

коглиноземистого цемента, поскольку последний имеют более тугоплавкую основу.

Установлено положительное влияние покрытия образцов всех типов бетона композицией ОС-51-03 на прочность в сравнении с непокрытыми при нагреве до 800 °С. Покрытие органической композицией ОС-51-03 образцов с последующей температурной обработкой приводит к значительному увеличению предела прочности на сжатие для всех типов бетона на участках температуры 200—800 °С. В интервале температуры 400—800 °С увеличение прочности составляет 15—30%, что является существенным преимуществом при протекании тяжелой аварии. Однако при 1000 °С упрочняющее влияние полностью нивелируется.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ageing** Management and Development of a Programme for Long Term Operation of Nuclear Power Plants. Specific Safety Guide. №. SSG-48. Vienna: IAEA, 2018.
2. **Фиськов А.А., Крицкий В.Г., Макасеев А.А. и др.** Исследование поведения покрытия контайнмента на основе органосиликатной композиции ОС-51-03 при тяжелых авариях на АЭС. — Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок, 2018, вып.2, с. 66—74.
3. **Павлова Ф.С., Лукашева Т.А.** Покрытия для защиты от коррозии конструкций энергетических реакторов. — Лакокрасочные материалы и их применение, 1980, вып.2, с. 24—25.
4. **Фиськов А.А., Крицкий В.Г., Макасеев А.А. и др.** Обоснование применения покрытия контайнмента на основе органосиликатной композиции ОС-51-03 в условиях тяжелых аварий на АЭС. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. материаловедение и новые материалы, 2019, вып. 4 (100), с. 119—127.
5. **Смесь** сухая огнеупорная корундовая алюминатная. ТУ 1569-386-02068474—2008. Санкт-Петербург, СПбГТИ(ТУ), 2008.
6. **Смесь** сухая огнеупорная корундовая алюминатная модернизированная. ТУ 1569-417-02068474—2008. Санкт-Петербург, СПбГТИ(ТУ), 2008.
7. **Цемент** кладочный специальный модернизированный. ТУ 1569-415-02068474—2008. Санкт-Петербург, СПбГТИ(ТУ), 2008.
8. **Цемент** кладочный специальный. ТУ 1569-385-02068474—2008. Санкт-Петербург, СПбГТИ(ТУ), 2008.
9. **Орлова А.А., Аверина Г.Ф., Ульрих Д.В. и др.** Исследование возможности получения жаростойких бетонов на основе серпентинфосфатных композиций. — Изв. вузов. Строительство, 2021, № 7, с. 122—128.
10. **Денисов А.В.** Аналитическое определение термических и радиационных деформаций бетонов и растворов с низким содержанием заполнителей. — Инж. вестник Дона, 2019, №1, с. 197—219.
11. **Соколова Ю.А., Акалува М.В., Флегонтов Д.В. и др.** Методика исследования повреждений бетонных конструкций в результате скрытого пожара. — В сб.: Научные труды РААСН, 2019, т. 2. с. 503—512.
12. **Горшков В.С. Тимашев В.В. Савельев В.Г.** Методы физико-химического анализа вяжущих веществ. Учебное пос. М.: Высшая школа, 1981.

Поступила в Редакцию 12.09.22

УДК 624.042.7

УСТРОЙСТВО БЕТОННОЙ ПОДУШКИ В ОБРАТНОЙ ЗАСЫПКЕ КАК СПОСОБ ИЗМЕНЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ СООРУЖЕНИЯ

*Антонов Н.А. (АО «Атомэнергопроект», г. Санкт-Петербург, НИУ МГСУ, г. Москва)
e-mail: 9163886635@mail.ru*

Поведение тяжелых ответственных зданий типа зданий реактора АЭС при землетрясении существенно зависит от их взаимодействия с грунтовым основанием [1]. При возведении таких зданий часто требуется изменить свойства грунтового основания непосредственно под фундаментом. Одним из методов модификации свойств грунтового основания является устрой-

ство бетонной подушки вместо определенного объема естественного грунта с неудовлетворительными свойствами. В этом случае последовательность возведения здания будет следующей: котлован под здание разрабатывается до грунтовых слоев с приемлемыми свойствами, устраивается бетонная подушка, на бетонной подушке возводится здание. При этом котлован от ниж-

ней поверхности бетонной подушки до отметки планировки заполняется обратной засыпкой — грунтом с низкой скоростью распространения сейсмических волн. Очевидно, что такое существенное изменение грунтового основания должно привести к значительным изменениям сейсмической реакции здания.

В настоящей статье исследуется сейсмическая реакция заглубленного здания на бетонной подушке, под которой располагаются грунты с высокой скоростью распространения сейсмических волн $V_s = 1600$ м/с, $V_p = 3700$ м/с. Настоящая статья является продолжением работ [2, 3].

Опишем рассматриваемую модель сооружения с бетонной подушкой (рис. 1). Бетонная подушка моделируется объемными конечными элементами размером в плане 4×4 м и высотой 2 м, общие габариты 80×80 м, высота 8 м. Таким образом, бетонная подушка состоит из 1600 конечных элементов, которые расположены в четыре ряда по высоте. Характеристики материала соответствуют бетону класса В20: $E = 275$ МПа, $\nu = 0,2$, $\rho = 2400$ кг/м³ [4]. Нижняя поверхность бетонной подушки расположена в уровне границы между обратной засыпкой и естественным грунтовым основанием. Поскольку исследуется реакция здания как жесткого целого, оно смоделировано жестким штампом, состоящим из балок и сосредоточенных масс $m = 775$ т в каждом узле верхней поверхности бетонной подушки, что соответствует полной массе сооружения $m = 341\,775$ т. При таком методе моделирования сооружения требование [5] об отсутствии контакта между боковыми поверхностями сооружения и окружающим грунтом на глубину не ме-

нее 6 м от поверхности будет выполнено автоматически. Демпфирование в материалах принято равным 2%.

Исходное грунтовое основание моделируется 18 слоями толщиной 2 м, из которых восемь верхних моделируют обратную засыпку, 10 нижних — естественное грунтовое основание. Характеристики обратной засыпки — $V_s = 150$ м/с, $V_p = 460$ м/с, $\rho = 2000$ кг/м³, естественного грунтового основания — 1600 м/с, 3700 м/с, 2450 кг/м³ соответственно. Демпфирование при прохождении продольных и поперечных волн принято равным 2%. Под слоистым основанием расположено полупространство со свойствами естественного грунтового основания.

Расчет проводится с помощью программного комплекса для анализа динамического взаимодействия сооружения с грунтовым основанием ACS SASSI [6]. Основным методом анализа является метод податливого объема, который, в свою очередь, есть разновидность метода подструктур. В соответствии с [6] метод податливого объема является эталонным и не требует верификации результатов. Для расчета система грунт—сооружение разбивается на три связанные подсистемы: полубесконечное грунтовое основание, сооружение и откопанный грунт. Конечноэлементная часть полной системы, в свою очередь, состоит из моделей сооружения и откопанного грунта. Все динамические степени свободы откопанного грунта считаются узлами взаимодействия для вычисления решения в частотной области. Откопанный грунт моделируется объемными конечными элементами, в рассматриваемой задаче их размеры совпадают с размерами элементов бетонной подушки (4×4 м, высота 2 м). Общие габариты откопанного грунта в плане совпадают с общими габаритами бетонной подушки (80×80 м), высота — с общей толщиной слоев засыпки 16 м. Таким образом, откопанный грунт состоит из 3200 конечных элементов, которые расположены в восемь рядов по высоте. В полной системе грунт—сооружение модель сооружения (бетонная подушка с жестким штампом) занимает нижнюю половину откопанного грунта (рис. 2).

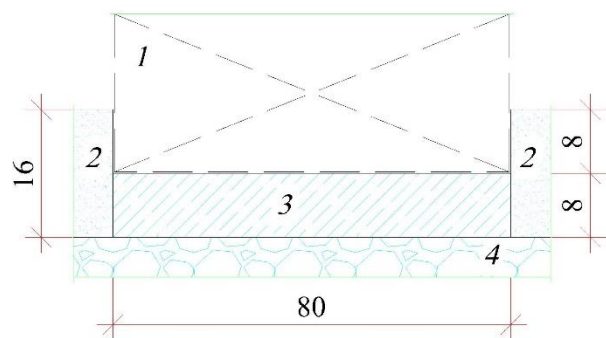


Рис. 1. Расчетная модель рассматриваемой задачи: 1 — сооружение; 2 — грунт обратной засыпки; 3 — бетонная подушка; 4 — естественное грунтовое основание

Вычислим горизонтальную реакцию сооружения на действие вертикально распространяющейся поперечной сейсмической волны

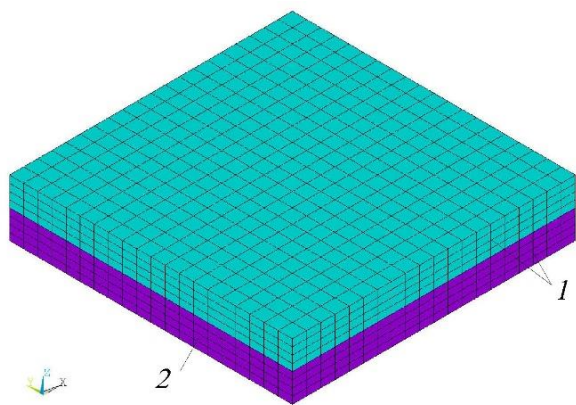


Рис. 2. Конечноэлементная модель откопанного грунта: 1 — откопанный грунт; 2 — бетонная подушка

в формате передаточных функций. Поскольку сооружение является симметричным, реакция сооружения в другом горизонтальном и вертикальном направлениях будет равна нулю. В качестве контрольной точки выбрана граница между обратной засыпкой и естественным грунтом.

На рис. 3 видно, что в частотном диапазоне до 30 Гц, характерном для сейсмического воздействия, реакция на частотах 2,3, 7, 11,7, 16,4, 20,6 Гц имеет ярко выраженный резонансный характер. Поскольку модель сооружения на бетонной подушке представляет собой тело, длина и ширина которого значительно больше высоты, жесткость превышает жесткость окружающего грунта обратной засыпки, то эти резонансы должны вызываться колебаниями грунтов обратной засыпки.

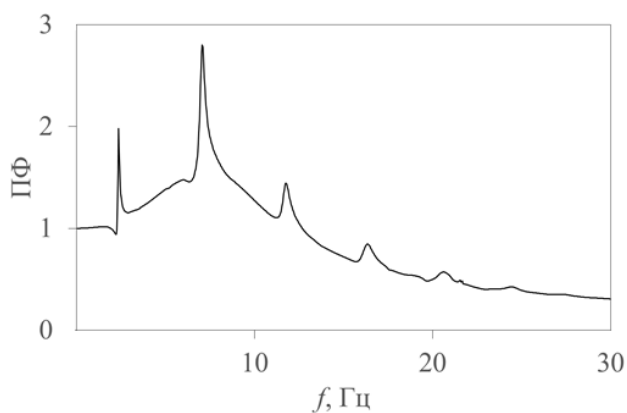


Рис. 3. Передаточные функции (ПФ) от перемещений контрольной точки к перемещениям середины жесткого штампа

Для подтверждения данного предположения рассмотрим упрощенную модель грунтового основания в виде слоя на жесткой заделке. Характеристики слоя примем такими же, как для грунтов обратной засыпки. Данное упрощение должно давать достаточно точную оценку наблюдаемого явления из-за высокого контраста акустических жесткостей естественных грунтов и грунтов обратной засыпки. Для слоя на жесткой заделке резонансные частоты определяются по формуле [1]

$$f = nV_s/4H. \quad (1)$$

В таблице резонансные частоты для слоя грунтов обратной засыпки толщиной 16 м и скорости распространения поперечных волн $V_s = 150$ м/с при n , равном 1, 3, 5, 7, 9, составляют 2,3, 7, 11,3, 16,4, 21,1 Гц соответственно.

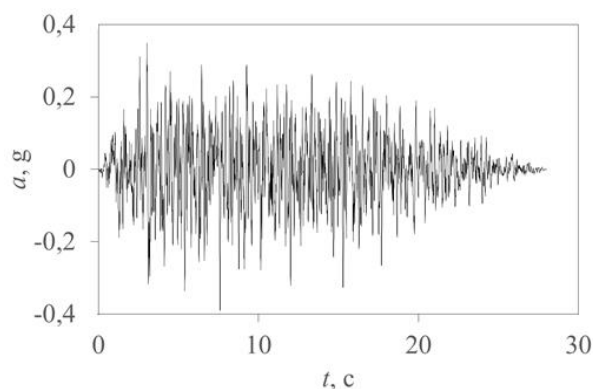
Резонансные частоты для слоя на заделке

n	f , Гц
1	2,3
3	7
5	11,3
7	16,4
9	21,1

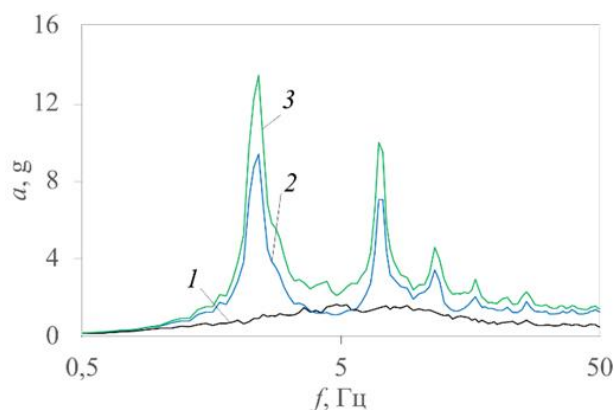
Сравнение рис. 3 и таблицы показывает близкое совпадение резонансных пиков. Это подтверждает исходное предположение о том, что резонансы в реакции сооружения определяются свойствами грунтов обратной засыпки.

Для дальнейшего исследования выполним вспомогательный расчет реакции грунтового основания в отсутствие сооружения с помощью программного комплекса SHAKE [7]. В качестве контрольной точки примем ту же границу между естественным грунтом и грунтом обратной засыпки. Акселерограмма исходного воздействия показана на рис. 4, результирующие спектры ответа (демпфирование в осцилляторах 2%) — на рис. 5.

Из рис. 5 следует, что частоты первых трех пиков близки приведенным в таблице. Поскольку расчет по программе SHAKE проводится для полной грунтовой колонки в отсутствие соору-



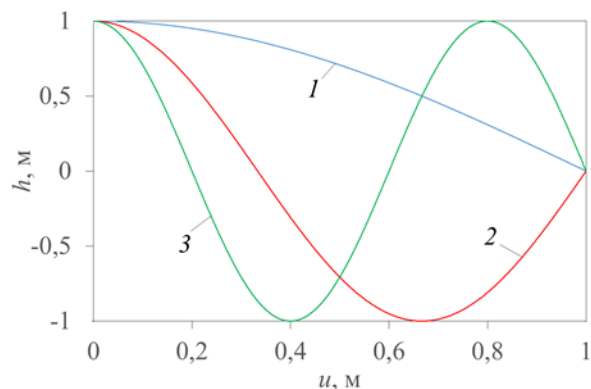
Р и с. 4. Акселерограмма исходного воздействия



Р и с. 5. Спектры ответа на разных отметках обратной засыпки: 1 — исходное воздействие; 2 — середина засыпки; 3 — поверхность

жения, то это дополнительно подтверждает предположение о том, что реакция сооружения определяется реакцией грунтов засыпки на сейсмическое воздействие, которое, в свою очередь, можно описывать моделью слоя на заделке. Также из рис. 5 следует, что спектральные ускорения на уровне середины засыпки равны примерно 70% ускорений на поверхности. Для модели слоя на заделке можно показать, что распределение перемещений (ускорений) в глубине слоя на резонансных частотах соответствует косинусу некоего аргумента, который при подстановке дает единицу на поверхности слоя и нуль на уровне заделки. При этом по толщине слоя укладывается нечетное число четверти длины волны.

На рис. 6 видно, что для трех первых резонансных частот перемещения и соответственно ускорения для половины толщины слоя равны примерно 70% перемещений (ускорений) на поверхности. Таким образом, соотношение между

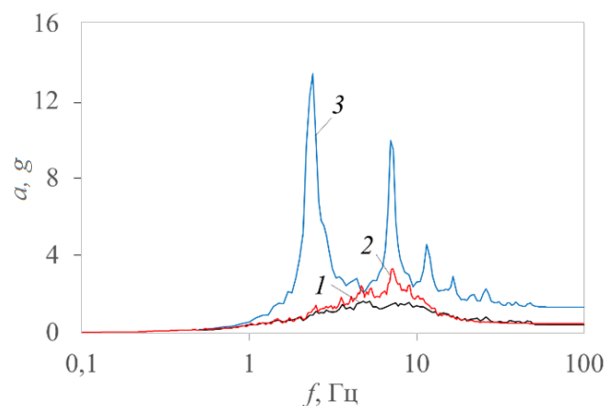


Р и с. 6. Распределение перемещений по глубине в зависимости от длины сейсмической волны: 1, 2, 3 — 1/4, 3/4, 5/4 длины волны соответственно

спектрами ответа для полной грунтовой колонки на разной глубине соответствует модели слоя на заделке, что подтверждает возможность использования такой упрощенной модели.

Сравнение спектров ответа, вычисленных для середины жесткого штампа в полной модели сооружение—грунтовое основание, со спектрами ответа для поверхности засыпки, определенными для грунтовой колонки в отсутствие сооружения, показывает существенную разницу между вычисленными спектрами ответа для грунтовой колонки в отсутствие сооружения и спектрами ответа для середины жесткого штампа на бетонной подушке (рис. 7).

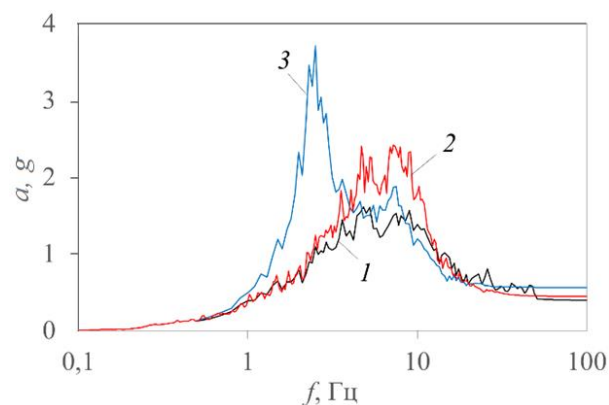
Однако если учесть большую жесткость бетонной подушки по отношению к окружающему грунту, можно предположить [3], что перемещения бетонной подушки соответствуют среднему по высоте подушки перемещению окружающих



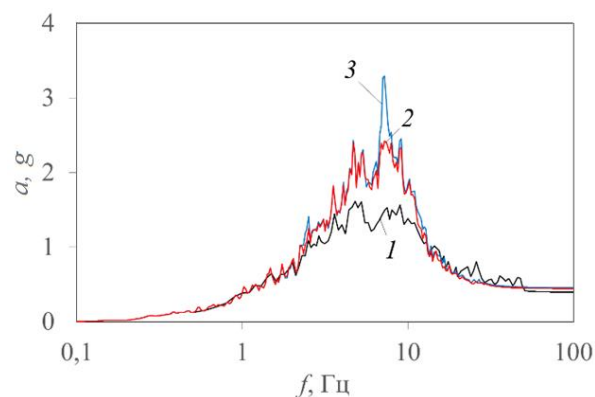
Р и с. 7. Спектры ответа, вычисленные с помощью программных комплексов ACS SASSI и SHAKE: 1 — исходное воздействие; 2 — верх бетонной подушки, SASSI; 3 — поверхность

грунтов. Проинтегрировав функции распределения перемещений, показанные на рис. 6, в зоне расположения бетонной подушки, получим следующие коэффициенты снижения перемещений (ускорений) для различных n (см. формулу (1) и таблицу): 0,19 ($n = 1$), 0,36 ($n = 3$), 0,22 ($n = 5$). Видно, что снижение перемещений (ускорений) для разных резонансных частот неравномерно, при этом минимальное соответствует второй резонансной частоте (см. рис. 6). Спектральные ускорения полной модели системы сооружение—грунтовое основание близко совпадают особенно при $n = 3$ с аналитическими оценками, что является подтверждением предположения о том, что бетонная подушка за счет своей жесткости снижает спектральные ускорения на уровне своего верха относительно перемещений в грунтовой колонке на том же уровне.

В реальных задачах демпфирование в грунтах и бетонной подушке существенно различается, что должно влиять на результаты. Зададим демпфирование при прохождении поперечных волн в грунтах засыпки равным 15% — демпфирование соответствует низкой скорости распространения поперечных волн, в естественных грунтах — 4%, демпфирование при прохождении продольных волн для всех грунтов — 2%. Демпфирование в модели сооружения примем равным 7%. Сравнение спектров ответа, вычисленных для середины жесткого штампа в полной модели сооружение—грунтовое основание, со спектрами ответа для поверхности засыпки, определенными для грунтовой колонки в отсутствие сооружения, для реального демпфирования показано на рис. 8. Видно, что высокое демпфирование в грунтах обратной засыпки приводит к существенному снижению всех резонансных пиков, при этом снижение будет тем больше, чем меньше длина волны, т.е. выше частота. Таким образом, в реальных задачах существенную роль будет играть только сейсмическое движение с первой резонансной частотой слоя грунтов обратной засыпки. Изменение движения сооружения, как и следовало ожидать, связано со снижением резонансных пиков в силу увеличения демпфирования (рис. 9). При этом спектральные ускорения, соответствующие второму резонансному пику слоя на заделке, становятся выше спектральных ускорений на поверх-



Р и с. 8. Спектры ответа, вычисленные с помощью программных комплексов ACS SASSI и SHAKE для случая реалистичного демпфирования: 1 — исходное воздействие; 2 — верх бетонной подушки, SASSI; 3 — поверхность



Р и с. 9. Спектры ответа для середины жесткого штампа: 1 — исходное воздействие; 2, 3 — реальное и низкое демпфирование соответственно

ности грунтовой колонки, что, по всей видимости, также связано с существенным различием в демпфировании.

Таким образом, исследования показывают, что для рассмотренного случая ранее сделанный вывод [3] о том, что бетонная подушка усредняет перемещения (ускорения) окружающего грунта, остается справедливым. Благодаря усреднению бетонная подушка снижает перемещения (ускорения) сооружения относительно окружающего грунта.

Второй вывод заключается в том, что при такой модели системы сооружение—грунтовое основание движение сооружения определяется в основном характеристиками грунтов обратной засыпки (скоростью распространения сейсмических волн и демпфированием). Поскольку наличие в верхней части грунтовой колонки слоя достаточной толщины с низкой скоростью рас-

пространения сейсмических волн само по себе приводит к смещению спектральных пиков исходного сейсмического воздействия в низкочастотную область, то бетонная подушка в окружении грунтов обратной засыпки обладает выраженными сейсмоизолирующими свойствами на частоте, соответствующей первой резонансной частоте слоя на заделке.

Третий вывод заключается в том, что в отличие от сейсмоизолированного движение сооружения на бетонной подушке определяется откликом не только на частоте, соответствующей первой резонансной частоте слоя на заделке, но и на других резонансных частотах слоя на заделке. При этом снижение или усиление колебаний на этих частотах зависит от соотношения длины волны в слое обратной засыпки, соответствующей резонансным частотам слоя на заделке, и толщины бетонной подушки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Тяпин А.Г.** Расчет сооружений на сейсмические воздействия с учетом взаимодействия с грунтовым основанием. М.: АСВ, 2013. 392 с.
2. **Тяпин А.Г.** Влияние глубины подушки из укрепленного грунта под фундаментной плитой на сейсмическую реакцию сооружения. Часть I. Демонстрация эффекта. — Строительная механика и расчет сооружений, 2016, № 5, с. 37—44.
3. **Тяпин А.Г.** Влияние глубины подушки из укрепленного грунта под фундаментной плитой на сейсмическую реакцию сооружения. Часть II. Роль кинематического взаимодействия сооружения с основанием. — Там же, с. 48—55.
4. **СП 63.13330.2018.** СНиП 52-01—2003. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения.
5. **ASCE/SEI 4-16.** Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures. American Society of Civil Engineers, 2017.
6. **ACS SASSI.** An Advanced Computational Software for 3D Dynamic Analysis Including Soil-Structure Interaction. User Manual, 2019.
7. **EERC 72-12.** SHAKE. A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites. College of Engineering. University of California, Berkeley, 1972.

Поступила в Редакцию 12.09.22

УДК 621.039.58

УПРАВЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫМИ АВАРИЯМИ НА РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВКАХ ПРОЕКТА АЭС-2006 (ЛЕНИНГРАДСКАЯ АЭС-2)

Сидоров В.Г., Астафьева В.О., Крылов Ю.В., Титов К.С., Кухтевич В.О., Семашко С.Е., Митрюхин А.Г.
(АО «Атомэнергoproject», г. Санкт-Петербург)
e-mail: vgsidorov@atomproekt.com

В настоящей статье показано управление тяжелыми авариями на реакторных установках проектов АЭС-2006, для которых базовой является Ленинградская АЭС-2.

Тяжелая авария, при которой происходит плавление или частичное разрушение ядерного топлива на АЭС, возможна только в случае отказа предусмотренных проектом систем безопасности, обеспечивающих теплоотвод от реакторной установки. Для проектов типа АЭС-2006, прототипом которых является Ленинградская АЭС-2, пассивная система отвода теплоты защитной оболочки (СПОТ ЗО) и пассивная система отвода теплоты реактора через парогенераторы (СПОТ ПГ) позволяют осуществить теплоотвод даже в условиях полной по-

тери электропитания. В этих условиях основными событиями, при которых существует опасность возникновения тяжелой аварии с плавлением активной зоны реактора, являются течи из первого контура в защитную оболочку, при которых не функционируют системы безопасности, компенсирующие потерю теплоносителя.

В соответствии с требованиями к безопасности АЭС [1, 2] для аварий с тяжелым повреждением топлива требуется предусмотреть меры для минимизации радиационного воздействия на персонал, население и окружающую среду. Действия по управлению тяжелыми авариями в соответствии с концепцией глубокоэшелонированной защиты начинаются на 4-м уровне после диагностирования перехода аварии в тяжелую