случае запроектной аварии, связанной с потерей питательной воды, на энергоблоках установлена система автономной подачи питательной воды с использованием передвижной насосной установки (ПНУ) с автономным дизельным приводом. ПНУ полностью автономна, запас топлива рассчитан на работу в течение 24 ч.

Тем не менее «постфукусимский синдром» сказался на мировой атомной энергетике. На момент аварии на АЭС «Фукусима-1» (11.03.2011 г.) в мире эксплуатировалось 448 энергоблоков установленной мощностью 380280 МВт (эл.). В настоящее время осталось 438 действующих реакторов. В это число входит и 51 японский энергоблок, которые были временно остановлены на проверку их безопасности. Все реакторы АЭС «Фукусима-1» включаться не будут. Детально современное состояние ядерной энергетике (на 20.01.2014 г.) можно представить следующими цифрами: 438 действующих энергоблоков (ЭБ), установленная мощность 374332 МВт (эл.); из них 64 энергоблока старше 40 лет, установленная мощность 39091 МВт (эл.); 84 реактора типа BWR (кипящие реакторы), установленная мощность 78046 МВт (эл.); 71 энергоблок в стадии строительства, установленная мощность 70612 МВт (эл.) (рис. 2).

В настоящее время основная масса работающих энергоблоков имеют возраст около 30 лет.

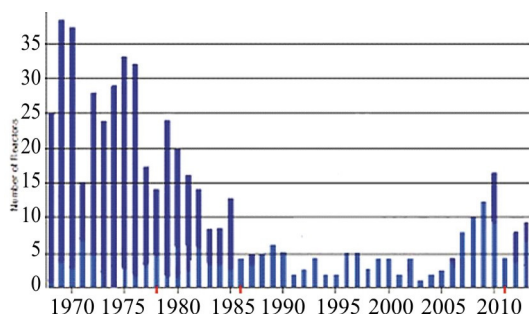


Рис. 2. Количество энергоблоков, вводимых в разные годы в мировую ядерную энергетику

После аварии на АЭС «Фукусима-1» разные страны мира проводили разную политику в отношении атомной энергетики. В Германии были остановлены 8 энергоблоков, к 2022 г. будут остановлены все 17 реакторов, которые обеспечивают 26 % электроэнергии. В Швейцарии все блоки будут останавливаться по мере выработки их ресурса. Последний блок должен быть остановлен в 2034 г. Но это решение пока не утверждено парламентом и в будущем может быть пересмотрено. Согласно данным опроса, проведённого осенью 2013 г., большинство населения Швейцарии высказались в поддержку атомной энергетики. Граждане страны считают, что если АЭС безопасны (а их в Швейцарии пять), то они могут работать и дальше. Италия, остановившая все свои блоки ещё в 1988 г. после Чернобыльской аварии, но планировавшая развивать ядерную энергетику, от неё отказалась. От использования атомной энергии отказались Испания, Венесуэла, Филиппины, Израиль, Марокко, Тунис, Уругвай, Кувейт.

Ряд стран отложили принятие решения по развитию ядерной энергетики. Так, Бельгия, в которой более 50 % электроэнергии приходится на ядерную генерацию, решение пока не приняла. Таиланд, планировавший развитие ядерной энергетики, отложил реализацию этих намерений до лучших времён.

Большинство стран (США, Великобритания, Россия, Китай, Франция, Белоруссия, Турция, Вьетнам, Бангладеш, Иордания, ОАЭ, Польша,

Саудовская Аравия, Египет и пр.) продолжили политику развития ядерной энергетики.

На данный момент у атомной энергетики нет серьёзных альтернатив. Более того, ужесточение требований к безопасности АЭС неизбежно приведёт к выводу из эксплуатации наиболее старых станций (особенно в Западной Европе и США), что потребует строительства новых мощностей. По оценке Торговой палаты США, объём мирового рынка ядерной продукции, услуг и топлива за 10 следующих лет составит 500–740 млрд долларов. Сейчас в мире строятся более 60 энергоблоков и более 150 проектов новых АЭС находятся на стадии лицензирования и на продвинутой стадии разработки.

По проектам «Поколение 3+» (реакторы с повышенными требованиями безопасности) в настоящее время сооружается 4 блока. Остальные блоки строятся по проектам поколений 2+ и 3. Единственный новый проект с ловушкой расплава – это российский реактор ВВЭР-1200. В настоящее время 2 блока ВВЭР-1000 с ловушкой расплава функционируют на китайской станции «Тяньвань» и два в Индии на АЭС «Куданкулам». Первый блок введен в эксплуатацию на 75 % мощности.

Остальные технические характеристики энергоблоков примерно одинаковы. Южнокорейский реактор APR-1400 (на АЭС «Шин-Кори» сооружается два энергоблока с APR-1400), защитная оболочка одинарная. Экспортный вариант для ОАЭ имеет двойную оболочку (таблица).

Российские проекты отличаются наличием инновационных технологий: это вышеупомянутая ловушка расплава на случай запроектной аварии; полностью цифровая система контроля и управления, включая системы безопасности АЭС; двойная защитная оболочка над зданием реактора; главные циркуляционные насосы на водяной смазке; не имеющий аналогов комплекс диагностики состояния основного оборудования и металла АЭС; способность энергоблока АЭС работать в режиме суточного регулирования нагрузки и многое другое.

Реакторы III поколения

Реактор (страна-проектант)	Защита от внешних воздействий	Защитная оболочка реакторного зала	Наличие СПОТ	Наличие ловушки расплава АЗ
ВВЭР-1200 (Россия)	+	Двойная	+	+
EPR-1600 (Франция)	+	Двойная	+	–
AP-1000 (США)	+	Двойная	+	–
APR-1400 (Корея)	+	Ординарная (двойная для экспорта)	+	–

Второй раз после Чернобыльской аварии атомная энергетика оказалась перед угрозой вспышки недоверия мировой общественности к атомным технологиям. Для восстановления положительного импульса развития ядерной энергетики предстоит большая разъяснительная работа среди населения, специалистов и политиков. Японская трагедия – повод более трезво оценивать риски и отказаться от экономии на безопасности.

Анализ энергетической безопасности мира подтверждает, что ядерная энергетика представляет важнейшую составляющую мирового энергобаланса, без которой человечество обойтись не может, и равноценной замены ей пока

еще не найдено. Абсолютным большинством стран принято решение о продолжении развития ядерной энергетики. Ключевым вопросом развития ядерной энергетики является её безопасность, поэтому во всем мире резко ужесточены требования по безопасности АЭС, которые должны выполняться всегда и везде.

Надеемся, полученные уроки пойдут человечеству на пользу. Атомные реакторы станут гораздо надёжнее и безопаснее. Наша главная обязанность – извлечь из аварии на «Фукусима-1» все полезные уроки и применить полученные знания на практике с основной целью – минимизацией рисков для жизни и здоровья настоящего и будущего поколений жителей планеты.

Список литературы

1. Авария на АЭС «Фукусима-1»: организация профилактических мероприятий, направленных на сохранение здоровья населения Российской Федерации / И.К. Романович, М.И. Балонов, А.Н. Барковский, А.И. Никитин [и др.] // под ред. акад. РАМН Г.Г. Онищенко. – СПб.: НИИРГ им. проф. П.В. Рамзаева, 2012. – 336 с.
2. Арутюнян Р.В. Уроки «Фукусимы-1» // АНРИ. – 2011. – № 2. – С. 67–71.
3. Ваганов В.А. За 50 лет до «Фукусимы-1» // Атомная стратегия-XXI. – 2012, апрель. – № 65. – С. 13–14.
4. Гагаринская И.В. Общественное мнение о ядерной энергетике // Атомная стратегия – XXI. – 2014, март. – № 88. – С. 11.
5. Гагаринский А.Ю. Обращение с РАО в ядерно-энергетической стратегии России // Энергия: экономика, техника, экология. – 2014. – № 7. – С. 2–9.
6. Гагаринский А.Ю. Тенденции в российской ядерной энергетике и общественное мнение после «Фукусимы-1» // Энергия: экономика, техника, экология. – 2012. – № 8. – С. 17–22.
7. Гуменюк В.И., Тихонов М.Н., Федосовский М.Е. Постфукусимский синдром: проблемы и решения // Науч.-техн. ведомости СПбГПУ. – 2012. – Т. 2, № 154. – С. 273–285.
8. Дубровин Е.Р., Дубровин И.Р. Повышение экологичности АЭС – условие дальнейшего развития атомной энергетики // Атомная стратегия-XXI. – 2012, февраль. – № 63. – С. 29–30.
9. Корниенко А.Г. Обзор аварии на АЭС «Фукусима-1» в Японии // Электрические станции. – 2012. – № 1. – С. 2–15; № 2. – С. 13–28; № 3. – С. 2–8; № 4. – С. 2–8.
10. Ларин И.И. Обзор состояния Российской и мировой атомной энергетики на 2011 г. // Энергия: экономика, техника, экология. – 2012. – № 12. – С. 2–10.
11. Муратов О.Э. Ядерная энергетика после «Фукусимы-1» // Атомная стратегия-XXI. – 2014, март. – № 88. – С. 12–15.
12. Римский-Корсаков А.А. Две аварии // Атомная стратегия-XXI. – 2011, апрель. – № 53. – С. 20–21.
13. Романович И.К. Радиационная обстановка в Дальневосточных субъектах Российской Федерации после аварии на АЭС «Фукусима-1» // Экология и атомная энергетика. – 2011. – № 2 (29). – С. 56–72.
14. Рылов А.Л. Японское землетрясение «аукнулось» в Антарктиде // Энергия: экономика, техника, экология. – 2012. – № 2. – С. 73–74.
15. Рябчук Е.Ф. Японская катастрофа // Энергия: экономика, техника, экология. – 2012. – № 12. – С. 64–66.
16. Скрябина М.С. Влияние аварии на АЭС «Фукусима-1» на планы государств Восточной Азии по развитию «мирного атома» // Вестник МГИМО. – 2011. – № 4. – С. 31–32.
17. Тихонов М.Н. Уроки Фукусимы-1: проблемы и решения // Безопасность жизнедеятельности. – 2012. – № 8 (140). – С. 29–40.
18. Тихонов М.Н. Уроки Фукусимы-1: проблемы и решения. Хронология начальных событий на АЭС «Фукусима-1» // Экология и развитие общества. – 2012. – № 2 (4). – С. 66–73, 97–103.
19. Уроки Чернобыля и Фукусима: прогноз радиологических последствий / В.К. Иванов, В.В. Кашеев, С.Ю. Чекин, А.М. Корело, А.Н. Меняйло, М.А. Максюттов, А.И. Горский, К.А. Туманов, Е.А. Пряхин // Радиация и риск (Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра). – 2011. – Т. 20, № 3. – С. 6–15.

20. Цирулев Р.М. Япония. Вся правда. Первая полная антология катастрофы. – М.: Эксмо, 2011.
21. Artificial radioactivity in environmental media (air, rainwater, soil, vegetation) in Austria after the Fukushima nuclear accident / G. Steinhäuser, S. Merz, D. Hainz, J.H. Sterba // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2013. – Vol. 20, № 4. – С. 2527–2534.
22. Bird W.A. Fukushima health study launched // *Environmental Health Perspectives*. – 2011. – Vol. 119, № 10. – P. A428–A429.2
23. Evidence of the radioactive fallout in France due to the Fukushima nuclear accident / O. Evrard, D. Gateuille, I. Lefèvre, P. Bonté, P. Van Beek, B. Lansard, V. Pont // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2012. – Vol. 114. – P. 54–60.
24. Report of Japanese Government to the IAEA Ministerial Conference on Nuclear Safety “The Accident at TEHCO’s Fukushima Nuclear Power Stations”. Nuclear Emergency Response Headquarters Government of Japan, 2011, June.
25. Thakur P., Ballard S., Nelson R. An overview of Fukushima radionuclides measured in the Northern Hemisphere // *The Science of the Total Environment*. – 2013. – Vol. 458–460. – P. 577–613.

References

1. Romanovich I.K., Balonov M.I., Barkovskij A.N., Nikitin A.I. i dr. Avarija na AJeS «Fukusima-1»: organizacija profilaktičeskikh meroprijatij, napravlenykh na sohranenie zdorov'ja naselenija Rossijskoj Federacii [The accident at the nuclear power plant Fukushima-1: the organization of preventive measures aimed at maintaining the health of the population of the Russian Federation]. Edit by akad. RAMN G.G. Onishchenko. St. Petersburg, NIIRG im. prof. P.V. Ramzaeva, 2012, 336 p.
2. Arutjunjan R.V. Uroki Fukusimy- 1 [Lessons from Fukushima-1]. ANRI, 2011, no 2, pp. 67–71.
3. Vaganov V.A. Za 50 let do «Fukusimy-1» [50 years before Fukushima-1]. *Atomnaja strategija-HHI*, april 2012, no 65, pp. 13–14.
4. Gagarinskaja I.V. Obshhestvennoe mnenie o jadernoj jenergetike [Public opinion on the nuclear power engineering industry]. *Atomnaja strategija-HHI*, March 2014, no 88, pp. 11.
5. Gagarinskij A.Ju. Obrashhenie s RAO v jaderno-jenergetičeskoj strategii Rossii [Radioactive waste management in the nuclear power strategy of Russia]. *Jenergija: jekonomika, tehnika, jekologija*, 2014, no 7, pp. 2–9.
6. Gagarinskij A.Ju. Tendencii v rossijskoj jadernoj jenergetike i obshhestvennoe mnenie posle Fukusimy-1 [Trends in the Russian nuclear power engineering industry and public opinion after Fukushima-1]. *Jenergija: jekonomika, tehnika, jekologija*. 2012, no 8, pp. 17–22.
7. Gumenjuk V.I., Tihonov M.N., Fedosovskij M.E. Postfukusimskij sindrom: problemy i reshenija [Post-Fukushima syndrome: problems and solutions]. *Nauch.- tehn. vedomosti SPbGPU*, 2012. T.2, no 154, pp. 273–285.
8. Dubrovin E.R., Dubrovin I.R. Povyshenie jekologičnosti AJeS - uslovie dal'nejshego razvitiya atomnoj jenergetiki [Improvement of the environmental friendliness of nuclear power plants – condition for further development of nuclear power engineering]. *Atomnaja strategija-HHI*, February 2012, no 63, pp. 29–30.
9. Kornienko A.G. Obzor avarii na AJeS Fukusima-1 v Japonii [Overview of the accident at the nuclear power plant Fukushima-1 in Japan]. *Jelektricheskie stancii*, 2012, no 1, pp. 2–15; no 2, pp. 13–28; no 3, pp. 2–8; no 4, pp. 2–8.
10. Larin I.I. Obzor sostojanija Rossijskoj i mirovoj atomnoj jenergetiki na 2011g. [Overview of the state of the Russian and world nuclear power engineering in 2011]. *Jenergija: jekonomika, tehnika, jekologija*, 2012, no 12, s. 2–10.
11. Muratov O.Je. Jadernaja jenergetika posle Fukusimy-1 [Nuclear power engineering industry after Fukushima-1]. *Atomnaja strategija-HHI*, march 2014, no 88, pp. 12–15.
12. Rimskij-Korsakov A.A. Dve avarii [Two accidents]. *Atomnaja strategija-HHI*, april' 2011, no 53, pp. 20–21.
13. Romanovich I.K. Radiacionnaja obstanovka v Dal'nevostochnykh sub#ektakh Rossijskoj Federacii posle avarii na AJeS «Fukusima-1» [The radiation situation in the Far Eastern regions of the Russian Federation after the accident at the nuclear power plant Fukushima-1]. *Jekologija i atomnaja jenergetika*, 2011, no 2 (29), pp. 56–72.
14. Rylov A.L. Japonskoe zemletrjasenie «auknulos» v Antarktide [Japanese earthquake “backfired” in Antarctica]. *Jenergija: jekonomika, tehnika, jekologija*. 2012, no 2, pp. 73–74.
15. Rjabchuk E.F. Japonskaja katastrofa [Japanese disaster]. *Jenergija: jekonomika, tehnika, jekologija*, 2012, no 12, pp. 64–66.
16. Skrjabina M.S. Vlijanie avarii na AJeS «Fukusima-1» na plany gosudarstv Vostočnoj Azii po razvitiu «mirnogo atoma» [The impact of the accident at the nuclear power plant Fukushima-1 on the plans of East Asian states on the “peaceful atom” development]. *Vestnik MGIMO Universiteta*, 2011, no 4, pp. 31–32.
17. Tihonov M.N. Uroki Fukusimy-1: problemy i reshenija [Lessons from Fukushima-1: Problems and solutions]. *Bezopasnost' zhiznedejatel'nosti*, 2012, no 8 (140), pp. 29–40.
18. Tihonov M.N. Uroki Fukusimy-1: problemy i reshenija. Hronologija nachal'nykh sobytij na AJeS «Fukusima-1» [Lessons from Fukushima-1: Problems and solutions. Chronology of primary events at the nuclear power plant Fukushima-1]. *Jekologija i razvitie obshhestva*, 2012, no 2 (4), pp. 66–73, pp. 97–103.
19. Ivanov V.K., Kashheev V.V., Chekin S.Ju., Korelo A.M., Menjajlo A.N., Maksjutov M.A., Gorskij A.I., Tumanov K.A., Prjahnin E.A. Uroki Chernobylja i Fukusima: prognoz radiologičeskikh posledstvij [The lessons

from Chernobyl and Fukushima: forecasting of radiological consequences]. *Radiacija i risk* (Bjulleten' Nacional'nogo radiacionno-jepidemiologicheskogo registra), 2011, vol. 20, no 3, pp. 6–15.

20. Cirulev R.M. Japonija. Vsja pravda. Pervaja polnaja antologija katastrofy [Japan. The whole truth. The first complete anthology of disaster]. Moscow: Jeksmo, 2011.

21. Steinhäuser G., Merz S., Hainz D., Sterba J.H. Artificial radioactivity in environmental media (air, rain-water, soil, vegetation) in Austria after the Fukushima nuclear accident. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, vol. 20, no 4, pp. 2527–2534.

22. Bird W.A. Fukushima health study launched. *Environmental Health Perspectives*, 2011, vol. 119, no 10, p. A428–A429.2

23. Evrard O., Gateuille D., Lefèvre I., Bonté P., Van Beek P., Lansard B., Pont V. Evidence of the radioactive fallout in France due to the Fukushima nuclear accident. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2012, vol. 114, pp. 54–60.

24. Report of Japanese Government to the IAEA Ministerial Conference on Nuclear Safety “The Accident at TEHCO’s Fukushima Nuclear Power Stations”. Nuclear Emergency Response Headquarters Government of Japan, 2011, June.

25. Thakur P., Ballard S., Nelson R. An overview of Fukushima radionuclides measured in the Northern Hemisphere. *The Science of the Total Environment*, 2013, vol. 458–460, pp. 577–613.

ANTHOLOGY OF DISASTER AT JAPANESE NUCLEAR POWER PLANT FUKUSHIMA-1

M.N. Tikhonov

Inter-Sectoral Expert-Certification, Scientific-Technical and Control Center
of Nuclear and Radiation Safety, International Scientists’ Club
Saint-Petersburg
Russian Federation, Saint-Petersburg, 31, Mokhovaya St., 191028

The extensive material about the origin and deepening up to turning into a disaster and the elimination of an emergency at the nuclear power plant Fukushima-1 is systematized and generalized based on the analysis of public government data and results of scientific researches. The events that have resulted in the destruction of buildings and structures, loss of life, evacuation of the population from the zone of radioactive contamination are presented chronologically. The article demonstrates the large scale and complexity of problems existing in the field of ensuring the nuclear and radiation safety of the population. The ways to minimize the risk of accidents and reduce the risk of negative impacts on the environment and public health are described. The ideas about the different approaches of the countries of the world to the prospects of the nuclear power development taking into account the consequences of the accident at the nuclear power plant Fukushima-1 are specified. The comparative characteristics of different types of technical solutions in terms of safety are provided.

Key words: nuclear power engineering industry, nuclear power plant, radiation accident, emergency situation, radioactive contamination, radiation safety, health risks.

© Tikhonov M.N., 2015

Mikhail Nikolayevich Tikhonov – the specialist of Inter-Sectoral Expert-Certification, Scientific-Technical and Control Center of Nuclear and Radiation Safety (REStsentr), (REStsentr LLC, Saint-Petersburg), academician of the International Academy of Ecology, Human and Nature Safety (MANEB) (e-mail: dtrec@peterlink.ru; tel. 8 (812) 233-58-06).