

ПРОБИВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ РАЗРУШАЮЩИМСЯ ЛЕТАЮЩИМ ТЕЛОМ

А.Н. БИРБРАЕР, *к.т.н., доцент,*

И.А. ВОЛКОДАВ

ОАО «Атомэнергоспроект», Санкт-Петербург

Учет летящих тел для АЭС предусмотрен нормами [1]. Такие тела образуются при многих природных и техногенных катастрофах: падение самолета; летящие тела при ураганах или торнадо; обрушение строительных конструкций; падение грузов; разлет осколков при взрывах, аварийном разрушении высокоэнергетического оборудования, и т.п. 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, например, сминаемый фюзеляж самолета, увлекаемые ветром торнадо деревянные брусья, столбы, кузов автомобиля и пр. В настоящей статье рассмотрены методы расчета конструкций на удары разрушающихся тел.

Удар по нормали к наклонной податливой преграде

Излагаемая ниже методика применима при ударе тел любой природы, но для определенности будет говориться об ударе самолета. Это обусловлено также тем, что впервые подобная задача была решена Риерой именно применительно к удару самолета [2]. Он рассматривал удар по нормали к вертикальной недеформируемой преграде; самолет схематизировался как жесткопластический стержень с прочностью $P(\xi)$ и погонной массой $\mu(\xi)$, зависящими от длины ξ . Система дифференциальных уравнений для случая удара по нормали к вертикальной деформируемой преграде имеется в [3], а для преграды, наклоненной на угол α , – в [7].

Сведем конструкцию к эквивалентному линейному осциллятору (рис. 1). При упругих деформациях это можно сделать методом Бубнова-Галеркина [3]. Пусть конструкция представляет собой плиту площадью S с массой единицы площади μ , а динамическая нагрузка равномерно распределена по «пятну удара» S_1 , тогда дифференциальное уравнение вынужденных колебаний имеет вид

$$T + \omega_y^2 T = \omega_y^2 f_1(t), \quad (1)$$

где ω_y – эквивалентная круговая частота:

$$\omega_y^2 = \frac{\frac{1}{S_1} \iint_{(S_1)} w_{\text{н0}}(x,y) dx dy}{\mu \iint_{(S)} w_{\text{н0}}^2(x,y) dx dy}; \quad (2)$$

$w_{\text{ст}}(x,y)$ – перемещения при статическом приложении нагрузки. Подчеркнем, что частота ω_y не является собственной частотой системы, так как зависит от формы и положения «пятна удара», т.е. от нагрузки на пластинку.

С помощью (2) можно определить массу m_3 и жесткость k_3 эквивалентного осциллятора. Числитель в правой части (2) *численно* равен среднему перемеще-

нию w_{cp} пластинки в пятне удара при нагрузке 1 Н. Если принять его за перемещение эквивалентного осциллятора с жесткостью k_3 , то

$$k_{\dot{y}} = 1/w_{п0} . \quad (3)$$

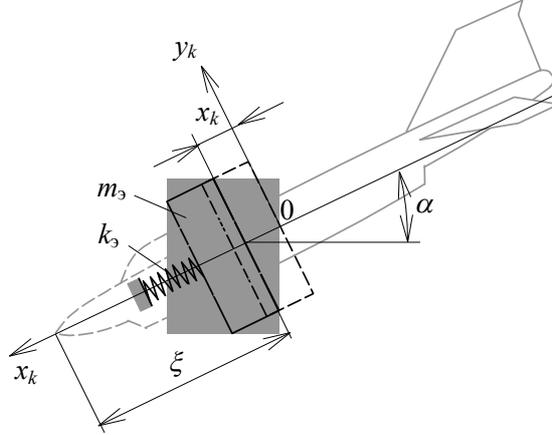


Рис. 1. Замена конструкции системой с одной степенью свободы
Эквивалентная масса осциллятора равна

$$m_{\dot{y}} = \omega_{\dot{y}}^2 / k_{\dot{y}} . \quad (4)$$

В работе [8] параметры осциллятора были вычислены для шарнирно опертой по контуру плиты с постоянной жесткостью, когда функция $w_{ст}(x,y)$ выражается аналитически. Предложенный выше способ позволяет определить их для плиты с произвольной жесткостью, массой и любыми граничными условиями, а также для иных конструкций. Для этого надо найти перемещения $w_{ст}(x,y)$ по методу конечных элементов, а затем вычислить интегралы по какой-либо квадратурной формуле. Отметим, что числитель дроби в (2) – это удвоенная работа нагрузки 1 Н, равномерно распределенной по площади пятна удара S_1 , т.е. удвоенная потенциальная энергия пластинки. Некоторые вычислительные программы (например, широко распространенная программа «SCAD Office» [4]) непосредственно выдают значение этой работы.

Заметим также, что знаменатель дроби в (2) – это удвоенная кинетическая энергия плиты. Поэтому (2) можно также трактовать как определение частоты по методу Релея.

Приведем (для краткости – без вывода) уравнения для случая, когда податливая преграда наклонена на угол α (рис. 2) [7]. Одновременное перемещение преграды и смятие тела рассматриваются в неподвижной системе координат xOy с началом в точке удара (ось Ox совпадает с нормалью к конструкции). Конструкция приближенно заменяется эквивалентным линейным осциллятором с массой m_3 и жесткостью k_3 .

Система дифференциальных уравнений движения тела и преграды:

$$\begin{cases} \ddot{x}_k = \frac{1}{m_{\dot{y}} + m_1(\xi)} \left[-k_{\dot{y}} x_k + P(\xi) + \xi^2 \mu(\xi) + g m_1(\xi) \sin \alpha \right] \\ \ddot{\xi} = \frac{1}{m_{\dot{y}} + m_1(\xi)} \left[k_{\dot{y}} x_k - \xi^2 \mu(\xi) - \frac{m_{\dot{y}} + m_c}{m_c - m_1(\xi)} P(\xi) + g m_1(\xi) \sin \alpha \right] . \end{cases} \quad (5)$$

где x_k и ξ – соответственно перемещение конструкции и длина смятой части тела; m_c – масса самолета; $m_1(\xi)$ – масса его разрушенной части. Наклон преграды отражается последними членами в квадратных скобках. При $\alpha = 0$ (вертикальная преграда) данные уравнения совпадают с уравнениями в [3].

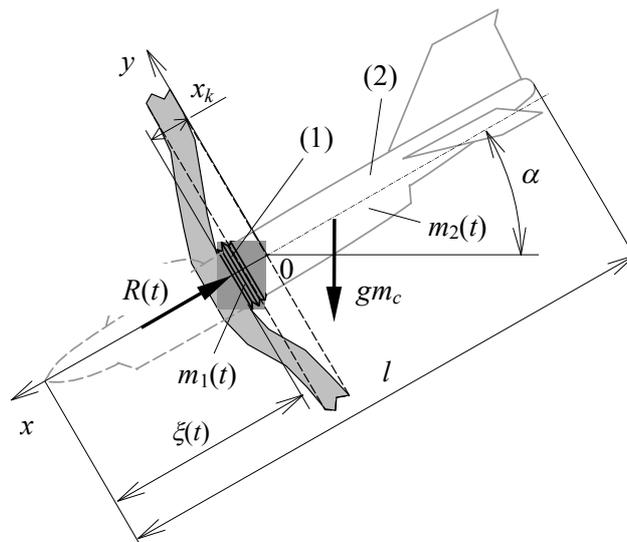


Рис. 2. Удар тела в наклонную деформируемую конструкцию

Нагрузка на преграду равна

$$R(t) = -x_k m_1(\xi) + P(\xi) + \xi^2 \mu(\xi) + g m_1(\xi) \sin \alpha . \quad (6)$$

Она отличается от нагрузки на недеформируемую преграду [2] первым слагаемым в правой части – силой инерции за счет перемещений точки удара.

Уравнения (5) соответствуют линейно упругой конструкции. Если она нелинейная (в частности – упругопластическая), то в квадратных скобках правых частей уравнений вместо произведения $k_{\xi} x_k$ должен стоять сила сопротивления преграды $R_{k\xi}(x_k)$. Ее можно определить, используя схему разрушения с образованием шарниров пластичности для защемленной по контуру плиты при сосредоточенной нагрузке [6]. Она представляет собой круговой шарнир пластичности, касающийся ближайшей опорной грани плиты и разбитый на бесчисленное количество радиальных шарниров. Критерий перехода конструкции из упругой стадии в неупругую (предельный момент в упругой стадии M_d) принят по нормам [5]. При такой схеме эквивалентная масса конструкции и сила неупругого сопротивления равны:

$$M_y = \frac{\pi \mu_0 r_0^2}{6} ; \quad R_{\xi} = 2\pi (M'_{\text{ш}} + M''_{\text{ш}}) , \quad (7)$$

где μ_0 – масса единицы площади конструкции, $r_{\text{ш}}$ – радиус кругового шарнира пластичности, $M'_{\text{ш}}$ и $M''_{\text{ш}}$ – моменты в пластических шарнирах, когда растянутая зона сечения находится у наружной и внутренней граней.

Решение системы уравнений (5) может быть выполнено любым численным методом (например, Рунге-Кутты). Критерием разрушения конструкции является достижение предельного угла поворота в шарнире пластичности, которое задано в [5].

Пример расчета прочности системы железобетонных стен

В качестве примера использования полученных уравнений приведем расчет стен здания на рис. 3 на удар самолета малой гражданской авиации «Lear Jet 23», часто рассматриваемый как типовой при проектировании АЭС. Нагрузка при ударе и ее коэффициент динамичности приведены на рис. 4.

Особенность здания состоит в том, что внутри него находятся «ответственные» помещения с радиоактивными материалами (их стены и перекрытия на

рисунке затенены), которые по условиям радиационной безопасности должны оставаться в пределах упругости. Снаружи они окружены «неответственными» строительными конструкциями, разрушение которых самолетом допускается.

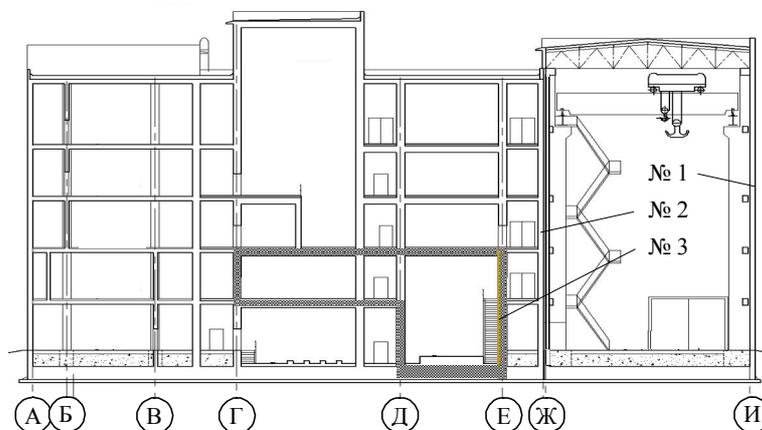


Рис. 3. Расположение опасных помещений внутри здания

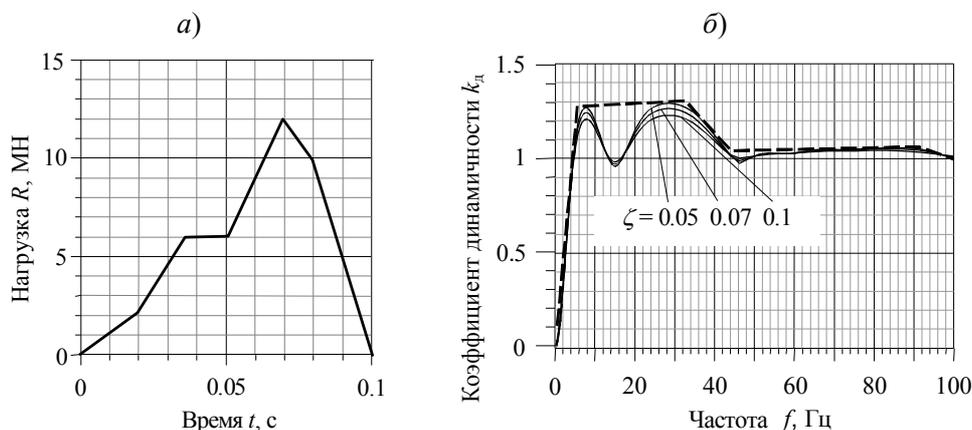


Рис. 4. Нагрузка при ударе самолета «Lear Jet-23»

a – нагрузка на строительные конструкции;

б – коэффициент динамичности (ζ – относительное затухание)

Заметим, что проблема защиты расположенных таким образом «ответственных» помещений актуальна не только (и, возможно, даже не столько) для вновь проектируемых АЭС, но и при проверке безопасности уже построенных. Причина в том, что многие из них либо проектировались по старым нормам вообще без учета падения самолета, либо в соответствии с новыми, более строгими требованиями появилась необходимость принять во внимание более опасный самолет. Поэтому при анализе безопасности таких АЭС необходимо мобилизовать все ресурсы прочности строительных конструкций.

Рассмотрим удар самолета со стороны ряда «И». «Ответственная» стена по ряду «Е» (№ 3 на рис. 3), толщина которой по условиям радиационной защиты равна 600 мм, защищена двумя «неответственными» стенами толщиной 300-мм по рядам «И» и «Ж» (№ 1 и № 2). Обеспечить безопасность можно по-разному.

Способ 1: спроектировать стену № 1 так, чтобы самолет не пробил ее. Для этого придется увеличить ее толщину до 600 мм. Здесь возможны 2 варианта:

Первый – стена при ударе сохраняет упругость. В этом случае ее расчет можно выполнить динамическим методом на нагрузку, показанную на рис. 4, *a*, или квазистатическим с использованием коэффициента динамичности на рис. 4, *б*. Требуемое армирование составляет $55 \text{ см}^2/\text{м}$.

Второй вариант – допустить в стене неупругие деформации в соответствии с нормами [5]. Неупругий расчет можно выполнить, задав нагрузку на рис. 4,а, или путем расчета одновременного движения преграды и разрушения самолета по уравнениям (5). В этом случае потребуется армирование стены $19 \text{ см}^2/\text{м}$, т.е. почти втрое меньше.

Способ 2: допустить последовательное пробивание самолетом стен № 1 и № 2, за счет чего погасить его энергию настолько, чтобы стена № 3 при ударе осталась упругой. Одновременное разрушение самолета и движения ударяемой стены рассчитано по уравнениям (5). При ударе самолета в стену № 1 его скорость составляла 100 м/с , а после ее пробивания уменьшилась до 73 м/с ; при этом разрушились передние 4.15 м фюзеляжа. После пробивания стены № 2 скорость уменьшилась до 41.5 м/с , разрушены 4.22 м фюзеляжа. При ударе в стену № 3 разрушается еще 3.30 м фюзеляжа, но сама конструкция при этом остается в пределах упругости, т.е. радиационная безопасность не нарушена.

Расчет по способу 2 показал, *толщины стен № 1 и 2 увеличивать не требуется*. Армирование всех трех стен составляет по $15,7 \text{ см}^2/\text{м}$.

Заключение

Описанная методика расчета совместного движения конструкции и ударяющего в нее тела, разрушающегося при ударе, может быть применена для расчетов сооружений АЭС, гражданской обороны и др. для защиты от ударов малопрочных тел с большой кинетической энергией. К ним, в частности, относятся падающий самолет, летящие тела при торнадо, обрушающиеся строительные конструкции и пр. Методика позволяет учесть затраты кинетической энергии тела на собственное разрушение и деформацию конструкции.

Л и т е р а т у р а

1. НП-064-05. Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии. Ростехнадзор РФ. М. – 2006.
2. *Riera J.D.* On the Stress Analysis of Structures Subjected to Aircraft Impact Forces // Nuclear Engineering and Design, 1968, v. 8, p. 415-426.
3. *Бирбраер А.Н., Шульман С.Г.* Прочность и надежность конструкций АЭС при особых динамических воздействиях. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
4. SCAD Office. Вычислительный комплекс SCAD. – М.: «АСВ», 2006.
5. СНиП II-11-77*. Защитные сооружения гражданской обороны / Госстрой СССР. М.: 1985.
6. *Ржаницын А.Р.* Предельное равновесие пластинок и оболочек. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983.
7. *Бирбраер А.Н., Волкодав И.А.* Нагрузки на строительные конструкции при ударах разрушающихся летящих тел // Сейсмостойкое строительство и безопасность сооружений, № 2, 2008.
8. *Буторин С.Л., Шульман Г.С., Шульман С.Г.* Методы анализа безопасности АЭС при авиакатастрофах. – М.: Энергоатомиздат, 2006.

PERFORATION OF BUILDING STRUCTURES BY CRASHING MISSILE

Birbraer A.N., Volkodav I.A.

Analysis of joint motion of building structure and crashing missile impacting it is described. The missiles of this kind may be generated by various natural and man induced events. Equations of motion are derived. Example of their application to the problem of successive perforation of several walls by crushing missile is given. It demonstrates that the methodology permits to take into account more accurately distribution of the missile kinetic energy between itself crashing and impacted building structure deformation. The methodology described may be used for safety analysis of nuclear power plants, civil defense and so on structures subjected to destructible large kinetic energy missiles impacts.