

ДЕМПФИРУЮЩИЕ КОНСТРУКЦИИ В СОСТАВЕ ЗАЩИТНЫХ ОБОЛОЧЕК ОБЪЕКТОВ ЯТЦ

А.В. Соболев, С.А. Олейников

ИАТЭ НИЯУ МИФИ

249040, Калужская обл., г. Обнинск, Студгородок, д. 1



Рассматривается угроза падения (удара) летящего объекта (самолет, ракета, беспилотный аппарат, перемещаемый груз, объект, поднятый ураганом) на предприятиях ядерной индустрии. К таким предприятиям могут быть отнесены как энергоблоки АЭС, так и предприятия по изготовлению ядерного топлива, переработке или хранению отработавшего ядерного топлива или радиоактивных отходов. Последствия таких воздействий могут носить катастрофический характер. Указано, что с учетом перспективы развития ядерной энергетики и увеличения числа объектов, работающих с радиоактивными веществами, эти опасности будут становиться все более значимыми.

Представлены зависимости нагрузки от времени разных типов авиации, а также способы и рекомендации по их учёту в расчётах защитных оболочек согласно нормам МАГАТЭ и другим источникам. Описаны виды и особенности защитных оболочек объектов ядерного топливного цикла, а также их недостатки. Изложены особенности процессов, происходящих при кратковременных динамических нагрузках с жёсткими монолитными бетонными конструкциями. Эти процессы могут привести к выходу из строя оборудования, работающего с радиоактивными веществами.

Изложена идея создания демпфирующих, разрушающихся конструкций в составе защитной оболочки, которые позволят поглотить часть кинетической энергии за счёт их разрушения и снизить импульсные нагрузки на оборудование, обусловленные следующим за ударом колебательным процессом. Выполнен качественный анализ такого подхода с точки зрения обеспечения защитных свойств и экономической целесообразности.

Ключевые слова: безопасность объектов ЯТЦ, удар летящего тела, запроектная авария, падение самолёта, защитная оболочка, демпфирующие конструкции.

ВВЕДЕНИЕ

С каждым годом интенсивность использования авиации увеличивается. Набирает обороты частная гражданская авиация. Не утихает в мире и активность террористических организаций. Современный технологический прогресс достиг того, что в кустарных условиях существует возможность создания беспилотных летательных аппаратов (дронов), которые могут использоваться для направленной атаки на социально или экономически важные объекты.

Примером таких событий является атака на нефтеперерабатывающие заводы Саудовс-

© А.В. Соболев, С.А. Олейников, 2021

кой Аравии [1], где был нанесён значительный урон самому крупному нефтеперерабатывающему предприятию в мире. Это подтверждает, что меры защиты от подобных событий необходимо предусматривать непосредственно на промышленной площадке объектов.

В то же время происходит развитие ядерной энергетики, особенно в развивающихся странах. Сегодня весь мировой парк атомных электростанций (АЭС) производит около 15% электроэнергии, выработанной всеми электростанциями мира. По оценкам МАГАТЭ (2009), ожидается, что к 2030 г. количество АЭС увеличится, и их суммарная мощность в мире возрастёт до 500 – 800 ГВт, хотя доля атомной электроэнергии в общем балансе может и несколько снизиться [2].

Доля российских АЭС в выработке электроэнергии сегодня примерно такая же, как в мире в целом – 16%. В рамках принятой энергетической стратегии России [3] стоит задача по увеличению этой доли до 19 – 20% к 2030 г. Прогнозируемый рост мощностей АЭС к 2030 г. лежит в пределах от 52 до 62 ГВт.

Особый интерес к строительству новых АЭС проявляют развивающиеся страны. Новые мощности электроэнергии дают им значительный экономический стимул для развития собственной промышленности.

Современные АЭС с тепловыми реакторами, работающими на урановом топливе, экономически эффективны во многих странах мира для наращивания базовых мощностей в электроэнергетике. Активно разрабатываются реакторы на быстрых нейтронах, которые позволят замкнуть топливный цикл и концептуально являются более безопасными, чем реакторы под давлением. Кроме ввода новых планируются модернизация и продление срока эксплуатации действующих энергоблоков.

В контексте масштабного развития ядерных технологий растёт роль и значимость проблемы радиоактивных отходов. За годы эксплуатации исследовательских, транспортных, энергетических атомных реакторов, а также реакторов-наработчиков накопилось большое количество радиоактивных отходов.

Такое развитие атомной отрасли невозможно без строительства новых объектов хранения и переработки радиоактивных отходов (РАО), отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) и других объектов ядерного топливного цикла (ЯТЦ).

Несмотря на то, что новые технологии в атомной отрасли позволяют значительно поднять внутреннюю безопасность объектов ЯТЦ, всегда существуют природные и техногенные опасности извне. Требуется развитие новых современных подходов к обеспечению безопасности, включая новые технические проектные решения.

Сооружения ЯТЦ являются объектами чрезвычайно высокой ответственности. Поэтому в процессе анализа их безопасности возникает необходимость учета широкого спектра нагрузок и воздействий, в том числе экстремальных динамических воздействий, характеризующихся малой вероятностью возникновения.

Аварийный процесс может возникать не только вследствие ошибок в проектах, дефектов в конструкциях, износа оборудования, ошибок персонала. Аварийная ситуация может возникнуть в результате диверсии, террористического акта, саботажа, а также в ходе военных действий [4]. Проведенные в США исследования [5, 6] показали, что практически ни одно из инженерных решений, в том числе и сооружение бетонных оболочек над реакторами АЭС, не обеспечивает гарантированной защиты реактора и систем его охлаждения от внешних ударов различной природы.

В связи с этим растёт актуальность исследований на тему воздействия ударов летящих объектов на сооружения. Не менее актуальны предложения технических решений, заложенных в конструкцию, которые позволяют снизить негативное влияние удара летящего объекта на важные узлы и оборудование промышленных предприятий, в том числе объектов атомной промышленности.

Одним из видов экстремальных воздействий, учитываемых согласно нормам МАГАТЭ [7] при проектировании ядерно- и радиационно опасных объектов [8], являются удары летящих объектов, которые появляются при различных техногенных и природных воздействиях:

- удар предмета, подхваченного ураганным ветром или торнадо;
- падение грузов при транспортировке и перемещении;
- обрушение строительных конструкций или подъёмных механизмов;
- падение на АЭС летательного аппарата;
- преднамеренная атака;
- разлёт осколков при взрывах и т.д.

Согласно работе [9], максимальная вероятность падения самолёта на площадку АЭС равна $4 \cdot 10^{-6}$ в год, а уровень вероятности, начиная с которого событие обязательно должно учитываться в проекте во многих странах, в том числе и в России, равен $1 \cdot 10^{-6}$ в год. Материалы [8, 10] указывают, что при проектировании АЭС обязательно должна учитываться возможность удара падающего самолета. Такое же требование содержится в нормах других стран (например, [11]). Международная практика учета этого воздействия отражена в документах МАГАТЭ [7].

Учет в проекте атомной станции особых динамических воздействий существенно влияет на ее конструктивные решения и материалоемкость элементов. С другой стороны, не все эти элементы АЭС в равной степени важны с точки зрения обеспечения радиационной и ядерной безопасности.

Проектными решениями для объектов ЯТЦ зачастую используется концепция жёсткой монолитной оболочки. Для обеспечения безопасности используют толстостенные железобетонные конструкции (оболочки, монолитные плиты), которые обладают высокой массой, стоимостью создания и обслуживания. Необходимость создания жесткой монолитной оболочки обусловлена потребностью в защите ядерно-опасной технологии (оборудования, работающего с ядерным топливом, самого ядерного топлива, оборудования, непосредственно определяющего безопасность технологии) от внешних воздействий и, в меньшей степени, в обеспечении дополнительного барьера безопасности на пути выхода опасных веществ в окружающую среду. Последнее поясняется не критичностью потребности создания дополнительного барьера безопасности, а тем, что жесткость монолитной оболочки (толщина, бетон высокой прочности и т.п.) определяется преимущественно защитой от внешних воздействий, а не требованиями к удержанию избыточного давления под оболочкой в случае аварии.

Одним из недостатков такого подхода к защите от внешних воздействий является полная передача импульса ударной нагрузки на жесткую оболочку и формирование колебательного процесса оболочки с огромными ускорениями. Это приводит к необходимости создания оборудования, способного выдержать такие инерционные ускорения и, соответственно, к увеличению сложности и стоимости этого оборудования. В случае внешних воздействий другого происхождения (взрыв на площадке, сейсмическое воздействие) жёсткая оболочка аналогично приводит к формированию огромных ответных ускорений и потребности в оборудовании, способном их выдерживать.

Приведенные аспекты формируют потребность в инженерных решениях, которые устранили бы данные проблемы монолитных конструкций.

Если провести параллель с автомобилестроением, то там уже с середины 1980-х гг. стали отходить от концепции обеспечения безопасности пассажиров с помощью жёстких кузовов, изготовленных из толстого слоя металла, и перешли к концепции сминаемой конструкции. Перенимая опыт автомобилестроения, можно было бы за счёт использования деформируемых защитных конструкций значительно снизить материалоемкость объектов ЯТЦ, параллельно повышая их сопротивление воздей-

ствиям ударных нагрузок от летящих объектов.

ВИДЫ ЛЕТАЮЩИХ ОБЪЕКТОВ, НАГРУЗКИ ОТ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ АВИАЦИИ, ХАРАКТЕР ПОВРЕЖДЕНИЙ КОНСТРУКЦИИ ЗДАНИЙ

Согласно нормам МАГАТЭ [7] и отечественным нормам [8], при проектировании объектов атомной отрасли учитываются природные процессы (гидрометеорологические, геологические и инженерно-геологические) с максимальными значениями, определенными на интервале времени 10 000 лет, и техногенные воздействия. Также учитываются ситуации, когда аварийные процессы могут возникнуть в результате диверсии, террористического акта, саботажа или в ходе военных действий [4]. Одним из наиболее опасных воздействий на сооружение ЯТЦ является удар летящего объекта, в частности, самолёта. Обязательным требованием стандарта МАГАТЭ SRS 87 [12] является учёт воздействия на объект атомной отрасли удара самолёта.

Ударяющий в здание самолёт обладает значительной кинетической энергией. Его удар вызывает колебания здания и инерционные нагрузки на расположенное в нем технологическое оборудование. В связи с этим возникает проблема обеспечения работоспособности оборудования и трубопроводов, важных для безопасности, при действии этих колебаний, чтобы гарантировать безопасную эксплуатацию оборудования и недопущение развития аварий с выходом радиоактивных продуктов в атмосферу. Для этого требуется определить инерционные нагрузки, с учетом которых затем проектируются оборудование и трубопроводы, важные для безопасности.

Опыт авиационных аварий и катастроф свидетельствует о том, что при соударении фюзеляжа самолета с твердой преградой (в том числе с землей) указанные элементы конструкции сравнительно легко сминаются, частично или полностью разрушаются. При ударе таких тонкостенных оболочек с преградами кинетическая энергия расходуется как на их собственное разрушение, так и на деформацию преграды. В связи с тем, что масса преграды обычно многократно превосходит массу самолета (или элемента, ударяющего в конструкцию), доля энергии, затраченная на разрушение тела, как правило, существенно превышает долю энергии, истраченной на деформацию преграды.

При расчете удара самолета о железобетонную конструкцию с целью упрощения принимают, что разрушающиеся элементы самолёта являются упругопластичными, а преграда – твёрдым телом. Прибегают также к упрощенной схематизации – эти элементы рассматривают в виде одномерных тел, т.е. эквивалентных стержней с переменными по длине характеристиками (массой и прочностью). При таком подходе в каждом из сечений эквивалентного стержня, имитирующего летательный аппарат, задаются средние значения массы и жесткости, зависящие только от продольной координаты. Это позволяет сохранить интегральные характеристики взаимодействия самолёта с конструкциями зданий [13].

Существует ряд рекомендаций и общепринятых допущений при анализе прочности зданий и сооружений атомных объектов на внешние ударные воздействия. К таким рекомендациям относятся, в частности, следующие: угол падения самолета к горизонту следует принимать в интервале от 0 до 45°, величину коэффициента динамичности при расчете эквивалентной статической нагрузки принимать на основании динамического расчета [7]. Традиционно считают наиболее опасным удар по нормали к преграде, которую обычно задают вертикальной. При ударе по нормали точка соударения остается неподвижной. Однако вероятность такого события, при котором удар произойдет строго по нормали, крайне мала, и для более широкого представления о подобных воздействиях следует рассчитывать и удар под углом. Важно, что в большинстве известных методов расчёта при угле падения, отличающегося от нормали, возникают трудности и потребность во введении дополнительных допущений, которые значительно влияют на

точность результатов.

Тела в зависимости от сравнительной величины деформации самого тела и ударяемой преграды можно условно разделить на жесткие и легко деформируемые или разрушающиеся. При ударе первых кинетическая энергия расходуется, главным образом, на деформацию преграды, а само тело часто считают абсолютно твердым, недеформируемым. Легко деформируемые тела преимущественно сами разрушаются при ударе о преграду, т.е. их кинетическая энергия расходуется, в основном, на собственное разрушение и, лишь отчасти, на деформацию преграды. При проектировании зданий и сооружений атомных объектов в качестве таких тел часто рассматривают сминаемый фюзеляж самолета.

В настоящее время зачастую учитывается падение на здания и конструкции атомных объектов самолетов трех видов: авиация общего назначения, военная авиация и коммерческая авиация. Ниже представлены нагрузки и воздействия при падении самолетов указанных типов.

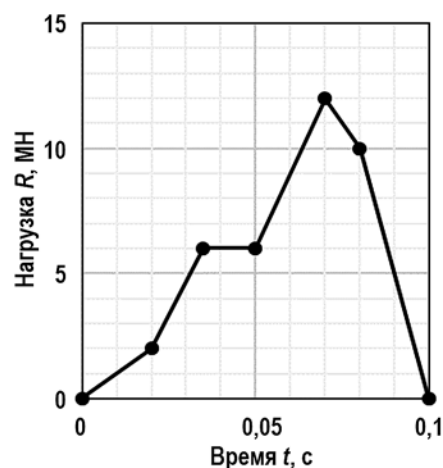


Рис. 1. Нагрузка при ударе самолёта Lear Jet-23 [11]

В качестве самолёта общей авиации чаще всего рассматривается LearJet-23. Учет воздействия на конструкции от падения самолета такого типа предусмотрен нормами Франции [11] и Рекомендациями МАГАТЭ [7]. Параметры самолёта: длина 13,8 м, высота 3,84 м, размах крыльев 10,85 м. Максимальная взлетная масса 5,67 т. Имеет два турбореактивных двигателя длиной 1 м, диаметром 0,45 м и массой 180 кг. Зависимость нагрузки от времени при ударе представлена на рис. 1. Она соответствует скорости удара $v = 360$ км/ч, площадь пятна удара $S = 12$ м². Для АЭС, расположенных далее 5 км от аэропорта, направление удара принимается от 0 до 45° к вертикали, а ближе 5 км рассматривается также траектория под углом 80° к вертикали.

В качестве самолёта военной авиации по нормам Германии [14] и рекомендациям МАГАТЭ принято рассматривать истребитель-бомбардировщик Phantom RF-4E. По отечественным нормативам параметры военного самолёта, которые необходимо учитывать при расчёте объекта ЯТЦ, очень схожи с параметрами Phantom. График зависимости изменения нагрузки на строительные конструкции, применяемый в расчетах, представлен на рис. 2. На графике приводится зависимость нагрузки на строительные конструкции в зависимости от времени с момента начала контакта с фюзеляжем самолёта. Суммарная масса самолета составляет 20 т, скорость 215 м/с. Угол падения составляет от 0 до 45° к горизонту. Пятно удара обычно представляется круговой формы и характеризуется площадью контакта самолёта (в последствии обломков самолёта) со строительной конструкцией. Площадь пятна контакта Phantom RF-4E составляет 7 м².

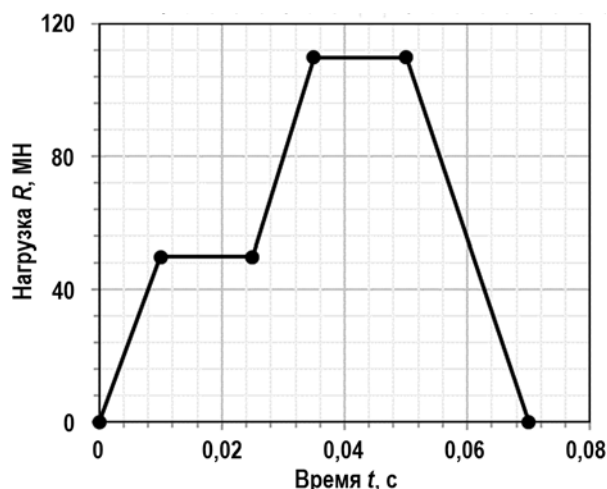


Рис. 2. Нагрузка при ударе истребителя-бомбардировщика Phantom RF-4E [14]

В 1988 г. в Sandia National Laboratories (США) был проведен натурный эксперимент с ударом самолета Phantom RF-4E о массивную железобетонную плиту толщиной 3,66 м (рис. 3). Результаты исследования, изложенные в работе [6], показали, что 94% кинетической энергии самолета было затрачено на собственное разрушение и оставшиеся 6% – на разрушение железобетонной конструкции.

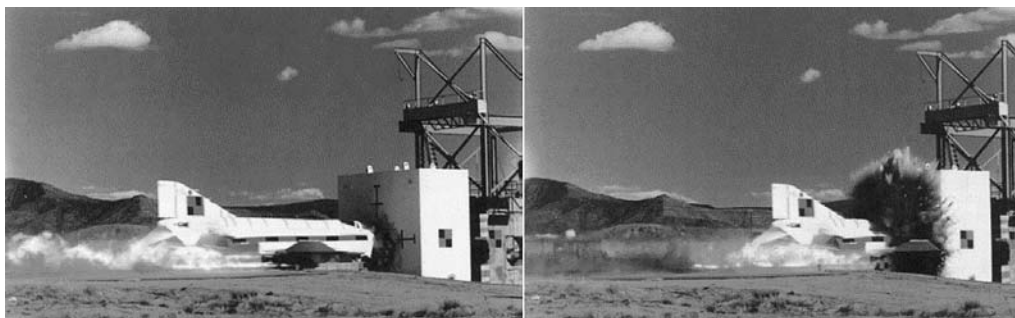


Рис. 3. Удар самолёта Phantom RF-4E в железобетонную преграду

Для расчётов воздействия самолетов коммерческой авиации используют модель самолёта Boeing 707-320, в который вмещаются около 190 пассажиров и членов экипажа. Его геометрические параметры: размах крыла 44,42 м, длина 44,61 м, высота 12,75 м. Имеет четыре турбореактивных двигателя. Рекомендации МАГАТЭ указывают на необходимость учета удара двигателей. В рамках проектирования в случае необходимости учета падения самолета такого класса, принимают его массу 200 т и скорость перед ударом 100 м/с. Зависимость нагрузки и площади пятна удара от времени показаны на рис. 4.

Как упоминалось ранее, нагрузки по нормам РФ [10] очень схожи с нагрузками от воздействия Phantom RF-4E. На рисунке 5 приведена рекомендованная зависимость нагрузки на строительные конструкции и площади пятна удара от времени по нормам РФ. Считается, что они создаются ударом военного самолета с массой 20 тонн и скоростью 200 м/с. Угол падения самолета варьируется от 0 до 45° к горизонту. Направление удара по нормали следует считать наиболее опасным для конструкции. Эта нагрузка пропорциональна нагрузке при ударе самолета Phantom RF-4E. Необходимость учета удара двигателя, а также возгорание и (или) взрыв авиационного топлива нормами не оговариваются.

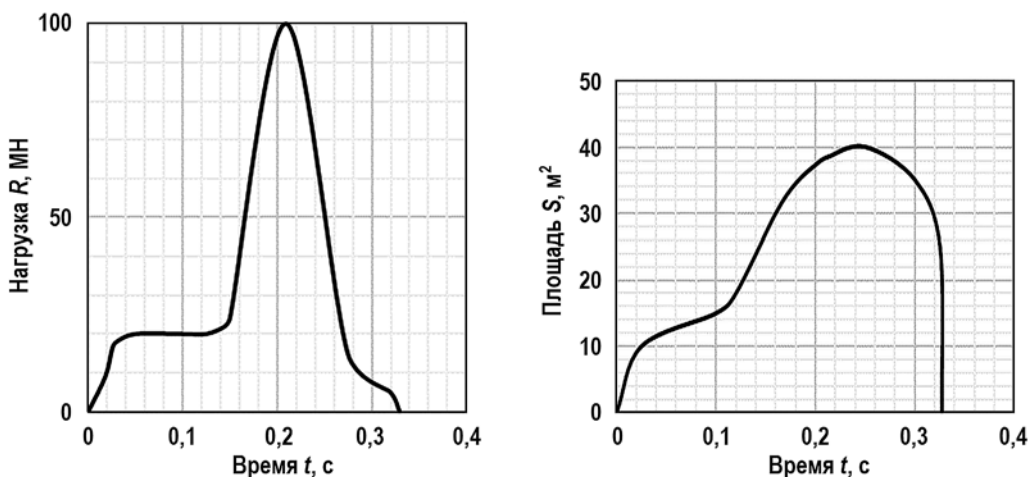


Рис. 4. Нагрузка R и площадь пятна удара S при ударе самолета Boeing 707-320 со скоростью 100 м/с [12]

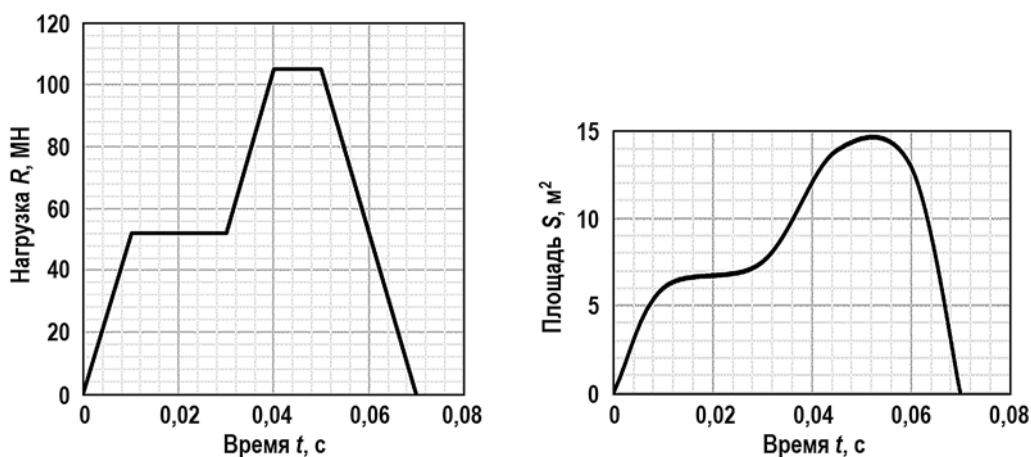


Рис. 5. Нагрузка R и площадь пятна удара S при ударе самолета по нормам РФ [10]

Для удобства качественного анализа все виды рассматриваемых самолётов и соответствующие им параметры сведены в табл. 1.

Таблица 1

Типы самолетов и характеристики нагрузок

Наименование самолёта (класс)	Площадь пятна удара, м ²	Сосредоточенная нагрузка, МН	Угол падения, градусы	K_d	Примечания
Lear Jet-23 (общего назначения)	12	12	0 – 80	1,1 – 1,3	Нормы Франции, рекомендации МАГАТЭ
Phantom RF-4E (военный)	14	110	0 – 45	1,1 – 1,6	Нормы Германии, рекомендации МАГАТЭ
Boeing 707-320 (коммерческий)	40	100	0 – 10	1,1 – 1,6	Рекомендации МАГАТЭ
Самолёт по нормам России	14	105	10 – 45	1.1	Нормы России

Проанализировав данные таблицы, можно отметить следующие особенности нагрузок от различных представителей авиации. Коммерческий Boeing 707-320 опасен для сооружений и зданий, имеющих большие внешние линейные размеры, так как имеет наибольшую площадь пятна удара и наибольшую массу. По сосредоточенной и распределённой нагрузке наиболее опасен военный Phantom RF-4E, он обладает также высокой удельной массой на объём и высокими скоростями полёта на низких высотах.

ХАРАКТЕР И ОСОБЕННОСТИ УДАРНОЙ НАГРУЗКИ ПРИ УДАРЕ ЛЕТАЮЩЕГО ТЕЛА

Анализ прочности и надёжности строительных конструкций и оборудования объектов ЯТЦ является одним из молодых и быстро развивающихся разделов теории надёжности и представляет собой синтез теории надёжности сложных систем и теории надёжности конструкций. Особый интерес представляет исследование влияния ударных нагрузок на конструкции зданий и сооружений ЯТЦ.

Удар происходит, когда скорость точек рассматриваемой части конструкции или соприкасающихся с ней частей значительно изменяется в очень малый промежуток времени.

При воздействии ударной нагрузки в конструкциях и материалах возникают особенности, отличные от статической нагрузки:

- в упругой конструкции под действием ударной нагрузки возникают колебательные движения, которые постепенно затухают за счёт внутреннего сопротивления;
- в противодействии ударной нагрузке участвует только определённая область конструкции, расположенная в зоне взаимодействия.

Проблема расчёта и определения нагрузок при кратковременных воздействиях имеет большую историю. В научной литературе этой проблеме уделено много внимания. Первые решения таких задач были получены ещё в XVII в. Эти решения являются достаточно сложными, так как требуют учёта множества факторов (распределение массы по длине объекта, упругопластические свойства тела, учёт местных деформаций и т.п.).

Специфика расчёта нагрузок на строительные конструкции при падении на них разрушающихся тел также связана с тем, что большая часть их кинетической энергии (до 95%) расходуется на разрушение самих разрушающихся тел.

Из работ [15, 16] известно, что физико-механические характеристики некоторых материалов, таких как железобетон и других, при кратковременном динамическом нагружении могут существенно отличаться от статических характеристик. Прочность бетона значительно выше, и наблюдается неравномерное развитие и определенное запаздывание деформаций.

Дополнительную сложность вызывает также расчёт удара разрушающегося тела, например, самолёта, о систему преград. В таком случае самолёт, прежде чем воздействует на ответственные помещения, частично разрушается, взаимодействуя с неотвеченными помещениями, которые могут быть разрушены.

Разработанные за последние десятилетия методы расчета строительных конструкций АЭС на экстремальные воздействия нашли свое отражение в ряде отечественных и международных нормативных документов. При этом, несмотря на наличие значительной неопределенности стохастического характера, связанной с выбором сочетаний нагрузок и воздействий, параметров экстремальных воздействий, анализ прочности, устойчивости и другие расчеты строительных конструкций атомных станций при особых воздействиях обычно выполняются детерминистическими методами.

Зарубежными и отечественными исследователями разработаны методики расчёта подобных нагрузок от удара самолёта. Однако в них рассматривался удар быстролетящего тела по нормали (т.е. 0°) к вертикальной преграде. При этом, как правило, учиты-

вается только нагрузка, создаваемая этим телом во времени, и не учитывается собственный вес тела, зависимость нагрузки от податливости преграды. По этой причине в случае расчёта купольной части защитной оболочки АЭС или случая падения самолёта по касательной к строительной конструкции данные методики не дают достаточно точных результатов. Также в этих методиках не учитывается разрушение самого летящего объекта. Нагрузка, передаваемая зданию, учитывается как пятно контакта с переменным давлением во времени. Данное допущение вносит излишний консерватизм в расчёты и не даёт точных результатов. Современные подходы к проектированию все чаще вводят учет податливости летящих тел, несмотря на большую сложность расчетного анализа и обоснования проектных решений. Пример такой методики расчёта приводится в [17], где авторы снимают излишний консерватизм результатов расчетного анализа удара самолета в здание АЭС за счет учета разрушаемости конструкций зданий и имитатора самолета. Однако еще большее снятие излишнего консерватизма возможно при учете поглощения энергии удара за счет собственно разрушения материала, а не только за счет его деформирования в упругопластической области. Использование методик, учитывающих указанные явления при анализе конструкций АЭС и ЯТЦ, показывают существенное снижение нагрузок на оборудование объекта и наличие больших запасов по устойчивости к ударам летящих объектов. Тем не менее, сегодня крайне редко указанные явления используются непосредственно для разработки конструкций, т.е. при расчетном анализе учитывают и упругопластическую работу материалов конструкций, и энергию, затрачиваемую на разрушение, но очень редко создают специальные приспособления или элементы конструкции, которые будут повышать устойчивость сооружения к ударным нагрузкам за счет упругопластической деформации и разрушения.

С помощью реализации таких приспособлений или специальных элементов конструкции возможна разработка и создание более совершенных защитных сооружений объектов использования атомной энергетики.

ЗАЩИТНЫЕ КОНСТРУКЦИИ СООРУЖЕНИЙ ЯТЦ

Атомные энергетические станции и прочие сооружения ЯТЦ являются особо опасными объектами, так как нарушение их эксплуатации или авария могут привести к выбросу радиоактивных веществ в окружающую среду. Для предотвращения выхода радиоактивных веществ в случае внештатной ситуации за пределы предприятий ЯТЦ и объектов использования атомной энергии в ядерной индустрии применяется концепция эшелонированной защиты. Одним из таких эшелонов, например, для АЭС, является железобетонный контейнмент, в других случаях – толстостенные железобетонные конструкции.

Защитные железобетонные конструкции рассчитывают и проектируют с учётом всех возможных событий, таких как землетрясение, цунами, ураган, смерч, обрушение строительных конструкций, падений летящих объектов, взрыв, ракетный удар и т.д. Подобные функции защитной оболочки значительно увеличивают её материалоемкость, что увеличивает конечную стоимость АЭС и прочих объектов использования атомной энергии и ЯТЦ.

К примеру контейнмент представляет собой сложную конструкцию, которая опирается на мощное бетонное основание. У современных энергоблоков проекта АЭС-2006 предусмотрен двухслойный контейнмент, состоящий из внешней и внутренней защитных оболочек. Толщина внешней оболочки, изготовленной из железобетона, составляет 800 мм. Стенки внутренней герметичной оболочки составляют 1200 мм. Внутри стены пропущены стальные тросы, которые стягивают всю конструкцию, создавая предварительное натяжение бетона. Эта мера необходима для удержания внутреннего давления в оболочке в случае аварии и позволяет увеличить способность удерживать давление примерно в три раза. С внутренней стороны оболочка покрыта сплошным шести-

миллиметровым слоем стали [18]. Подробнее о контейментах и бетонных оболочках сказано в [19, 20].

Ещё один пример – это долгосрочные хранилища радиоактивных отходов. Такие хранилища существуют в различных исполнениях: шахтного, штольневоего, траншейного, курганного, заглубленного, поверхностного и комбинированного типов. Независимо от типа хранилища в качестве перекрытий используются сплошные железобетонные плиты толщиной до 500 мм. Такой элемент помимо высокой материалоемкости имеет большую массу. Это влечёт за собой повышение прочности и толщины опорных элементов (стен, дополнительных колонн, фундамента), что также увеличивает и материалоемкость, и итоговую цену сооружения.

Кроме высокой цены и материалоемкости у жёстких бетонных конструкций есть ещё некоторые недостатки. Одним из таких недостатков является то, что при ударных нагрузках кинетическая энергия от удара вызывает сильные колебания жёсткой конструкции, что может привести к повреждению ответственного оборудования и элементов его крепления, внутри оболочки без разрушения самой оболочки. Колебания возникают из-за того, что такая конструкция жёсткая и неподатливая, и поэтому удар носит скорее упругий характер.

Эти проблемы могло бы решить использование демпфирующих разрушающихся конструкций из полого железобетона. Идея такой конструкции заключается в том, что в процессе взаимодействия энергия удара расходовалась бы не на вызов колебаний конструкции, а на её последовательное разрушение. Рационально распределив соотношение между жёсткими и разрушаемыми элементами, можно добиться лучших показателей по материалоемкости и безопасности таких оболочек. Жёсткая часть такой конструкции отвечала бы за предотвращение разгерметизации оболочки, а разрушающаяся – за гашение ударной нагрузки, передаваемой конструкции. Если демпфирующий разрушающийся элемент сделать многослойным, то в процессе разрушения слоёв обломки ударяющегося тела могут распределяться в пространстве, что позволит увеличить пятно контакта с жёстким элементом оболочки. Таким образом, нагрузка на единицу площади оболочки может быть снижена. Также увеличится время взаимодействия тела с оболочкой, что снизит амплитуду колебаний оболочки и, как следствие, ускорения. За счёт использования полых конструкций может быть снижена материалоемкость и масса оболочки, что также снизит их цену.

Существуют и сооружения ЯТЦ, на которых отсутствует защитная оболочка, например, хранилище ОЯТ при АЭС. Использование разрушающихся демпфирующих конструкций на стенах и перекрытиях подобных объектов может значительно повысить их защищённость от внешних факторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование концепции деформирующихся конструкций в атомной энергетике может изменить подход к строительству защитных оболочек объектов использования атомной энергии и существенно снизить их стоимость, а также стоимость оборудования основного технологического процесса.

Применяя современные методы расчёта и способы вычислений, можно определить рациональную комбинацию деформируемых и жёстких защитных сооружений для повышения защитных свойств и в то же время удешевления конструкций объектов использования атомной энергии в целом.

Литература

1. Houthi Drone Attacks on 2 Saudi Aramco Oil Facilities Spark Fires. Электронный ресурс: <https://www.aljazeera.com/news/2019/09/drones-hit-saudi-aramco-facilities-fires-190914051900472.html> (дата доступа: 12.02.2021).

2. Рачков В.И. Стратегии развития атомной энергетики России. // Труды Всероссийской научно-практической конференции «Повышение надежности и эффективности эксплуатации электрических станций и энергетических систем» ЭНЕРГО-2010 (Москва, 1-3 июня 2010 г.). – Том 1. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – С.21-24.
3. Официальный сайт Министерства энергетики Российской Федерации. Доклад о реализации Энергетической стратегии России на период до 2030 года по итогам 2018 года. Электронный ресурс: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (дата доступа: 12.02.2021).
4. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий. / Под общ. ред. В.А. Котляревского, А.В. Забегаева. Том 1. – М.: Изд-во АСВ, 1995. – С. 168-183.
5. Bauer J., Scharpf F., Schwarz R. Analysis of Reinforced Concrete Structures Subjected to Aircraft Impact Loading. // Transactions of the VII-th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, J9/4, Seiten 423-430, 1983.
6. Sugano T. et al. Full-Scale Aircraft Test for Calculation of Impact Force. // Nucl. Engng. and Des. – 1993. – Vol. 140. – PP. 373-385.
7. External Human-Induced Events in Site Evaluation for Nuclear Power Plants. IAEA Safety Standards Series. Safety Guide No. NS-G 3.1 – International Atomic Energy Agency. Vienna, 2002. – 49 p.
8. НП-064-17. Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии. – М.: ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2018. – 70 с.
9. Архипов С.Б. Вероятностный анализ прочности колебаний строительных конструкций зданий АЭС при ударе самолета. Дисс. к. т. н.: 05.23.01. Санкт-Петербургский государственный технический университет. – Санкт-Петербург, 2000. – 138 с.
10. Нормы строительного проектирования атомных станций с реакторами различного типа: ПиНАЭ 5.6. – М.: Минатомэнерго РФ, 1986. – 21 с.
11. Правила проектирования и строительства строительных конструкций ядерного острова с реактором типа REP (с водой под давлением): RCC G. – Париж: Электрисите де Франс, июль 1988. – 115 с.
12. Нормы МАГАТЭ по безопасности для защиты людей и охраны окружающей среды. Руководство по безопасности No. GS-G-3.5 Система управления для ядерных установок. – Вена: МАГАТЭ, 2014. – 183 с.
13. Новожилов Ю.В., Михалюк Д.С., Феоктистова Л.Ю. Расчет нагрузки на здания ядерного острова АЭС при ударе воздушного судна. // Вычислительная механика сплошных сред. – 2018. – Т. 11. – № 3. – С. 288-301.
14. Richtlinie für den Schutz von Kernkraftwerken gegen Druckwellen aus chemischen Reaktionen durch Auslegung der Kernkraftwerke hinsichtlich ihrer Festigkeit. // Bundesanzeiger. – 1976. – No. 179. – PP. – 1-3. Bonn (22.9.1976).
15. Попов Н.Н., Расторгуев Б.С. Динамический расчет железобетонных конструкций. – М.: Стройиздат, 1974. – 207 с.
16. Ламзин Д.А. Высокоскоростное деформирование и разрушение мелкозернистых бетонов. Дисс. канд. техн. наук. 01.02.06. Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского. – Нижний Новгород, 2014. – 161 с.
17. Волкодав И.А. Методика оценки безопасности АЭС при ударах разрушающихся объектов. Дисс. к. т. н. 05.26.02. Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. – Санкт-Петербург, 2011. – 167 с.
18. Росатом: история и современность. Энциклопедия атомной отрасли. Электронный ресурс: <http://edu.strana-rosatom.ru/> (дата доступа: 12.02.2021).
19. Nuclear Containments: State-of-art Report. – Stuttgart: Federation internationale du beton, 2001. – 117 p.
20. International Atomic Energy Agency, Ageing Management of Concrete Structures in Nuclear Power Plants, Nuclear Energy Series No. NP-T-3.5. – Vienna, 2016. – 355 p.

Поступила в редакцию 16.02.2021 г.

Авторы

Соболев Артем Владимирович, старший преподаватель

E-mail: sobolevartem82@gmail.com

Олейников Сергей Анатольевич, аспирант

E-mail: SergeiOleynikov95@yandex.ru

UDC 621.039.586

**DAMPING STRUCTURES AS PART OF THE PROTECTIVE SHELLS
OF NUCLEAR FUEL CYCLE FACILITIES**

Sobolev A.V., Oleynikov S.A.

Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, NRNU «MEPhI»

1 Studgorodok, 249040 Obninsk, Kaluga Reg., Russia

ABSTRACT

The material considers the threat of falling or hitting a flying object (aircraft, rocket, unmanned vehicle, object raised by a hurricane, cargo being moved) at the enterprises of the nuclear industry. Such enterprises can include both nuclear power units and enterprises for nuclear fuel production, reprocessing or storage of spent nuclear fuel or radioactive waste. The consequences of such impacts can be catastrophic. It is indicated that taking into account the prospects for the development of nuclear energy and the increase in the number of facilities working with radioactive substances, these dangers will become increasingly significant.

The time-load dependences of different types of aircraft are presented, as well as methods and recommendations for their accounting in the calculations of protective shells according to the standards of the IAEA and other sources. The types and features of protective shells for nuclear fuel cycle facilities and their disadvantages are described. The features of the processes occurring under short-term dynamic loads with rigid monolithic concrete structures are described. These processes can lead to the failure of equipment working with radioactive substances.

The idea of creating damping, collapsing structures as part of the protective shell, which will absorb part of the kinetic energy due to their destruction and reduce the impulse loads on the equipment caused by the oscillatory process following the impact, is presented. A qualitative analysis of this approach is performed from the point of view of ensuring protective properties and economic feasibility.

Key words: safety of nuclear fuel cycle facilities, impact of the flying body, beyond design basis accident, aircraft crash, protective shell, damping structures.

REFERENCES

1. Houthi drone attacks on 2 Saudi Aramco oil facilities spark fires. Available at: <https://www.aljazeera.com/news/2019/09/drones-hit-saudi-aramco-facilities-fires-190914051900472.html> (accessed Feb. 12, 2021).
2. Rachkov V.I. Strategies for the Development of Nuclear Power in Russia. *Proc. of the Russian Scientific and Practical Conference «Improving the Reliability and Efficiency of Power Plants and Energy Systems» – ENERGY-2010* (Moscow, June 1-3, 2010). Moscow. MEI Publishing House, 2010, v. 1, pp. 21-24 (in Russian).
3. Official website of the Ministry of Energy of the Russian Federation. Report on the implementation of Russia's Energy Strategy for the period up to 2030 based on the results of 2018. Available at: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (accessed Feb. 12, 2021).

4. *Accidents and catastrophes. Prevention and elimination of consequences*. Training manual in 6 volumes. Ed. V.A. Kotlyarevsky, A.V. Zabegaev. Moscow. Assoc. Stroit. Vuzov Publ., 1995-2003, v. 1, pp. 168-183 (in Russian).
5. Bauer J. Analysis of Reinforced Concrete Structures Subjected to Aircraft Impact Loading. *Transactions of the VII-th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology*, J9/4, Seiten 423-430, 1983.
6. Full-Scale Aircraft Test for Calculation of Impact Force. Ed. Sugano T. et al. *Nucl. Engng. and Des.* 1993, v. 140, pp. 373-385.
7. External Human-Induced Events in Site Evaluation for Nuclear Power Plants. IAEA Safety Standards Series. Safety Guide No. NS-G 3.1. International Atomic Energy Agency. Vienna, 2002, 49 p.
8. NP-064-17. *Accounting of External Natural and Man-Induced Impacts on Nuclear Facilities*. Moscow. FBU «NTTs YaRB» Publ., 2018, 70 p. (in Russian).
9. Arkhipov S.B. *Probabilistic Analysis of the Vibration Strength of Building Structures of NPP Buildings Under the Impact of an Airplane*. Cand. Sci. (Tech.) Diss. St Petersburg State Technical University, 2000, 138 p. (in Russian).
10. PiNAE 5.6. *Construction Design Standards for NPPs with different Types of Reactor*. Moscow. Minatomjenergo RF Publ., 1986, 21 p. (in Russian).
11. *Rules for the Design and Construction of Nuclear Island Structures with a REP type Reactor (with Pressurized Water): RCC G*. Paris. Electricite de France Publ., July 1988, 115 p.
12. IAEA Safety Standards for protecting people and the environment. Safety Guide No. GS-G-3.5 *The Management System for Nuclear Installations*. IAEA, Vienna, 2014, 183 p.
13. Novozhilov Yu.V., Mihaljuk D.S., Feoktistova L.Yu. Calculation of the Load on the Nuclear Island of Nuclear Power Plant's Buildings in the Event of an Aircraft Strike. *Vychislitel'naja mehanika sploshnyh sred.* 2018, v.11, no.3, pp. 288-301 (in Russian).
14. Richtlinie für den Schutz von Kernkraftwerken gegen Druckwellen aus chemischen Reaktionen durch Auslegung der Kernkraftwerke hinsichtlich ihrer Festigkeit. *Bundesanzeiger*. 1976, no. 179, pp. 1-3. Bonn (Sep. 9, 1976).
15. Popov N.N., Rastorguev B.S. Dynamic Calculation of Reinforced Concrete Structures. Moscow. Strojizdat Publ., 1974, 207 p. (in Russian).
16. Lamzin D.A. *High-Speed Deformation and Destruction of Fine-Grained Concrete*. Cand. Sci. (Tech.) Diss. Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, 2014, 161 p. (in Russian).
17. Volkodav I.A. *Methodology for Assessing the Safety of Nuclear Power Plants in the Event of Impacts of Collapsing Objects*. Cand. Sci. (Tech.) Diss. St Petersburg State Polytechnical University, 2011, 167 p. (in Russian).
18. Rosatom: History and Modernity. Encyclopedia of the Nuclear Industry. Available at: <http://edu.strana-rosatom.ru/> (accessed Feb. 12, 2021).
19. Nuclear Containments: State-of-art Report. Stuttgart. Federation internationale du beton, 2001, 117 p.
20. International Atomic Energy Agency, Ageing Management of Concrete Structures in Nuclear Power Plants, Nuclear Energy Series No. NP-T-3.5. Vienna, 2016, 355 p.

Authors

Sobolev Artem Vladimirovich, Senior Lecturer
E-mail: sobolevartem82@gmail.com

Oleynikov Sergey Anatolyevich, PhD Student
E-mail: SergeiOleynikov95@yandex.ru