

УДК 681.51:629.735.067.8.03 (043.2)

В.М. Синеглазов, Ю.М. Кеменяш

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПЕРЕГОРОДОК, ДЕМПФИРУЮЩИХ УПРУГИЕ КОЛЕБАНИЯ ЖИДКОСТИ В БАКАХ

*Рассмотрено проектирование оптимальных форм демпфирующих перегородок, расположенных в баках. Показано, что эффективность перегородок может быть увеличена за счет уменьшения веса и изменения формы.*

В последнее время одним из эффективных путей тушения пожаров является использование авиации, что позволяет значительно сократить время и сэкономить средства по их ликвидации. Поскольку не удастся обеспечить абсолютную герметизацию баков, часть воды «сравливаются», что приводит к возникновению колебаний жидкости в неполностью заполненных баках в условиях повышенной турбулентности в зоне пожара. Это создает дополнительные трудности при управлении самолетом (динамическая устойчивость). Поэтому в конструкцию баков вводят демпферы колебаний: ребра, перфорированные диафрагмы, сетки разнообразных форм и размеров. Принцип действия большинства демпферов колебаний жидкости – оказывать значительное сопротивление движению жидкости, что приводит к сильному демпфированию колебаний.

Одной из самых распространенных форм перегородок является плоская демпфирующая перегородка, так как она обеспечивает значительное демпфирование при малых весовых затратах. Увеличение эффективности такой перегородки можно достичь введением перфораций. Другим, заслуживающим внимания, способом является применение упругих перегородок, которые в некоторых случаях создают большую диссипацию энергии и, следовательно, большие коэффициенты демпфирования, чем такие же по форме, но жесткие перегородки. Эти пути не являются единственно возможными.

В процессе проектирования часто вносят изменения в конструкцию бака, что влечет за собой изменения форм и размеров перегородок. Однако достижение удовлетворительного демпфирования сопряжено с увеличением веса конструкции. Исходя из этого возникает необходимость проектирования оптимальных форм, размеров и расположения демпфирующих перегородок при минимальных весовых затратах.

Для решения поставленной задачи в первую очередь необходимо выбрать тип перегородки, а после этого оптимизировать ее размеры и расположение. В работе [1] были рассмотрены радиальные перегородки, расположенные на стенках в цилиндрическом баке (рис. 1).

На основании полученных экспериментальных данных коэффициент сопротивления перегородки имеет вид:

$$c_b = 19,1 \left( \frac{2\pi g_{01}}{b\omega_1} \right)^{\frac{1}{2}} \left( 1 + 0,4e^{\frac{0,238(x-h)}{b}} \right), \quad (1)$$

где  $\vartheta_{01}$  – скорость колебаний жидкости на стенке бака;  $b$  – ширина перегородки.

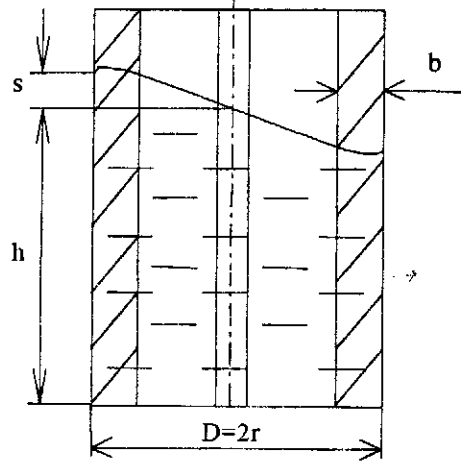


Рис. 1. Радиальная демпфирующая перегородка, расположенная в баке

За скорость  $\vartheta_1$  принимаем тангенциальную составляющую скорости на стенке бака в месте расположения ребра:

$$\vartheta_1 = \frac{\omega_1 s_{01} ch(\xi_1 \frac{x}{r})}{\xi_1 sh(\xi_1 \frac{h}{r})} \cos \theta_i \cos \omega_1 t, \quad (2)$$

где  $\omega_1 = \sqrt{\frac{\xi_1 jth\xi_1 \frac{h}{r}}{r}}$  – частота основного тона колебаний жидкости в цилиндре;  $\theta_i$  – угол между плоскостями перегородок;  $\xi_1 = 1,84$ .

Используя выражения (1) и (2), получаем диссипацию энергии за период

$$\Delta E = \frac{108\rho r \omega_1^2}{15\sqrt{\pi\xi_1 \xi_1^3}} \left(1 + \frac{\xi_1 b}{2,5\xi_1 b + 0,138r}\right) \sum_{i=1}^k |\sin \theta_i|^{\frac{5}{2}} b^{\frac{3}{2}} s_{01}^{\frac{5}{2}}.$$

Форма свободной поверхности для основного тона колебаний жидкости определяется выражением

$$\psi_1 = \frac{J_1(\xi_1 \frac{r}{r})}{J_1(\xi_1)} \sin \theta. \quad (3)$$

Максимальная энергия системы  $E$  определяется как максимальная потенциальная энергия по формуле

$$E = \frac{1}{2} \rho j s_{01}^2 \int_{\Sigma} \psi_n^2 ds. \quad (4)$$

Подставляя выражение (3) в формулу (4), имеем:

$$E = \frac{\pi(\xi_1^2 - 1)\rho jr^2 s_{01}^2}{4\xi_1^2}$$

На основании этого получим полуэмпирическую зависимость для логарифмического декремента

$$\delta = \frac{\Delta E}{2E} = \frac{14,4}{\pi\sqrt{\pi\xi_1(\xi_{11}^2 - 1)}} \left( 1 + \frac{\xi_1 \frac{b}{r}}{0,138 + 2,5\xi_1 \frac{b}{r}} \right) \sum_{i=1}^k |\sin \theta_i|^{\frac{5}{2}} \left( \frac{b}{r} \right)^{\frac{3}{2}} \left( \frac{s_{01}}{r} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Другой формой перегородки, расположенной в баке, является кольцевая (рис. 2).

Аналогично была получена полуэмпирическая зависимость для логарифмического декремента колебаний кольцевидной перегородки:

$$\delta = 48,5e^{-4,6\frac{d}{r}} \left( \frac{b}{r} \right)^{\frac{3}{2}} \left( \frac{s_{01}}{r} \right)^{\frac{1}{2}}$$

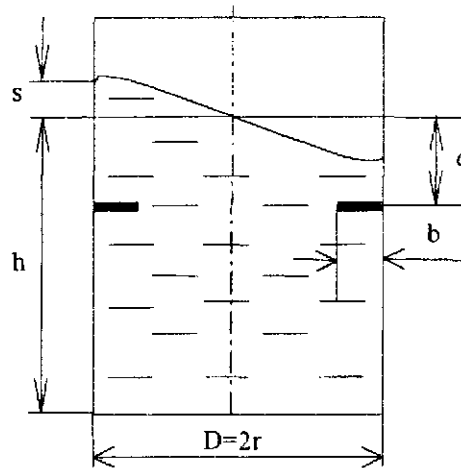


Рис. 2. Кольцевая демпфирующая перегородка, расположенная в баке

Первой удачной попыткой теоретического анализа колебаний жидкости в баке при наличии в нем кольцевидной перегородки можно считать работу [2].

Однако при проектировании форм перегородок возникает задача увеличения эффективности, в частности, придание демпфирующей перегородке такой формы, которая обеспечила бы максимально возможное вихреобразование при минимальных массовых затратах.

В качестве примера применения этой идеи можно привести использование демпфирующей перегородки с продольной щелью [3], т.е. когда в демпфирующей перегородке кольцевого типа делаются по всей плоскости прорезы, расположенные примерно на половине ширины перегородки, которые приводят к возникновению еще одного вида вихрей в жидкости (рис. 3). Назначение щели в данном случае – введение дополнительного источника волнообразования.

В результате эксперимента было обнаружено, что введение щели приводит не только к уменьшению веса перегородки, но и к увеличению демпфирования колебаний жидкости (рис. 4).

Необходимо отметить, что существенного увеличения демпфирования следует ожидать лишь при  $b/W \approx 0,2 \dots 0,25$ .

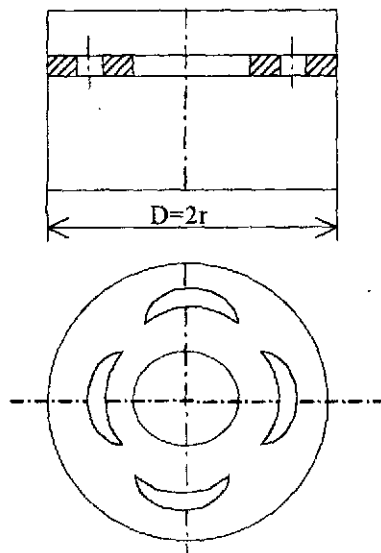


Рис. 3. Демпфирующая перегородка кольцевого типа с продольной щелью

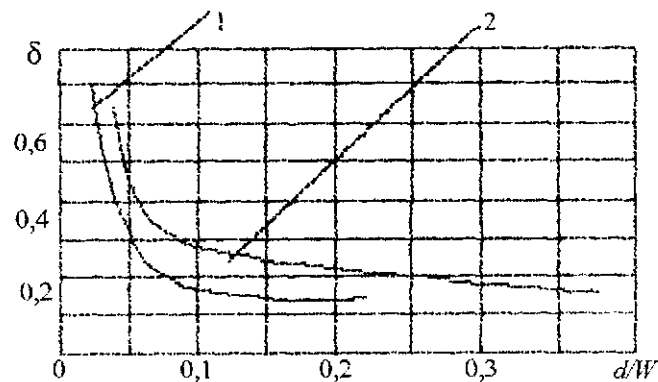


Рис. 4. Зависимость логарифмического декремента от величины  $d/W$ :

$$1 - \Delta/b = 0; \quad 2 - \Delta/b = 0,05$$

Такое решение не является единственно возможным. Рассмотрим применение упругих форм перегородок [1], которые в некоторых случаях создают большую диссипацию энергии и, следовательно, большие коэффициенты демпфирования, чем такие же по форме, но жесткие.

В этом случае уравнения совместных колебаний перегородки и жидкости имеют вид:

$$\begin{aligned} \mu(\ddot{s} + \beta_s \dot{s} + \omega_s^2 s) - \alpha F &= \lambda U_0 \omega^2 \sin \omega t; \\ m^0(\ddot{q} + \beta_q \dot{q} + \omega_q^2 q) + F &= m^0 U_0 \omega^2 \sin \omega t, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\mu$ ,  $\beta_s$ ,  $\omega_s$  и  $\lambda$  – гидродинамические коэффициенты, соответствующие полости без перегородки;  $\alpha$  – коэффициент, характеризующий уменьшение амплитуды колебаний жидкости;

$F$  – сила, действующая на перегородку со стороны жидкости;  $\beta_q = \frac{H}{m^0}$  – коэффициент

демпфирования, характеризующий диссипацию энергии;  $\omega_q = \sqrt{\frac{c}{m^0}}$  – собственная частота колебаний перегородки при отсутствии жидкости;  $m^0$  – масса перегородки;  $q$  – координата перемещения перегородки относительно стенки полости.

Гидродинамическая сила  $F$  может быть представлена следующим образом:

$$F = -m \frac{d\vartheta}{dt} - \frac{4}{3\pi} c_b b \vartheta_0 \vartheta,$$

где  $m$  – присоединенная масса;  $c_b = K \left( \frac{2\pi\vartheta_0}{b\omega} \right)^{-n}$  – коэффициент сопротивления.

Коэффициенты  $K$  и  $n$  зависят от глубины утопления перегородки и определяются экспериментально. Исходная система уравнений (5) решается численно методом последовательных приближений.

Повысить эффективность проектируемой упругой перегородки можно введением гофрировки [5]. Форма такой перегородки работает в области малых деформаций, но больших перемещений, как мембрана. Количество и профиль гофров можно задавать.

Таким образом, в процессе проектирования часто происходят изменения конструкции бака, что влечет за собой изменение форм и размеров перегородок. Однако достижение удовлетворительного демпфирования неизбежно сопряжено с увеличением веса конструкции. В зависимости от конструкции бака предлагается выбирать одну из вышперечисленных форм перегородок, которые обеспечивают максимальное демпфирование при минимальных весовых затратах.

### Список литературы

1. Микишев Г.Н., Рабинович Б.И. Динамика тонкостенных конструкций с отсеками, содержащими жидкость. – М.: Машиностроение, 1971. – 564 с.
2. Miles J.W. Ring damping of free surface oscillations in a circular tank // J. Appl. – 1958. – Mech. – Vol. 25. – № 6. – P. 274-276.
3. Венедиктов Б.И. О некоторых возможностях увеличения эффективности плоской демпфирующей перегородки // Труды ЦАГИ. – М.: ЦАГИ, 1971. – С. 19.
4. Сазанов В.И. К определению характеристик демпферов колебаний жидкости в виде гофрированных кольцевых и радиальных ребер // Колебания упругих конструкций с жидкостью: Сб. науч. тр. – М.: ЦНТИ Волна, 1980. – С. 258–261.

Стаття надійшла до редакції 27 вересня 1999 року.