

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ ПРОБИВАНИЕ СИСТЕМЫ ПРЕГРАД САМОЛЕТОМ

Одним из особых воздействий, которые учитываются при проектировании строительных конструкций АЭС, является падение самолета или его обломков. Учет этого воздействия предусматривается как отечественными нормами, так и рекомендациями МАГАТЭ. Кроме того, после самолетных атак на Нью-Йорк 11 сентября 2001 года появилась тенденция учитывать возможность террористических актов с использованием самолета.

При ударе самолета в здание АЭС возникают чрезвычайно большие нагрузки, для восприятия которых может потребоваться значительное усиление строительных конструкций и оборудования станции, приводящее к ее заметному удорожанию. Кроме того, конструкции многих существующих АЭС в свое время не рассчитывались на это воздействие. В тех случаях, когда по тем или иным причинам усиление внешних строительных конструкций для полной защиты от удара самолета затруднительно, возможен следующий подход.

Как правило, «ответственные» элементы АЭС, потенциально опасные с точки зрения распространения радиоактивности, расположены в глубине здания и защищены несколькими внешними стенами или перекрытиями. В этом случае учет энергии, затрачиваемой самолетом на последовательное пробивание внешних, «неответственных» конструкций, позволит уменьшить нагрузку на «ответственную» конструкцию в момент достижения ее самолетом. Это поможет обосновать безопасность уже существующих АЭС, не рассчитанных на удар самолета, и снизить затраты материалов для вновь строящихся АЭС.

Для решения этой задачи необходимо рассчитать совместное движение самолета и упругопластической преграды. Соответствующая система дифференциальных уравнений при ударе по нормали в вертикальную преграду была получена в [1]. Там, согласно [2], самолет схематизирован как жесткопластический стержень с зависящей от длины прочностью $P(\xi)$ и погонной массой $\mu(\xi)$, его собственный вес не принимался во внимание. После преобразования уравнений с учетом веса самолета и угла наклона преграды α они приобретают вид:

$$\ddot{x}_k = \frac{1}{m_k + m_1(\xi)} \left[-k_k x_k + P(\xi) + \dot{\xi}^2 \mu(\xi) + g m_1(\xi) \sin \alpha \right]; \quad (1)$$

$$\ddot{\xi} = \frac{1}{m_k + m_1(\xi)} \left[k_k x_k - \dot{\xi}^2 \mu(\xi) - \frac{(m_k + m_c)}{m_2(\xi)} P(\xi) + g m_k \sin \alpha \right]. \quad (2)$$

где x_k и ξ – соответственно перемещение конструкции и длина смятой части самолета; m_k и $m_1(\xi)$ – соответственно масса конструкции и разрушенной части самолета; $m_2(\xi)$ – масса не разрушенной части самолета; k_k – жесткость преграды.

Динамические характеристики конструкции в упругой стадии можно получить, сведя ее методом Бубнова-Галеркина к эквивалентному линейному осциллятору. Эквивалентные жесткость и масса осциллятора в упругой стадии равны:

$$k_3 = \iint_{(S)} w_{ст}(x, y) f_2(x, y) dx dy; \quad (3)$$

$$m_3 = \mu \iint_{(S)} w_{ст}^2(x, y) dx dy, \quad (4)$$

где $w_{ст}(x, y)$ – прогиб конструкции при статическом приложении нагрузки. Для конкретной конструкции он может быть найден численно с помощью МКЭ. Предельный момент упругой стадии и предельный упругий прогиб конструкции находятся в соответствии с нормами [4,5].

Для учета неупругой стадии работы плоской конструкции (железобетонной плиты) принята схема разрушения с образованием системы шарниров пластичности, предложенная в [3]: центрального в виде окружности и бесчисленного количества радиальных шарниров. Критерии перехода конструкции из упругой в неупругую стадию приняты в соответствии с нормами [4]. Эквивалентная масса конструкции и сила неупругого сопротивления в неупругой стадии равны:

$$M_3 = \frac{\pi \mu R^2}{6}, \quad (5)$$

$$R_k = 2\pi(M'_{пл} + M''_{пл}), \quad (6)$$

где $M'_{пл}$ и $M''_{пл}$ – моменты в пластическом шарнире, когда растянутая зона сечения находится у наружной и внутренней граней. Критерием разрушения конструкции является достижение ею предельного неупругого перемещения, которое в соответствии с [3, 4] равно:

$$x_{lim}^{неупр} = \psi_{инп} R_{ш}. \quad (7)$$

Решение системы дифференциальных уравнений (1)-(2) может выполняться любым численным методом (например, Рунге-Кутта). Алгоритм расчета последовательного пробивания самолетом системы из нескольких преград является следующим:

1. С помощью конечно-элементной модели конструкции определяются эквивалентные динамические параметры (3) и (4) для первой преграды.
2. Определяется предельный упругий прогиб конструкции по [4, 5].
3. Выполняется численное решение системы уравнений (1) и (2), сначала в упругой, а потом в неупругой стадии деформации конструкции. При этом контролируется перемещение конструкции и скорость самолета. Возможны следующие варианты:
 - а) скорость самолета обратилась в ноль, либо длина его смятой части стала равной

длине всего самолета прежде, чем конструкция достигла предельного неупругого перемещения; в этом случае конструкция не пробита самолетом;

б) конструкция достигла предельного неупругого перемещения, но скорость самолета не равна нулю; в этом случае конструкция пробита самолетом.

4. В случае 3,б процедура повторяется для следующей преграды. При этом учитывается, во-первых, что самолет частично разрушен, и, во-вторых, что его скорость в момент удара равна ее величине в момент разрушения первой стены.

Задачей расчета является подбор минимальных параметров «неответственных» конструкций, достаточных, чтобы взаимодействие самолета с последней, «ответственной» преградой завершилось бы в ее упругой стадии (отсутствие остаточных деформаций, закрытие трещин после снятия нагрузки). Описанная процедура может быть применена для расчета прочности при ударе не только самолета, но и других летящих тел (например, падении строительных конструкций или грузов при транспортировке).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Бирбраер А.Н., Шульман С.Г. Прочность и надежность конструкций АЭС при особых динамических воздействиях. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
2. Riera J.D. Nuclear Engineering and Design, 1968, v. 8, p. 415-426.
3. Ржаницын А.Р. Предельное равновесие пластинок и оболочек. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. – 288 с.
4. СНиП II-II-77*. Защитные сооружения гражданской обороны / Госстрой СССР. М.: 1985
5. СП 52-101-2003 Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры / Госстрой России. М.: 2004.