КУЙБЫШЕВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ им. С. П. КОРОЛЕВА
Труды, выпуск XXXVI, 1969 г.
Вибрационная прочность и надежность двигателей
и систем летательных аппаратов

Р. Н. СТАРОБИНСКИЙ

ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРЕМЕННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ МАССОВОГО РАСХОДА ЖИДКОСТИ В ТРУБОПРОВОДЕ

Во многих случаях при изучении нестационарного движения жидкости в трубопроводах возникает задача экспериментального определения переменной составляющей массового расхода жидкости. Если в настоящее время имеются достаточно точные системы замера давления жидкости в трубопроводе, то достаточно надежных устройств для измерения пульсирующего расхода промышленностью не выпускается. Поэтому для определения переменной составляющей массового расхода используются искусственные методы, основанные на данных измерения давления в отдельных сечениях трубопровода.

Наиболее простым методом является измерение перепада давлений на гидравлическом сопротивлении с последующим расчетным определением расхода по статическим зависимостям. Однако этот метод из-за отсутствия надежных данных о гидравлическом сопротивлении на нестационарных режимах считается недостаточно точным.

Возможен еще метод, связанный с измерением давлений на концах участка трубопровода, гидроакустические характеристики которого известны с достаточной степенью точности (фиг. 1).

При этом переменная составляющая массового расхода в сечении 2 определится по формуле

$$M_2 = -Y_{21}p_1 - Y_{22}p_2. \tag{1}$$

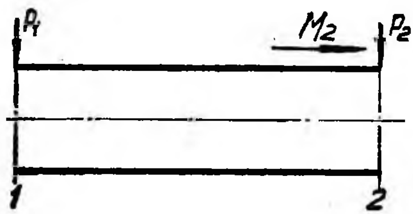
Здесь и далее Y, A, B, C, D, z, Θ — гидроакустические аналоги электрических величин, определяющиеся по известным зависимостям (см., например, [1]).

p_1 и p_2 — переменные составляющие давления в сечениях *1* и *2*.

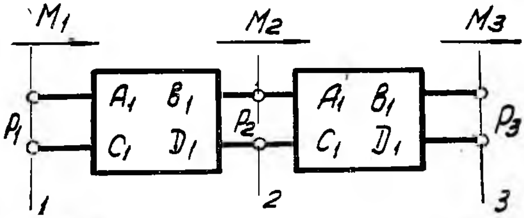
Однако непосредственный расчет по формуле (1), как будет показано в приложении, дает значительную погрешность, связанную с неточностью определения сдвига фаз между p_1 и p_2 (особенно при малых значениях постоянной распространения четырехполюсника между сечениями *1* и 2).

Предлагаемый ниже метод по своей физической сущности не отличается от изложенного выше, однако при этом частичная обработка информации происходит в электрической схеме, что позволяет значительно уменьшить погрешность в определении массового расхода.

На фиг. 2 изображена эквивалентная схема участка гидросистемы, состоящей из двух одинаковых участков (1—2 и 2—3). Четырехполюсники (1—2) и (2—3) обратимы и симметричны.



Фиг. 1. Мерный участок.



Фиг. 2. Эквивалентная схема мерного участка.

Выразим давление и расход в сечении 2 через те же величины в сечениях *1* и *3*.

$$\begin{cases} p_2 = A_1p_3 + B_1M_3 & (2)\\ M_2 = C_1p_3 + D_1M_3, & (3) \end{cases}$$

$$\begin{cases} p_2 = D_1p_1 - B_1M_1 & (4)\\ M_2 = -C_1p_1 + A_1M_1 & (5) \end{cases}$$

Складывая почленно (2) с (4) и (3) с (5) и замечая, что $A_1 = D_1$, получим

$$\begin{cases} p_2 = A_1p_{\text{ср}} - \frac{B_1}{2}\Delta M \\ M_2 = -\frac{C_1}{2}\Delta p + A_1M_{\text{ср}}, \end{cases} \tag{6}$$

где $\Delta p_{\text{ср}} = \frac{p_3 + p_1}{2}$; $M_{\text{ср}} = \frac{M_3 + M_1}{2}$;

$$\Delta p = p_1 - p_3; \quad \Delta M = M_1 - M_3. \tag{7}$$

Выразим ΔM и $M_{\text{ср}}$ через Δp и $p_{\text{ср}}$, для чего рассмотрим четырехполюсник 1 — 3 для него:

$$\begin{cases} M_1 = Y_{11}p_1 + Y_{12}p_3 \\ M_3 = -Y_{21}p_1 - Y_{22}p_3. \end{cases} \tag{8}$$

Складывая и вычитая почленно уравнения (8) и замечая, что для обратимых симметричных четырехполюсников

$$Y_{22} = Y_{11} \text{ и } Y_{21} = Y_{12};$$

получим

$$\begin{cases} M_{\text{ср}} = \dfrac{Y_{11} - Y_{12}}{2} \Delta p \\ \Delta M = (Y_{11} + Y_{12}) 2 p_{\text{ср}}. \end{cases} \quad (9)$$

Из (6) и (9), выражая A_1, B_1, C_1, Y_{11} и Y_{12} через характеристические параметры, после несложных алгебраических преобразований получим окончательно:

$$p_2 = \frac{1}{ch \frac{\Theta}{2}} p_{\text{ср}};$$

$$M_2 = \frac{1}{z_0 \, sh \frac{\Theta}{2}} \frac{\Delta p}{2}, \quad (10)$$

здесь z_0 — волновое сопротивление четырехполюсников,
Θ — постоянная распространения участка 1—3.

При выборе в качестве замерного участка прямолинейного отрезка трубопровода без потерь

$$z_0 = \frac{a}{f}; \quad \Theta = \frac{i\omega l}{a}, \quad (11)$$

здесь f — площадь трубопровода,
l — длина замерного участка,
a — скорость звука в жидкости.

С учетом (11) выражения (10) примут вид:

$$p_2 = \frac{1}{\cos \frac{\omega l}{2a}} p_{\text{ср}} \quad M_2 = \frac{f}{a} \frac{\Delta p}{2i \sin \frac{\omega l}{2a}}, \quad (12)$$

здесь p_2 и M_2 — переменные давление и расход посередине замерного участка.

Для малых Θ формулы (10) принимают вид:

$$p_2 = p_{\text{ср}}; \; M_2 = \frac{\Delta p}{z_0 \Theta}, \quad (13)$$

а формулы (12), соответственно:

$$p_2 = p_{\text{ср}}; \; M_2 = \frac{f}{l} \frac{\Delta p}{i\omega}. \quad (14)$$

Формулы (14) совпадают с выражениями для определения массового расхода по динамическому напору, справедливыми для несжимаемой жидкости (или в случае малых частот и малых длин замерного участка).

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как видно из (10), амплитуда массового расхода в сечении 2 определяется непосредственно через величину Δp, которая может быть получена вычитанием электрических сигналов с датчиков давления p_1 и p_3 при их одинаковой тарировке. Таким образом отпадает необходимость определения сдвига фаз между p_1 и p_3.

То же самое можно сказать о величине модуля акустического импеденса в сечении 2.

$$|z_2| = \frac{|p_2|}{|M_2|} = 2\,|z_0|\left|th\,\frac{\Theta}{2}\right|\frac{|p_{cp}|}{|\Delta p|}. \tag{15}$$

Эта величина может быть определена и без знания точной тарировки датчиков давления из соотношения амплитуд p_{cp} и Δp (величина p_{cp} получается суммированием электрических сигналов с датчиков 1 и 3).

Ошибка в определении сдвига фаз между p_{cp} и Δp не влияет на величину амплитуды расхода и входит в его фазу непосредственно, без преобразований.

4. Для вычисления M_3 через p_{cp} и Δp могут быть использованы выражения (9)

$$M_3 = \frac{1}{z_0\,sh\,\Theta}\left[\frac{ch\,\Theta + 1}{2}\,\Delta p - (ch\,\Theta - 1)\,p_{cp}\right]. \tag{16}$$

ПРИЛОЖЕНИЕ

Определение погрешности расчета пульсирующего расхода по формуле (1):

Преобразуя (1) через характеристические параметры, получим

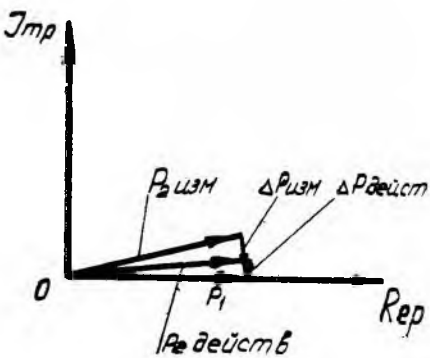
$$M_2 = \frac{1}{z_0\,sh\,\Theta}(p_1 - p_2\,ch\,\Theta). \tag{17}$$

Таким образом, относительная погрешность определения амплитуды M_2 зависит от относительной погрешности определения векторной величины $(\overline{p_1 - p_2 ch\,\Theta})$.

Рассмотрим простейший случай $|\Theta| \ll 1$

$$ch\,\Theta \approx 1$$

$$\vec{p}_1 - \vec{p}_2\,ch\,\Theta \approx \vec{p}_1 - \vec{p}_2.$$



Фиг. 3. Векторная диаграмма давления.

Из фиг. 3 видно, что даже небольшая погрешность определения фазы $\vec{p}_2$ при малом сдвиге фаз между $\vec{p}_1$ и $\vec{p}_2$ значительно влияет на величину $|\overline{\vec{p}_1 - \vec{p}_2}|$ и тем самым на величину амплитуды расхода.