

ВЛИЯНИЕ ВИБРАЦИИ НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ КАВИТАЦИИ В ЖИДКОСТИ, НАХОДЯЩЕЙСЯ В СТАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Рассмотрены условия возникновения разрыва сплошности жидкости, находящейся в открытом сосуде, на который воздействует вибрация

Considered conditions of liquid discontinuity in an open vessel, on which vibrations act.

Введение

Функционирование машин и механизмов часто сопровождается вибрацией. В большинстве случаев в объектах вибрация возникает вследствие наличия подвижных частей или же возмущающего воздействия внешней среды. Например, основными источниками вибрации на самолетах являются авиадвигатели, винты, компрессоры, турбины, турбулентная атмосфера и другие. В жидкостных системах источниками вибрации являются не только агрегаты различного функционального назначения, но и процессы, которые возникают в ходе их работы: кавитация, выделение воздуха в рабочих жидкостях, волновые явления в трубопроводах и смена режимов работы.

Наличие возникающей по тем или иным причинам вибрации в технических объектах нежелательно, так как она является источником шума, уменьшает их ресурс, ухудшая при этом многие физические показатели. Однако, несмотря на вышесказанное, вибрацию целенаправленно используют в различных технологических процессах и устройствах [2] с целью усиления теплообмена, жидкость, предназначенную для охлаждения, подвергают вибрации. Например, при закалке металлов; для интенсификации процессов очистки и распыления жидкостей используют вибрационные эффекты; вибрацию также используют для смешивания различных сред.

Постановка задачи

Функциональные жидкостные системы воздушных судов претерпевают достаточно большие вибрационные нагрузки. Об этом свидетельствуют значения параметров вибрации в зонах ее локализации на самолетах [3]: частота может достигать 500 Гц и более, амплитуда до 1 мм, значения перегрузок, которые может создавать вибрация достигает 40 g.

Такие условия работы негативно влияют не только на самолетное оборудование функциональных систем, но и на служебные свойства рабочих жидкостей, так как в них вибрация инициирует развитие колебаний давления, кавитацию, выделение газовой фазы. В связи с этим возникла необходимость установить, при каких значениях

параметров вибрации для вышеуказанных диапазонов в сосуде с жидкостью возникает кавитация.

Цель работы

Определить теоретически и экспериментально условия возникновения разрыва сплошности жидкости, находящейся в цилиндрическом сосуде, на который воздействует вибрация.

Теоретическое определение условия возникновения разрыва сплошности жидкости при вибрации

Рассмотрим схему, в которой колба с жидкостью установлена вертикально на столе вибростенда (рисунок 1).

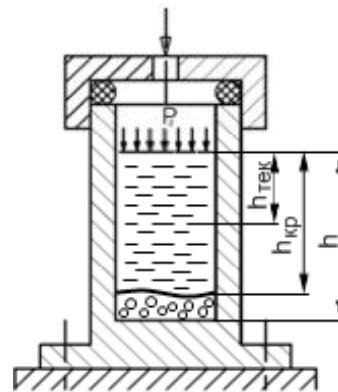


Рисунок 1 — Экспериментальный сосуд

Давление в сечении столба, расположенном на расстоянии $h_{\text{тек}}$ от поверхности, определяется зависимостью

$$p_{\text{тек}} = p_0 + \rho g h_{\text{тек}} \pm \frac{I m}{S} = p_0 + \rho g h_{\text{тек}} \pm \alpha \omega^2 \sin \omega t \rho h_{\text{тек}}, \quad (1)$$

где p_0 — давление над поверхностью жидкости в емкости; ρ — плотность жидкости; $I = \pm \alpha \omega^2 \sin \omega t$ — уско-

рение емкости; m — масса столба жидкости высотой $h_{\text{тек}}$; S — площадь поперечного сечения сосуда.

Разрыв сплошности жидкой среды при вибрации произойдет при условии понижения давления в какой-либо точке ее объема до величины, близкой к давлению упругости паров жидкости $p_{\text{тек}}$, т.е. при условии

$$p_{\text{тек}} \approx p_{\text{кав}} \quad , \quad p_{\text{тек}} \approx p_{\text{кав}} \approx p_{\text{н.п.}} \quad (2)$$

Из (1) следует, что разрыв сплошности возможен лишь при условии

$$\sin \omega t < 0, \quad (3)$$

то есть, при движении стола вибростенда и доньшка колбы вниз.

Подставим $p_{\text{даэ}}$ в выражение (1) и запишем условия разрыва сплошности

$$p_{\text{н.п.}} = p_0 + \rho g h_{\text{тек}} \pm \alpha \omega^2 \sin \omega t h_{\text{тек}} \quad (4)$$

Так как кавитация возможна лишь при условии (3), то выражение (4) можно представить в виде

$$p_{\text{н.п.}} = p_0 + \rho g h_{\text{тек}} - \alpha \omega^2 \rho (\sin \omega t) h_{\text{тек}} \quad (5)$$

Текущая высота столба жидкости, при которой начнется кавитация:

$$h_{\text{тек}} = \frac{p_{\text{н.п.}} - p_0}{\rho (g - \alpha \omega^2 \sin \omega t)} = \frac{p_0 - p_{\text{н.п.}}}{\rho (\alpha \omega^2 (\sin \omega t) - g)} \quad (6)$$

Определим критическую высоту столба жидкости $h_{\text{тек}}$, то есть минимальную высоту, при которой произойдет разрыв сплошности жидкости. Очевидно, $h_{\text{тек}}$ будет минимальной при условии, что $\sin \omega t = 1$. Отсюда:

$$h_{\text{тек}} = \frac{p_0 - p_{\text{н.п.}}}{\rho (\alpha \omega^2 - g)} \quad (7)$$

Граничным условием возникновения кавитации является условие $\alpha \omega^2 > g$, поскольку, $h_{\text{тек}} > 0$ случай $\alpha \omega^2 = g$ соответствует $h_{\text{тек}} \rightarrow \infty$.

Таким образом, выражение (7) представляет собой зависимость $h_{\text{тек}}$ от параметров вибрации. При высоте $h_{\text{тек}}$ столба жидкости сплошность жидкости нарушается и в ней образуются пузырьки.

После каждой отрывной фазы следует фаза сжатия колебательного процесса. В ней пузырьки вследствие повышения давления захлопываются. Длительный процесс коллапса пузырьков способствует деструкции рабочей жидкости.

Вибрационное ускорение связано с частотой ν и амплитудой α колебаний соотношением

$$I = \frac{\alpha \nu^2}{250},$$

где I — ускорение в единицах $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; ν — частота колебаний в Гц; α — амплитуда колебаний в мм.

На рисунке 2 построена кривая 1, характеризующая теоретическую зависимость критической высоты столба жидкости от ускорения I (в долях g), при превышении которой возникает кавитация. Зависимость была построена согласно формуле (7) при условии, что $p_0 = p_{\text{атм}}$.

Из графика следует, что для каждого ускорения существует своя критическая высота столба жидкости, которая с увеличением ускорения уменьшается.

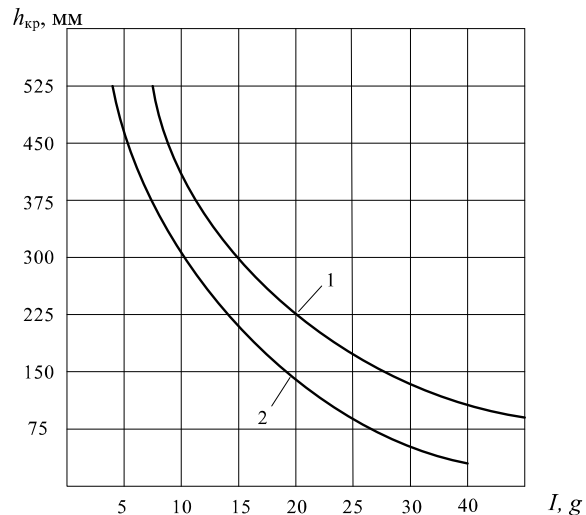


Рисунок 2 — Зависимость критической высоты столба жидкости от вибрационного ускорения: 1 — теоретическая зависимость; 2 — экспериментальная зависимость $p_0 = p_{\text{атм}}, t^{\circ} = 20^{\circ} \text{C}$

Экспериментальные исследования

При исследованиях для создания вибрации был использован серийный электродинамический вибростенд ВЭС-100. Жидкость (АМГ-10) находилась в сосуде (колбе) с внутренним сечением 40x40 и высотой 565 мм. Он выполнен из прозрачного материала — оргстекла (рисунок 1). Сосуд своим основанием жестко крепился в вертикальном положении к горизонтальному столу испытательного стенда. В экспериментальной установке была предусмотрена возможность проведения исследований с наддувом емкости так и без него.

Визуальные наблюдения за возникновением и поведением в жидкости кавитационных очагов были проведены в прозрачной опытной модели при различных, характерных для самолетов условиях в диапазоне вибрационных ускорений до 40 g .

При проведении первого эксперимента высота столба жидкости составляла 450 мм. Результаты наблюдений показали, что при достижении некоторого значения вибрационного ускорения (в нашем случае $\omega = 150 \text{ Гц}$; $\alpha = 19 \text{ мм}$; $I = 17 \text{ g}$) кавитационная зона в виде скопления парогазовых пузырьков возникает в отдельных точках на границе контакта жидкости с доньшком или в углу у одной из стенок (рисунок 3).

С повышением ускорения в исследуемом диапазоне, достигаемом как за счет увеличения амплитуды колебаний при постоянной частоте, так и за счет увеличения частоты колебаний при постоянной амплитуде, или одновременного изменения частоты и амплитуды, кавитационный процесс углублялся с расширением кавитационной зоны по всей поверхности доньшка и, частично, по высоте столба жидкости.

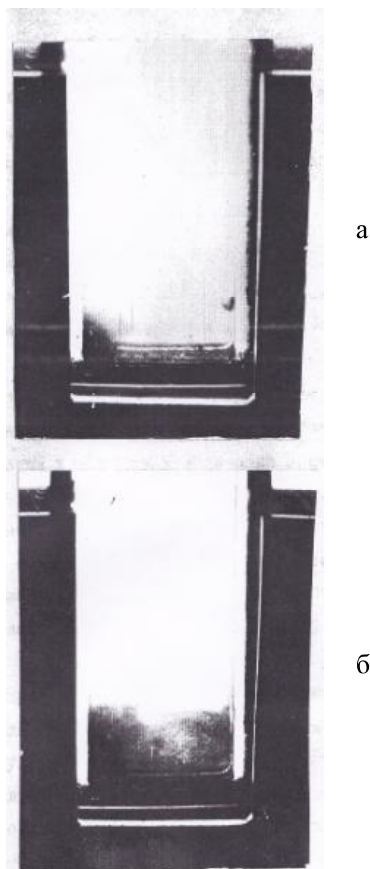


Рисунок 3 — Образование кавитационных каверн при вибрации: а) частота 150 Гц; амплитуда 0,19 мм; ускорение 17 м/с²; б) частота 175 Гц; амплитуда 0,21 мм; ускорение 25 м/с²

Образование вышеуказанного плотного слоя парогазовых пузырьков было условно принято за показатель наступления стабильного процесса кавитации.

На рисунке 3 показано фото, на котором зафиксировано образование характерного для кавитации слоя (при частоте вибраций 175 Гц, амплитуде $\alpha = 0,21$ мм, виброускорении 25 g; толщина кавитационного слоя достигла приблизительно 80 мм). Вступление жидкости в кавитационный режим сопровождалось, кроме появления у доньшка кавитационной зоны, выделением из жидкости мелких воздушных пузырьков в виде пыли. При этом одновременно другие мелкие воздушные пузырьки собирались в относительно большие пузыри, которые беспорядочно циркулировали при изменении параметров вибрации по всему объему жидкости.

Характер газовых скоплений и траектории их перемещений обусловлены циркуляцией жидкости. Поверхность жидкости при этом сохранялась спокойной. Следовательно, их появление можно отнести лишь за счет выделения воздуха из жидкости при кавитации. О газовой природе скоплений свидетельствовало устойчивое их существование в жидкости.

Визуальные наблюдения за процессом образования в жидкости кавитационных очагов были также проведены для высот столба жидкости: $h = 550; 350; 250; 150$ мм. Для каждой из этих высот определялось критическое ускорение, то есть минимальное ускорение, необходимое для возникновения кавитации. В экспериментах, проведенных при высоте столба жидкости $h = 250$ мм минимальная амплитуда, при которой визуально наблюдалась кавитация (при условии) была равной 0,02 мм.

Результаты экспериментов представлены на рисунке 2 (кривая 2). Из сопоставления графиков, показанных на рисунке 2, следует, что экспериментальные значения критических ускорений для всех указанных высот столбов жидкости на 15–20 % ниже значений, вычисленных по формуле (7). Расхождение расчетных и опытных значений следует объяснить тем, что расчеты произведены без учета факторов, которые могут влиять на протекания реального процесса – наличия в жидкости растворенного и нерастворенного воздуха, загрязнения, значения температуры и других параметров.

Вывод

Таким образом, при вибрационном воздействии на жидкость с ускорением до 40 g возникает кавитация. Как показали теоретические изыскания и экспериментальные исследования разрыв сплошности жидкости при вибрационном на нее воздействии зависит от параметров вибрации – частоты и амплитуды, физических свойств жидкости – давления насыщенных паров, плотности и вязкости, а также состояния жидкости – наличия воздуха, степени загрязнения, давления над поверхностью жидкости, температуры и других.

Литература

1. Глазков, М.М., Ланецкий, В.Г., Макаренко, Н.Г., Челюканов, И.П. Кавитация в жидкостных системах воздушных судов. — К.: КИИГА, 1987. — 64 с.
2. Кубенко, В.Д., Лакиза, В.Д., Павловский, В.С., Пелых, Н.А. Динамика упругожидкостных систем при вибрационных воздействиях. — К.: Наук. думка, 1988. — 256 с.
3. Сидоренко, М.К. Виброметрия газотурбинных двигателей. — М.: Машиностроение, 1973. — 224 с.

Надійшла 29.01.2013 року