УДК 629.1.05

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ АНИЗОТРОПНОСТИ ЖИДКОФАЗНЫХ СТРУКТУР В АКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЯХ

В.Н. Мельник, канд. техн. наук,

Национальный технический университет Украины «КПИ», г. Киев, Украина

Общая постановка проблемы и ее связь с научно-практическими задачами. В натурных условиях вследствие ударных воздействий, вибрации, температурных и иных внешних возмущений в жидкофазной части чувствительных элементов приборов и устройств, а также в элементах конструкций жидкотопливных ракет и приводных устройств возникают пузырьки газа, нарушающие ее изотропность. Ситуация осложняется тем, что прошедшая внутрь акустическая волна заставляет пузырьки газа перемещаться в направлении ее распространения и сосредотачиваться в определенном месте конструкции, как правило, в зоне акустической тени. Такое явление особенно нежелательно в системах, имеющих высокие требования к изначальному равновесию массовых и гидростатичеких сил.

Обзор публикаций и анализ нерешенных проблем. В настоящее время в отечественной литературе не опубликованы материалы касательно динамики кавитационных пузырьков в акустических средах. Вместе с тем отдельные исследования этой проблемы применительно к полиагрегатным структурам чувствительных элементов систем инерциальной навигации уже проводились [1-3]. Здесь речь идет об особенностях движения пузырьков газа в подвесе приборов и в чувствительных элементах систем коррекции. Нерешенной остается задача влияния вязко-упругих свойств жидкости и конструкции в целом на характер и особенности перемещения пузырьков газа под действием акустического излучения произвольной формы. Эти вопросы достаточно четко определяют круг прикладных задач анализа и синтеза многофазных структур в звуковых полях.

Цель исследований. Целью представленных исследований являлась разработка расчетных моделей явления в интересующем приближении и оценка степени влияния деформируемости поверхности пузырьков газа и не зависящих от времени свойств жидкости (например вязкости) на величину перемещений пузырьков, нарушающих изотропность жидкости.

Результаты исследований. В предположении линейности поставленной задачи уравнения движения, к примеру, одного пузырька, в проекциях на его главные центральные оси инерции можно представить в виде [4]:

$$m_{ii}\ddot{U}_{*i} + b_i\dot{U}_{*i} + Q_i = F_i,$$

где m_{ii} – масса пузырька газа (момент инерции в случае углового движения);

$\ddot{U}_{*i}$ – ускорение центра масс (линейное либо угловое);

b_i – приведенный коэффициент вязкого сопротивления;

F_i – сила, с которой распространяющаяся в жидкости волна действует на недеформируемую поверхность пузырька;

$Q_i = \iint\limits_S \vec{q}(x,y,t)\cdot\vec{\tau}_i(x,y)dS,$ – дополнительная сила взаимодействия поверхности со средой, обусловленная деформацией;

$\vec{q}$ – давление, вызванное смещением пузырька;

$\vec{\tau}_i$ – единичный вектор соответствующей оси ординат;

x, y – координаты точки поверхности;

t – время; S – поверхность пузырька.

Если поверхность пузырька перемещается, либо деформируется таким образом, что обобщенная координата растет с единичной скоростью

$$\dot{U}_k\big|_{t>0} = 1; \quad U_k\big|_{t<0} = 0; \quad U_m\big|_{m\neq k} = 0,$$

то на поверхности пузырька, вообще говоря, возникнет давление с составляющими по всем направлениям

$\vec{\tau}_i$ и приведенное выше соотношение определит обобщенную силу $f_{ik}(t)$, соответствующую этим условиям

$$Q_i(t) = \sum_k Q_{ik}(t) = \sum_k \int_0^t F_{ik}(t-\tau)\ddot{U}_k(\tau)d\tau.$$

Зависимость обобщенных сил F_i от параметров волны давления также может быть представлена функциями f_{ik}, если мысленно представить движение части жидкости, ограниченной поверхностью пузырька, то есть «фиктивного» тела:

$$F_i = \sum_n m_{ni}^{\phi}\ddot{U}_{*n}^{\phi} + \sum_k \int_0^t f_{ik}(t-\tau)\ddot{U}_k^{\phi}(\tau)d\tau + b_n\dot{U}_{*n},$$

где m_{ni}^{ϕ} – масса (статический момент или момент инерции фиктивного тела относительно выбранных осей); индекс "ф" означает принадлежность к фиктивному телу. Предполагается, что пузырек не отделен от жидкости, из чего следует, что перемещения его поверхности и касающейся ее среды совпадают.

С учетом сказанного уравнения движения пузырька могут быть представлены в виде интегро-дифференциальных зависимостей

$$m_{ii}\ddot{U}_{*i} + \sum_k \int_0^t f_{ik}(t-\tau)\ddot{U}_k(\tau)d\tau + b_i\dot{U}_{*i} =$$

$$= \sum_m m_{ni}^{\phi}\ddot{U}_{*n}^{\phi} + \sum_k \int_0^t f_{ik}(t-\tau)\ddot{U}_k^{\phi}(\tau)d\tau + b_n\dot{U}_{*n}.$$

Если колебания пузырька и будут иметь место, то с прекращением звукового воздействия они затухают и, таким образом, перемещения в итоге также будут стремиться к пределу. Кроме того, ограничение внешнего воздействия исключает экспоненциальное увеличение перемещений пузырька при $t \to \infty$. Характер взаимосвязи окончательных перемещений пузырька от окончательных перемещений фиктивного тела, то есть жидкости в отсутствие пузырька, существенным образом зависит от поведения функции

$[f_{ik}(t)]\ _{t\to\infty}$.

В том случае, когда пузырьки газа ограниченных размеров, в зависимости от свойств жидкости (безграничной) можно следующим образом классифицировать функции f_{ik}.

Идеальная (без учета вязкости) жидкость

$$\lim_{t\to\infty} f_{ik}(t) = m_{ik}^0,$$

где m_{ik}^0 - присоединенная масса.

Реальная (с учетом вязкости) жидкость

$$\lim_{t\to\infty} f_{ik}(t) = \alpha_{ik},$$

где α_{ik} – сопротивление при движении пузырька.

Если принять

$$\dot{U}_{*i}\big|_{t\to\infty} = \text{const},$$

то

$$\ddot{U}_{*i}\big|_{t\to\infty} = 0.$$

При установившемся перемещении пузырьков газа, то есть при $t \to \infty$, силы f_{ik} уравновешиваются силами сопротивления α_{ik}.

Перспективы дальнейших исследований. Полученные результаты дают возможность оценить степень влияния параметров акустического излучения, физико-механических свойств жидкости (в том числе гистерезисных явлений) и иных факторов на решение рассматриваемой задачи. Кроме того, появляется возможность определить закономерности пространственного движения и их особенности не только при установившемся движении, но и с учетом характера обтекания пузырьков жидкостью.

Задачу можно расширить, если учесть не только вязкие, но и упругие свойства системы.

Для свободно перемещающегося пузырька в случае идеальной жидкости предельные перемещения будут определяться соотношениями

$$m_{ii}U_{i\infty} + \sum_{k=1}^{6} m_{ik}U_{k\infty} + \left[m_{ii}(U_{*i\infty} - U_{i\infty})\right] +$$

$$+ \left[\sum_{k=7}^{\infty} m_{ik}U_{k\infty}\right] = \sum_n m_{ni}^{\phi}U_{n\infty}^{\phi} + \sum_{k=1}^{6} m_{ik}U_{k\infty}^{\phi} +$$

$$+ \left[\sum_n m_{ni}^{\phi}(U_{*n\infty}^{\phi} - U_{n\infty}^{\phi})\right] + \left[\sum_{k=7}^{\infty} m_{ik}U_{k\infty}^{\phi}\right],$$

а для твердой среды упругой среды выражением вида

$$\sum_{k=1}^{6}\beta_{ik}U_{k\infty}+\left[\sum_{k=7}^{\infty}\beta_{ik}U_{k\infty}\right]=$$

$$=\sum_{k=1}^{6}\beta_{ik}U_{k\infty}^{\phi}+\left[\sum_{k=7}^{\infty}\beta_{ik}U_{k\infty}^{\phi}\right].$$

Члены в квадратных скобках соответствуют остаточным деформациям поверхности (в левых частях уравнений) и фиктивного тела (в правых).

Рассмотренные особенности анизотропности жидкофазных структур характерны для гироприборов с так называемым жидкостным маятниковым переключателем (ЖМП). Перемещаясь в сторону распространяющейся волны давления пузырек ЖМП нарушает равновесие токов в обмотках коррекционных механизмов и ось фигуры будет отслеживаться в сторону "ложной" вертикали. Причем, работая, например, на постоянной части характеристики, ЖМП будет заставлять прецессировать ротор гироскопа в продолжение всего времени действия внешнего акустического давления. Это будет происходить до тех пор, пока ракета-носитель не оторвется от стартовой площадки и не поднимется на такую высоту, когда уровень акустического излучения уменьшится до номинальной величины 130 – 150 децибел и приборы управления станут инвариантными к его воздействию. В этом случае система коррекции будет возвращать ось фигуры гирогоризонта в положение истинной вертикали.

Выводы. Анализ показывает, что упругие деформации поверхности не влияют на окончательное перемещение пузырька, так как величины m_{ii}, m_{ik}^{0} и α_{ik} ограничены, а остаточные деформации равны нулю, вследствие чего равны нулю и члены, им соответствующие.

Если функции f_{ik} неинтегрируемы (в случае реальной жидкости), то масса пузырька и деформации его поверхности не влияют на предельные перемещения.

В том случае, когда деформации упругие, главные центральные оси, а также их массы (либо моменты инерции) соответственно совпадают и окончательные перемещения пузырька и фиктивного тела (жидкости в отсутствие пузырька) равны между собой. Деформации фиктивного тела будут упругими, например, в случае плоской акустической волны, когда все частицы жидкости перемещаются на одно и то же расстояние.

При положительной плавучести окончательные перемещения в среде больше, а при отрицательной – меньше перемещения частиц идеальной жидкости. Вместе с тем установлено, что в реальной жидкости масса пузырька не оказывает влияния на величину перемещений. Кажущееся противоречие объясняется тем, что при $t > T$ хотя бы и медленно (при малом трении), при положительной плавучести пузырек возвратится назад настолько, пока его перемещение не сравняется с перемещением частиц жидкости. Точно так же и для случая отрицательной плавучести.

Литература

1. Про вплив аеродинамічного шуму на роботу гірогоризонта / В.М. Мельник, Аль Хансаит Мамун, В.В. Карачун, Г.Б. Астапова // Вісник ЖІТІ.- 2000.– № 13.- Тех. науки.– С. 37-40.

2. Многомерные задачи нестационарной упругости подвеса поплавкового гироскопа / В.В. Карачун, В.Г. Лозовик, Е.Р. Потапова, В.Н. Мельник / Под ред. В.В. Карачуна.– К.: «Корнейчук», 2000.– 128 с.

3. Карачун В.В., Потапова Е.Р., Мельник В.Н. О погрешности построения вертикали при старте носителей // Космічна наука і технологія.- 1999.– Т. 5.– № 4.– С. 70-74.

4. Карачун В.В. Прохождение волны избыточного давления через многофазную механическую структуру // Космічна наука і технологія.- 1996.– Т. 2.– № 3-4.– С. 55-57.

Поступила в редакцию 03.06.03.

Рецензенты: канд. техн. наук, доц. каф. теоретической механики О.Н. Юдин, НТУ «КПИ», г. Киев; д-р техн. наук, проф. В.А. Касьянов, НАУ, г. Киев.