

## ВОЗДЕЙСТВИЕ ИМПУЛЬСНЫХ НАГРУЗОК НА ОБОЛОЧЕЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ГТД

*Ю.С. Воробьев, д-р техн. наук,*

*М.В. Чернобрышко, канд. техн. наук,*

*Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного, г. Харьков, Украина;*

*Л. Крушка, д-р фил.,*

*Военно-техническая академия, Варшава, Польша*

Элементы газотурбинных двигателей подвергаются воздействию импульсных нагрузок, интенсивность которых растёт с увеличением единичной и удельной мощности ГТД и скоростей движения транспортных средств. Известна актуальность изучения воздействия таких нагрузок на вентиляторные лопатки и лопаточный аппарат компрессоров авиационных двигателей [1, 2]. Однако элементы корпусов, роторов барабанного типа и входных устройств ГТД также могут подвергаться импульсным нагрузкам. Источником таких нагрузок являются твердые частицы, засасываемые в двигатель. Наиболее интенсивные нагрузки возникают при ударе частей лопаток и межлопаточных связей при их обрыве. При этом воздействие испытывают как элементы корпуса, так и ротора.

Скоростная деформация элементов ГТД при таких воздействиях может проходить как в упругой, так и в упругопластической стадиях [3 - 5]. Для моделирования элементов корпуса могут быть использованы зависимости для цилиндрических и конических оболочек [6 - 8]. Чтобы обеспечить возможность учета волновых процессов целесообразно использовать теорию оболочек типа Тимошенко. В зоне вентиляторных лопаток и лопаток первых ступеней компрессоров корпус часто укрепляется за счет композитных элементов. Поэтому целесообразно рассмотреть анизотропные модели оболочек [7]. Элемент корпуса ГТД рассматривается как часть цилиндрической оболочки. Система координат  $xuz$  связана со срединной поверхностью элемента оболочки. Оси  $x$  и  $u$  совпадают с главными осями анизотропии и направлены по

главным кривизнам оболочки. Ось  $z$  перпендикулярна к срединной поверхности и направлена внутрь оболочки.

Вектор перемещений  $U(u, v, w, \psi_x, \psi_y)$  имеет своими компонентами перемещения в направлении осей  $x, u, z$  и углы поворота нормали к срединной поверхности оболочки относительно осей  $x$  и  $u$ . Далее используются следующие обозначения:

$h$  – толщина оболочки,

$\rho$  – плотность материала,

$E_x, E_y$  – модули упругости анизотропного материала при растяжении,

$G_{xy}, G_{xz}, G_{yz}$  – при сдвиге,

$\nu_{xy}, \nu_{yz}$  – коэффициенты Пуассона,

$$D_x^0 = \frac{E_x h}{1 - \nu_{xy} \nu_{yx}};$$

$$D_y^0 = \frac{E_y h}{1 - \nu_{xy} \nu_{yx}} \text{ - продольные,}$$

$$D_{xy}^0 = G_{xy} h; \quad D_{xz}^0 = G_{xz} h;$$

$D_{yz}^0 = G_{yz} h$  – сдвиговые жесткости оболочки в направлении главных осей анизотропии,

$D_x = D_x^0 h^2 / 12; \quad D_y = D_y^0 h^2 / 12; \quad J = h^3 / 12$  – моменты инерции нормального к срединной поверхности элемента.

Уравнения динамики ортотропной круговой цилиндрической оболочки в волновом приближении Тимошенко могут быть представлены в матричном виде [7]:

$$\begin{aligned}
& A \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + B \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + C \frac{\partial^2 U}{\partial xy} + \\
& + a \frac{\partial U}{\partial x} + b \frac{\partial U}{\partial y} + cU = \dots \quad (1) \\
& = P + M \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}
\end{aligned}$$

Матрицы А и В имеют отличными от нуля только диагональные элементы:

$$\begin{aligned}
A_{11} &= D_x^0, A_{22} = D_{xy}^0, A_{33} = D_{xz}^0, \\
A_{44} &= D_x, A_{55} = D_{xy}; \\
B_{11} &= D_{xy}^0, B_{22} = D_y^0, B_{33} = D_{yz}^0, \\
B_{44} &= D_{xy}, B_{55} = D_y.
\end{aligned}$$

В остальных матрицах С, а, b и с отличны от нуля только такие элементы:

$$\begin{aligned}
C_{12} &= D_x^0 v_{yx} + D_{xy}^0, C_{21} = D_y^0 v_{xy} + D_{xy}^0, \\
C_{45} &= D_x v_{yx} + D_z, C_{54} = D_y v_{xy} + D_z; \\
a_{13} &= -\frac{D_x^0 v_{yx}}{R}, a_{31} = \frac{D_y^0 v_{xy}}{R}, a_{32} = \frac{D_y^0}{R}, \\
a_{34} &= D_{xz}^0, a_{43} = -D_{xy}^0; \\
b_{23} &= -\frac{D_y^0}{R}, b_{35} = D_{yz}^0, b_{53} = -D_{yz}^0; \\
c_{33} &= -\frac{D_y^0}{R}, c_{44} = -D_{xz}^0, c_{55} = -D_{yz}^0;
\end{aligned}$$

$P$  – вектор-столбец нагрузок с компонентами  $(P_x, P_y, P_z)$ .

В матрице масс  $M$  отличными от нуля являются только диагональные члены:

$$m_{11} = m_{22} = m_{33} = \rho; m_{44} = m_{55} = \rho J.$$

Из уравнения (1) могут быть получены и уравнения изотропной оболочки.

Локальная импульсная нагрузка представляется как нагрузка, распределенная по прямоугольной площадке со сторонами  $x_0, y_0$  или по круговой площадке радиусом  $r_0$ . Изменение нагрузок во времени может быть представлено с помощью экспоненциального или синусоидального законов [3, 7]

$$\begin{aligned}
P &= P_0 e^{-t/t_1}, \\
P &= P_0 \sin \frac{\pi t}{t_1} [\text{sign}(t_1 - t) + 1] \quad (2)
\end{aligned}$$

или с помощью функции Хэвисайда

$$P = P_0 [H(t) - H(t_1 - t)]. \quad (3)$$

Здесь  $t_1$  – время окончания действия нагрузки. Выбор закона нагружения зависит от конкретного процесса и метода численной реализации задачи.

Для интегрирования уравнений (1) используется явная разностная схема метода сеток [3, 7]. Размеры сеточной области с шагами  $\Delta x, \Delta y$  выбираются такими, чтобы отраженные волны не успевали приходиться в исследуемую точку до момента анализа в ней поведения оболочки. По толщине оболочки в зависимости от решаемой задачи берется от одного до трех слоев. Перемещения и углы поворотов определяются в узлах сетки, а силы, моменты, деформации и напряжения – в центре образованных сеткой элементов [3, 7]. Члены уравнения (1) с недифференцируемыми переменными приводятся к узлам путем осреднения соответствующих значений. Шаг по времени  $\Delta t$  определяется скоростью распространения упругих волн и размеров шагов по координатам  $\Delta x, \Delta y$  [7]. В процессе вычислений проверяется сходимость и устойчивость разностной схемы и ведется контроль за выполнением разностного аналога закона сохранения энергии. Сила  $P(t)$  задается с помощью одной из зависимостей (2) или (3) или определяется в процессе расчета.

При контактном ударе перемещение  $W_m$  тела ударника массой  $m$ , имеющего в момент начала контакта скорость  $V_0$ , будет [9]:

$$\begin{aligned}
W_m(t) &= V_0 t - \frac{1}{m} \int_0^t \int_0^t P(t) dt = \\
&= \alpha(P) + w(x_0, y_0, z_0, t), \quad (4)
\end{aligned}$$

где  $\alpha(P)$  принимает закон проникновения тела в оболочку,

$w(x_0, y_0, z_0, t)$  – перемещение оболочки в месте контакта с телом.

Предполагается, что на каждом интервале времени  $\Delta t$  сила  $P(t)$  изменяется по линейному закону. В начальный момент  $P(0) = 0$  [9].

На каждом шаге при вычислении компонент тензора напряжений проверяется выполнение условий текучести Мизеса с учетом динамического предела текучести [3]:

$$\sigma_T^d = \sigma_T^{ct} \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\varepsilon}_i}{D} \right)^{\frac{1}{n}} \right], \quad (5)$$

где  $\dot{\varepsilon}_i$  – скорость интенсивности деформаций,

$\sigma_T^{ct}$  – статический предел текучести,

$D, n$  – параметры динамического упрочнения материалов, определяемые экспериментально.

При значениях интенсивностей напряжений  $\sigma_i < \sigma_T^d$  скоростная деформация происходит в упругой области, при  $\sigma_i \geq \sigma_T^d$  – в пластической области, где используются зависимости

$$\sigma_i = 3G\varepsilon_i [1 - \omega(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i)], \quad (6)$$

где  $G$  – модуль упругости при сдвиге,

$\varepsilon_i$  – интенсивность деформаций,

$\omega(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i)$  – функция упрочнения [3]:

$$\omega(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i) = \lambda \left\{ 1 - \frac{\varepsilon_T^{ct}}{\varepsilon_i} \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\varepsilon}_i}{D} \right)^{\frac{1}{n}} \right] \right\}, \quad (7)$$

где  $\varepsilon_T^{ct}$  – деформация, соответствующая статическому пределу текучести,

$$\lambda = 1 - E_1 / E,$$

$E$  – модуль упругости,

$E_1$  – модуль упрочнения [3].

При расчете деформирования оболочки в пластической стадии проводится проверка разрушения материала. При этом может использоваться энергетический критерий или критерий Г.С. Писаренко–А.А. Лебедева [5]:

$$\chi \sigma_i + (1 - \chi) \sigma_1 \leq \sigma_c^+, \quad (8)$$

где  $\sigma_1$  – максимальное нормальное напряжение

$$\chi = \sigma_b^+ / \sigma_b^-;$$

$\sigma_b^+, \sigma_b^-$  – пределы сопротивления при растяжении и сжатии.

Расчеты показывают, что при локальном импульсном воздействии смещения оболочки, соизмеримые с ее толщиной, происходят в ограниченной области и резко падают за ее пределами. Если не учитывается физическая нелинейность, описываемая выражениями (5) – (7), область больших смещений расширяется в 1,5 раза, а сами смещения и деформации оказываются заниженными.

Характер изменения интенсивностей деформаций в зависимости от расстояния до центра области нагружения для различных моментов времени показан на рис. 1, а в зависимости от времени – на рис. 2. Импульсная нагрузка приложена на круговой площадке радиусом  $r_0$  ( $r_0/h=7$ ). Результаты расчетов нашли экспериментальное подтверждение [3]. Исследования показали, что при воздействии на тонкостенные элементы конструкций локальных импульсных нагрузок необходимо использование теории оболочек типа Тимошенко не только для учета волновых процессов, но и в связи тем, что основные деформации происходят в весьма ограниченной области. В этой области деформированная срединная поверхность оболочки имеет большие локальные кривизны. Вне этой области деформации быстро уменьшаются, и исследование их не имеет особого смысла. В то же время в области развития больших деформаций, где учитываются зависимости (4) – (7), необходимо использовать, по крайней мере, теории оболочек типа Тимошенко и подробные сеточные схемы даже при малых соотношениях  $h/R$  ( $\approx 0,02$ ). В ограниченных зонах, где согласно критериям прочности, например (8), происходит разрушение материала, могут использоваться трехмерные модели. На границах этих зон напряженно-деформированное состояние соответствует результатам расчетов на основе теории оболочек типа Тимошенко.

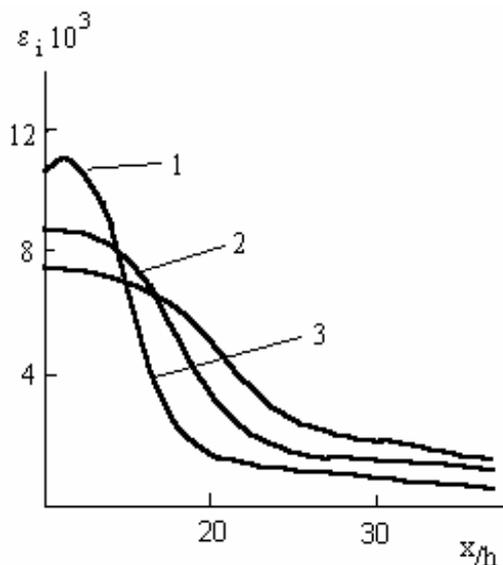


Рис. 1. Изменение интенсивности деформаций вдоль образующей оболочки для моментов времени:

100 мкс – (кривая 1),  
300 мкс – (кривая 2),  
500 мкс – (кривая 3).

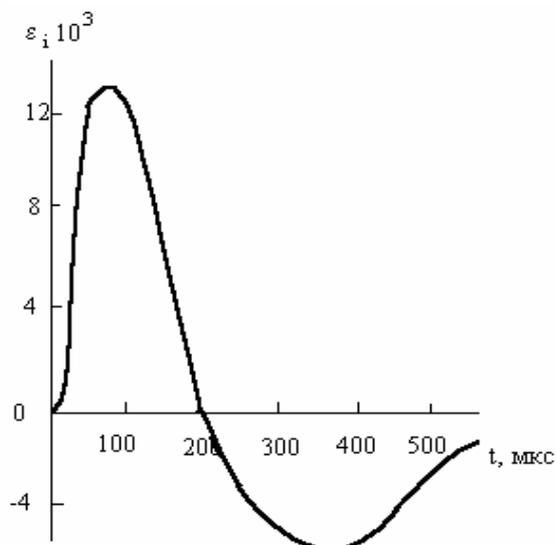


Рис. 2. Изменение интенсивности деформаций во времени в зоне  $x/h \approx 15$ .

Для ортотропной оболочки по сравнению с изотропной максимальные перемещения  $w$  уменьшаются, а интенсивности напряжений  $\sigma_i$  растут. Этот эффект наиболее проявляется при  $E_y = 2E$ ,  $E_x = E$  [7].

Таким образом, использование уравнений оболочки типа Тимошенко и динамических характеристик

материала позволяет провести анализ прочности тонкостенных элементов корпусов ГТД при воздействии импульсных нагрузок.

### Литература

1. Роль импульсных нагрузок для ГТД / Ю.С. Воробьев, А.В. Колодяжный, М.В. Чернобрыков, Л. Крушка // *Авіаційно-космічна техніка і технологія: Зб. наук. праць.*- Харків: ХАІ, 2002.- Вип. №34. Двигуни та енергоустановки.- С. 136-140.

2. Storace A.F., Nimmer R.P., Ravenhall R. Analytical and Experimental Investigation of Bird Impact on Fan and Compressor Blading // *Journal of Aircraft.*-1984.- Vol. 21, № 7.- P. 520 - 527.

3. Скоростное деформирование элементов конструкций / Ю.С. Воробьев, А.В. Колодяжный, В.И. Севрюков, Е.Г. Янютин.- К.: *Наук. думка*, 1989.- 192 с.

4. Степанов Г.В. Упругопластическое деформирование и разрушение материалов при импульсном нагружении.- К.: *Наук. думка*, 1991.- 288 с.

5. Механическое поведение материалов при различных видах нагружения / В.Т. Троценко, А.А. Лебедев, В.А. Стрижало, Г.В. Степанов, В.В. Кривенюк.- К.: *Логос*, 2000.- 571 с.

6. Солоненко В.Р. Поведение цилиндрических оболочек и панелей при локальном динамическом воздействии // *Прикл. механика.*- 1977.- Т. 13, № 1.- С. 76 - 80.

7. Воробьев Ю.С., Детистов С.И. Влияние ортотропии на прочность цилиндрической оболочки при локальном динамическом воздействии // *Проблемы машиностроения.*- 1980.- Вып. 10.- С. 11-17.

8. Воробьев Ю.С. Колебания лопаточного аппарата турбомашин.- К.: *Наук. думка*, 1988.- 224 с.

9. Филиппов А.П. Колебания деформируемых систем.- М.: *Машиностроение*, 1970.- 736 с.

*Поступила в редакцию 30.05.03*

**Рецензенты:** д-р техн. наук, проф. В.А. Лавинский НТУ «ХПИ», г. Харьков; канд. техн. наук М.Б. Милешкин, ИП Маш НАНУ, г. Харьков.