

ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ ВНЕШНЕЙ ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКИ РЕАКТОРНОГО ОТДЕЛЕНИЯ АЭС ПРИ ПАДЕНИИ САМОЛЕТОВ РАЗНЫХ ТИПОВ

Денисюк Е. А.

Научный руководитель – Архангельская Т. М.
Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Аннотация. В статье исследованы внешние экстремальные нагрузки, действующие на конструкцию АЭС, их особенности и методы расчета на примере падения самолетов разных типов.

Имеются два основных пути обеспечения защиты АЭС от экстремального воздействия: либо посредством специальных защитных барьеров (например, наружная железобетонная защитная оболочка реакторного отделения), либо путем проектирования систем исходя из требования, чтобы они могли противостоять экстремальному воздействию (включая их дублирование, разнотипность и пространственное разделение). Существует 4 канала безопасности на АЭС. Такое воздействие, как например падение самолета выбивает один из них – остальные гарантируют отсутствие ядерной катастрофы. Строительные конструкции защитной оболочки являются последним и единственным барьером в случае возможной аварии. В этой связи научные сотрудники, занимающиеся ее разработкой и расчетами, делают очень важную работу. Суммарная стоимость систем безопасности достигает 40% от стоимости строительства, иначе 4 млрд. долларов. Для АЭС [1], в которых в результате аварии возникает значительное избыточное давление, применяют защитные оболочки с цилиндрическими стенами, с покрытием в виде сферы и с плоским или сферическим днищем.

Необходимость учета воздействия от падения самолета определяется «Общими положениями обеспечения безопасности атомных станций при проектировании, сооружении и эксплуатации», а также специальными требованиями Заказчика. При расчете зданий и сооружений атомных станций на воздействие от падения самолета

следует: угол падения самолета к горизонту принимать в интервале от 10 до 45°; величину коэффициента динамичности при расчете эквивалентной статической нагрузки принимать на основании динамического расчета. Существует два метода расчета конструкций АЭС на экстремальные воздействия [2]: детерминистический расчет конструкций; вероятностный анализ надежности.

Согласно детерминистическому методу для проверки сохранения работоспособности конструкции отклики сравниваются с соответствующими предельными значениями – прочностью материалов, допускаемыми перемещениями и т.п. Прочность конструкции зависит от характеристик материалов и от приложенных к конструкции воздействий. В результате детерминистического расчета конструкции формально получается однозначный ответ на вопрос, сохраняется или нет ее работоспособность. Однако в действительности, используемые значения коэффициентов позволяют гарантировать работоспособность только с некоторой вероятностью. Методы оценки этой вероятности изложены в [2].

Тела, в зависимости от сравнительной величины деформации самого тела и ударяемой преграды эти тела 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. Легко деформируемые тела сами разрушаются при ударе о преграду, т.е. их кинетическая энергия расходуется как на собственное разрушение, так и на деформацию преграды. При этом первая доля энергии может оказаться больше, чем вторая. При проектировании зданий и сооружений АЭС в качестве таких тел рассматривают сминаемый фюзеляж самолета.

В настоящее время принято рассматривать падение на АЭС самолетов трех видов: относящихся к авиации общего назначения, военной и коммерческой сфер. Ниже приведены нагрузки и воздействия при падении самолетов разных типов, предусмотренные различными нормативами и руководящими материалами, а также применявшиеся в реальных проектах АЭС.

Самолеты авиации общего назначения. Самолет Lear Jet-23. Учет падения самолета этого типа предусмотрен нормами Франции

[3] и Рекомендациями МАГАТЭ [4]. Его длина 13,8 м, высота 3,84 м, размах крыльев 10,85 м. Максимальная взлетная масса 5670 кг. Самолет имеет два турбореактивных двигателя длиной 1 м, диаметром 0,45 м и массой 180 кг. Нагрузка при ударе представлена на рис. 1. Она соответствует скорости удара $v = 360$ км/ч, площадь пятна удара $S = 12$ м². Для АЭС, расположенных дальше 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.

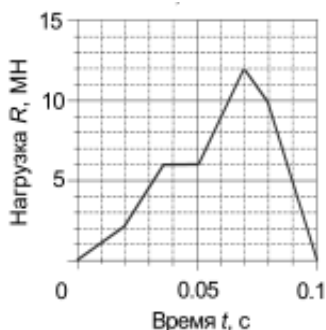


Рисунок 1. – Нагрузка при ударе самолёта Lear Jet-23

Военные самолеты. Истребитель-бомбардировщик Phantom RF-4E. Учет самолета этого типа предусмотрен нормами Германии [5] и Рекомендациями МАГАТЭ [4]. Закон изменения нагрузки на строительные конструкции, применяемый в расчетах, показан сплошной линией на рис. 2. Суммарная масса самолета составляет 20000 кг, скорость 215 м/с [6]. Угол падения составляет от 0 до 45° к горизонту. Пятно удара обычно принимают в виде круга площадью 7 м². Кроме приведенной нагрузки, соответствующей разрушению фюзеляжа, учитывают удар двигателя с массой 1665 кг, диаметром 0,91 м и скоростью 100 м/с. Угол удара от 0 до 45° к горизонту.

Кроме приведенной нагрузки, соответствующей разрушению фюзеляжа, учитывают удар двигателя с массой 1665 кг, диаметром 0,91 м и скоростью 100 м/с. Угол удара от 0 до 45° к горизонту. Двигатель чаще всего рассматривают как абсолютно твердое тело, и расчет строительных конструкций производят по эмпирическим формулам.

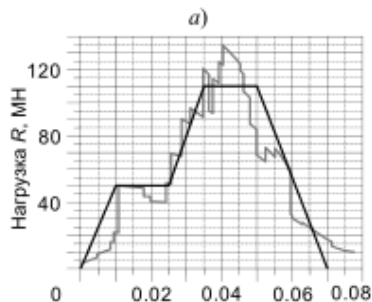


Рисунок 2. – Нагрузки при ударе истребителя-бомбардировщика Phantom RF-4E

В 1988 г. в Sandia National Laboratories (США) был проведен натурный эксперимент, в процессе которого произведен удар самолета Phantom RF-4E со скоростью 215 м/с в массивную железобетонную плиту толщиной 3,66 м . Эксперимент показал, что при условиях его проведения (соотношение масс самолета и преграды 1:25, малые потери энергии в опорах преграды) 94 % кинетической энергии самолета было затрачено на его собственное разрушение, и только оставшиеся 6 % – на разрушение преграды.

Нагрузка по нормам России. На рис. 3 приведена нагрузка на строительные конструкции и площадь пятна удара по нормам России. Считается, что они создаются ударом военного самолета с массой 20 000 кг и скоростью 200 м/с. Угол падения самолета – от 0 до 45° к горизонту. Направление удара следует принимать наиболее опасным для конструкции. Данная нагрузка пропорциональна нагрузке при ударе самолета Phantom RF-4E. Удар двигателя, а также возгорание и/или взрыв авиационного топлива нормами не оговорены. На практике их обычно учитывают так же, как для самолета Phantom RF-4E.

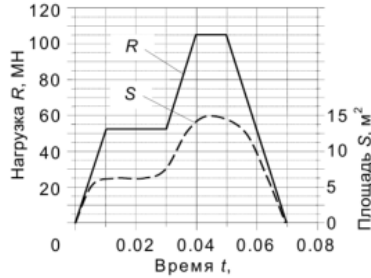


Рисунок 3. – Нагрузка при ударе самолета по нормам России

Самолеты коммерческой авиации. **Boeing 707-320** – дальнемагистральный пассажирский самолет, вмещающий около 190 пассажиров и членов экипажа. Его размеры: размах крыла 44,42 м, длина 44,61 м, высота 12,75 м. Самолет имеет четыре турбореактивных двигателя. Учет нагрузки от его удара предусмотрен также рекомендациями МАГАТЭ [4]. В них предполагается падение самолета этого типа с массой 200 000 кг и скоростью 100 м/с. Нагрузка и площадь пятна удара показана на рис. 4,а, коэффициент динамичности – на рис. 4,б. Как и выше, расчет производится по огибающей коэффициента динамичности (пунктир).

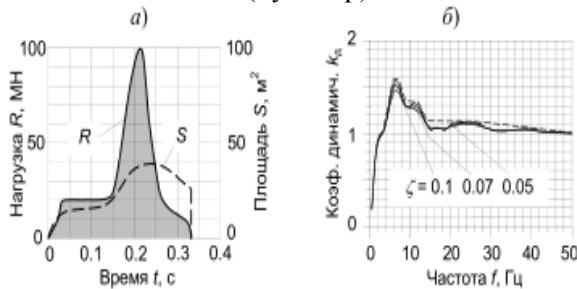


Рисунок 4. – Нагрузка при ударе самолета Boeing 707-320 со скоростью 100 м/с

Грузопассажирские самолеты. **АН-26.** Грузопассажирский турбовинтовой самолет АН-26 предназначен для взлета и посадки на природные аэродромы. Поэтому он имеет небольшую посадочную скорость – 220 км/ч. Максимальная скорость самолета у поверхности земли составляет 430 км/ч. Масса самолета – 24000 кг. На рис. 5 показана площадь пятна удара.

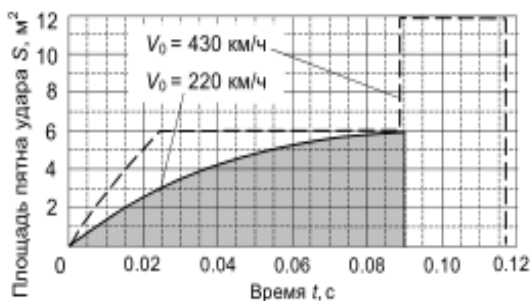


Рисунок 5. – Площадь пятна удара самолета АН-26

Все виды рассматриваемых самолётов сводим в табл. 1.

Таблица 1. – Типы самолетов и характеристика их нагрузок

Вид авиации	Наименование самолета	Площадь пятна удара, м ²	Сосредоточенная нагрузка, МН	Распределенная нагрузка, т/м ²	Угол падения, град.	k_d	Примечания
Общего назначения	Lear Jet-23	12	12	100	0...80	1,1...1,3	Нормы Франции и Рекомендации МАГАТЭ
Военная	Phantom RF-4E	7	110	1571	0...45	1,1...1,6	Нормы Германии и Рекомендации МАГАТЭ
Коммерческая	АН-26	6	18	300	10...45	1,1...1,8	-
	Boeing 707-320	40	100	250	0...10	1,1...1,6	Рекомендации МАГАТЭ

Из табл. 1 видно, что рассматриваемый нами ранее самолёт **Lear Jet-23** не является наиболее опасным представителем этого класса. В качестве представителя военной авиации был рассмотрен **Phantom RF-4E**. Нагрузка при его падении с учётом $k_d = 1$ составляет 1571 т/м². Расчёты показали, что внешняя защитная оболочка не способна выдержать попадание такого. При рассмотрении самолётов коммерческой авиации было установлено, что внешняя защитная оболочка реакторного отделения БелАЭС способна выдер-

жать попадание самолёта **АН-26** при $k_d = 1,8$ (нагрузка составила 540 т/ м^2). При рассмотрении эталонного по Рекомендациям МАГАТЭ самолёта **Boeing 707-320**, наблюдается разрушение внешней защитной оболочки при нагрузке 275 т/ м^2 ($k_d = 1,1$).

Таким образом, установлено, что внешняя защитная оболочка реакторного отделения Белорусской АЭС способна без разрушения выдержать попадание легкомоторных самолётов авиации общего назначения, а также грузопассажирского самолёта **АН-26** коммерческой авиации массой 24 т. Однако она абсолютно не эффективна перед ударами самолётов военной авиации, а также самолётами коммерческой авиации международных авиалиний.

При необходимости, можно улучшить прочностные показатели защитной оболочки путём её усиления углеволокном. В результате его применения увеличивается сопротивление ударным и динамическим нагрузкам, восстанавливается несущая способность сооружений при усталости элементов конструкции, наличии трещин, прогибов, коррозии арматуры.

Литература

1. Защитные оболочки атомных электростанций: учеб. пособие / В. А. Соколов – Санкт-Петербург: 2003. – 106 с.
2. Бирбраер, А. Н. Экстремальные воздействия на сооружения / А. Н. Бирбраер, А. Ю. Роледер. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 594 с.
3. Правила проектирования и строительства строительных конструкций ядерного острова с реактором типа REP (с водой под давлением) : RCC-G / Электрисите де Франс. – Июль 1988.
4. 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.
5. Richtlinie für den Schutz von Kernkraftwerken gegen Druckwellen aus chemischen Reaktionen durch Auslegung der Kernkraftwerke hinsichtlich ihrer Festigkeit // Bundesanzeiger. No. 179. Bonn (22.9.1976). S. 1–3.
6. Drittler K., Gruner P. The Force Resulting from Impact of Fast-Flying Military Aircraft upon a Rigid Wall // Nucl. Engng. and Des. 1976. Vol. 37. P. 245–248.