

## НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ МЕТОДИКИ ЗАМЕРА МГНОВЕННЫХ ДАВЛЕНИЙ

С. М. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ, Б. И. УЛЬЯНОВ, В. С. ХОМЕНКО

(Москва)

Измерение мгновенных давлений позволяет получать аэродинамические характеристики колеблющихся моделей в чистом виде, без влияния сил инерции. В некоторых случаях исключение влияния последних настолько затруднительно, что метод замера мгновенных давлений оказывается самым надежным путем экспериментального исследования. Кроме того, тензометрические методы позволяют определять только суммарные характеристики тела, здесь же имеется возможность находить и распределенные нагрузки [1].

Трудность этого пути, помимо громоздкости эксперимента, заключается в обеспечении условий, гарантирующих достаточно малые погрешности, особенно при замерах сдвигов фаз давлений относительно мгновенного угла атаки.

Ниже рассматриваются некоторые вопросы методики измерения нестационарных аэродинамических нагрузок при гармонических колебаниях модели, постоянной средней скорости потока  $U_0$  и малых амплитудах колебаний. Дается описание установки для динамической тарировки системы измерений и приводятся опытные данные по влиянию различных параметров этих систем с применением внутримодельных датчиков давлений на погрешности измерений.

1. Определение нестационарных нагрузок методом замера давлений. Будем пользоваться стандартной связанной с телом системой координат (фиг. 1) и неустановившееся движение тела характеризовать следующими безразмерными кинематическими параметрами, являющимися функциями времени  $t$ :

$$\begin{aligned} \alpha, \beta, \alpha' &= \frac{d\alpha}{dt} \frac{b}{U_0}, & \beta' &= \frac{d\beta}{dt} \frac{b}{U_0}, & \omega_x &= \frac{\Omega_x b}{U_0} \\ \omega_x' &= \frac{d\Omega_x}{dt} \frac{b^2}{U_0^2}, & \omega_z &= \frac{\Omega_z b}{U_0}, & \omega_z' &= \frac{d\Omega_z}{dt} \frac{b^2}{U_0^2} \end{aligned} \quad (1.1)$$

Здесь  $U_0$  — скорость подвижного начала  $O$  (скорость набегающего потока), которую считаем постоянной,  $b$  — характерный линейный размер ( $y$  крыла — корневая хорда).

Ограничимся рассмотрением гармонических колебаний модели при  $\beta = \beta' = 0$  с малыми значениями безразмерных амплитуд кинематических параметров (1.1). Тогда можно считать, что коэффициенты давлений  $p$  также будут изменяться по гармоническому закону, и их можно выразить через коэффициенты вращательных производных первого порядка, которые не зависят от времени [2]

$$p = p_0 + p_\alpha \alpha + p_{\alpha'} \alpha' + p_{\omega_x} \omega_x + p_{\omega_x'} \omega_x' + p_{\omega_z} \omega_z + p_{\omega_z'} \omega_z' \quad (1.2)$$

При вращательных колебаниях относительно оси  $Oz$ , когда

$$\omega_x = \omega_x' = 0, \quad \alpha = \alpha^* \sin qt, \quad \alpha' = \omega_z, \quad \omega_z' = -S^2 \alpha$$

где

$$S = \frac{qb}{U_0} \quad (1.3)$$

— число Струхала, имеем

$$p = p_0 + (p_\alpha - S^2 p_{\omega_z'}) \alpha + (p_{\omega_z} + p_{\alpha'}) \omega_z \quad (1.4)$$

Величина  $p$  меняется по гармоническому закону, поэтому можно написать

$$p = p_0 + p^* \sin (qt + \varepsilon) \quad (1.5)$$

Сравнивая выражения (1.4) и (1.5), находим

$$p_\alpha - S^2 p_{\omega_z'} = \frac{p^*}{\alpha^*} \cos \varepsilon, \quad p_{\omega_z} + p_{\alpha'} = \frac{p^*}{\alpha^* S} \sin \varepsilon \quad (1.6)$$

Таким образом, в данном случае определяются комбинации вращательных производных давления, причем для их нахождения необходимо знать амплитуды  $\alpha^*$  и  $p^*$ , сдвиг фаз  $\varepsilon$  и число Струхала  $S$ .

При поступательных колебаниях вдоль оси  $Oy$ , когда  $\omega_x = \omega_x' = \omega_z = \omega_z' = 0$ , имеем

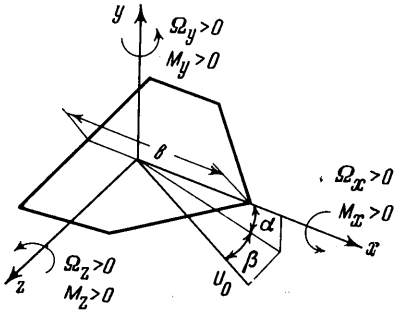
$$p = p_0 + p_\alpha \alpha + p_{\alpha'} \alpha' \tag{1.7}$$

Представив  $p$  в виде (1.5), получим

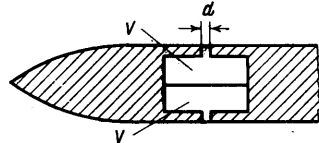
$$p_\alpha = \frac{P^*}{\alpha^*} \cos \varepsilon, \quad p_{\alpha'} = \frac{P^*}{\alpha^* S} \sin \varepsilon \tag{1.8}$$

Аналогичные соотношения имеют место и при вращательных колебаниях относительно продольной оси  $Ox$ .

**2. Требования к аппаратуре.** Расчеты, выполненные на базе линейной теории, а также экспериментальные данные при больших дозвуковых и сверхзвуковых скоростях потока показывают, что фазовые сдвиги  $\varepsilon$  обычно невелики (порядка нескольких десятков минут). Это вызывает жесткие требования к точности замера как амплитудных, так и главным образом фазовых величин. Увеличение круговой частоты



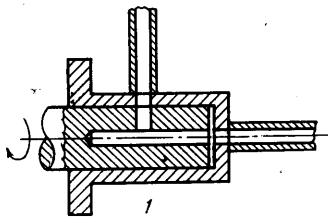
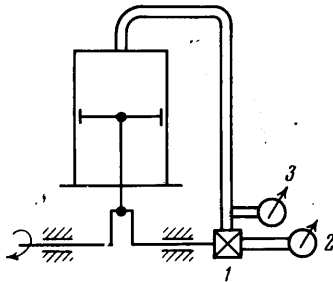
Фиг. 1



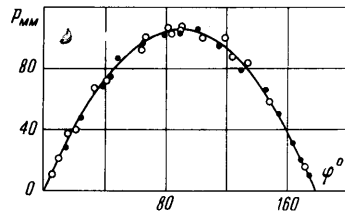
Фиг. 2

колебаний модели  $q$  приводит к увеличению фазовых сдвигов  $\varepsilon$ , но при этом возрастают и требования, предъявляемые к измерительной аппаратуре. Частота собственных колебаний всего комплекса применяемой аппаратуры должна быть велика по сравнению с частотой измеряемого процесса (превосходить ее не менее, чем на порядок).

Большой инерционностью обладают всякого рода соединительные трубопроводы, т. е. системы, связывающие исследуемую точку на поверхности модели с рабочим объемом датчика давления. Например, увеличение вдвое длины резинового трубопровода (диаметр 2 мм, частота процесса 5 гц, рабочий объем датчика 3,6 см<sup>3</sup>, исходная длина трубопровода 1 м) приводит к увеличению погрешности в замере сдвига фазы примерно на 50%. Чтобы избежать этих искажений, необходимо использовать внутримодельные датчики давлений.



Фиг. 3



Фиг. 4

У внутримодельного датчика область измеряемого давления и рабочий объем датчика соединяются узким отверстием. Давление в рабочем объеме датчика будет, очевидно, тем хуже следить за внешним давлением, чем меньше диаметр соединительного канала  $d$  и чем больше рабочий объем датчика  $V$  (фиг. 2). Желательно уменьшать рабочий объем и увеличивать диаметр входного отверстия, а также собственную частоту мембраны датчика и всей измерительной системы. Увеличение входного отверстия, особенно на малых моделях, которые обычно применяются для исследований в аэродинамических трубах больших скоростей, приводит к искажениям картины

давлений. С этой точки зрения, идеальными являются поверхностные датчики, чувствительные элементы которых располагаются непосредственно на поверхности тела.

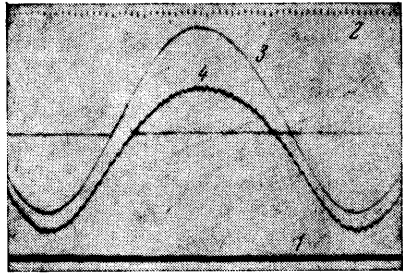
Рассмотрим малогабаритный индуктивный датчик давления, который представляет собой две изолированные друг от друга полости, разделенные тонкой металлической мембраной. Прогиб мембраны, вызванный перепадом давления, приводит к изменению индуктивности катушек датчика, разбалансу измерительного моста и отклонению шлейфа осциллографа.

Датчик является довольно сложной механико-акустической резонансной системой. Частота собственных колебаний рассмотренных датчиков была порядка 5000 гц. Указанная цифра была получена расчетным [3, 4] и экспериментальными методами. В последнем случае высокочувствительным динамиком, укрепленным на отражательной панели, создавалось давление с переменной частотой. Из замкнутого объема, образованного диффузором динамика и отражательной панелью, знакопеременное давление, возникающее при перемещении диффузора динамика, подводилось к исследуемому датчику, подключенному на вход усилителя. После усиления сигнал регистрировался на осциллографе. Катушки датчика питались напряжением, частота которого создавалась звуковым генератором и изменялась в широких пределах. По максимальной амплитуде сигнала на входе усилителя определялся момент резонанса и собственная частота исследуемой аппаратуры.

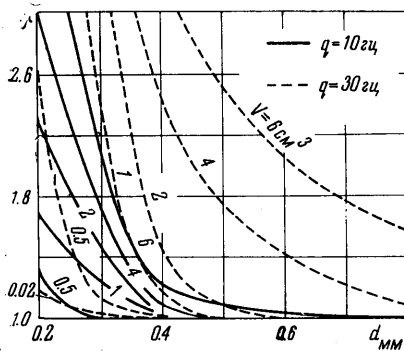
Рассматривался комплекс измерительной аппаратуры (датчик, усилитель, осциллограф), предназначенный для замера динамических знакопеременных давлений с частотой, не превосходящей 100 гц. В связи с этим были применены шлейфы, у которых частота собственных колебаний составляла 5000 гц. В качестве усилителя использовалось устройство, состоящее из четырех однотипных четырехламповых усилителей, по своим техническим условиям позволяющих исследовать такие процессы.

Для полного решения вопроса о пригодности выбранной системы, предназначенной для замера мгновенных давлений, необходима прямая динамическая тарировка, основанная на сравнении результатов замера динамического давления выбранной системой измерения с истинными значениями подведенного эталонного давления.

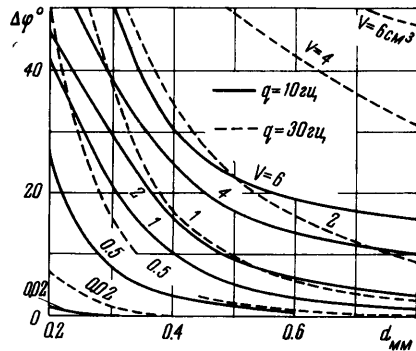
3. Динамическая тарировка. Для тарировки применялась установка, работающая по следующей схеме. В некоторой замкнутой полости создавались переменные давления, изменяющиеся по гармоническому закону. Эта полость периодически соединялась с обычным статическим манометром или датчиком давления в некоторые соот-



Фиг. 5



Фиг. 6



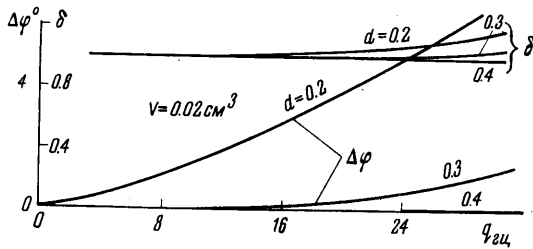
Фиг. 7

ветствующие моменты времени. Через некоторое время статический манометр показывал определенное постоянное давление, равное давлению в полости для указанной фазы. Сравнение этого давления с замеренным тарированной системой дает возможность выявить погрешности измерений.

Авторами была реализована установка, использующая одноцилиндровый шатунно-кривошипный механизм, вал которого связан с перекусным краном золотникового типа (фиг. 3, где 1 — золотниковый кран, 2 — статический манометр, 3 — тарированный датчик). Посредством этого крана полость цилиндра сообщается с манометром.

метром только в момент прохождения поршнем вполне определенного положения, при котором совпадают отверстия в корпусе и золотнике крана. Меняя положение, при котором срабатывает золотниковый кран, можно получить зависимость давления от угла поворота коленчатого вала  $\varphi$  как по показаниям статического манометра через золотниковый кран, так и через исследуемую систему измерения. Отметим, что существенным здесь является только обеспечение зависимости  $p(\varphi)$ , близкой к гармонической. Характер термодинамического процесса в приборе влияния на результаты не оказывает, поскольку при тарировке сравниваются данные одного и того же процесса. Оказалось, что записанные таким образом давления довольно близки к синусоиде (фиг. 4, где сплошной линией проведена синусоида, а точки соответствуют показаниям манометра при  $q = 10$  и  $20$  гц).

На фиг. 5 в качестве примера приведена типичная осциллограмма, получаемая при динамической тарировке индуктивных датчиков давления. Здесь 1 — базисная линия, 2 — отметка времени, 3 — запись хода поршня, 4 — запись давления.



Фиг. 8

4. Влияние различных параметров на погрешность изменений. Проведенные методические исследования индуктивных датчиков давления, предназначенных для замера распределенных нестационарных аэродинамических нагрузок на колеблющихся моделях с частотами колебаний  $q \leq 50$  гц, показали, что фазовые и амплитудные погрешности в сильной степени зависят от величин рабочих объемов датчиков и диаметра входного отверстия датчика.

Пусть  $\delta$  — отношение истинной амплитуды давления к амплитуде, замеренной динамическим датчиком, а  $\Delta\varphi$  — разность между истинным сдвигом фазы и замеренным датчиком.

На фиг. 6 и 7 приведены данные динамической тарировки индуктивных датчиков с различными рабочими объемами  $V$  (от  $0.02$  до  $6$  см<sup>3</sup>) и различными величинами диаметров входных отверстий  $d$  (от  $0.2$  до  $0.8$  мм) при двух значениях частоты процесса ( $10$  и  $30$  гц).

Как видим, увеличение диаметра входного отверстия датчика и уменьшение рабочего объема датчика уменьшают погрешности в определении амплитуд и сдвигов фаз измеряемых величин. Этот же факт имеет место и при уменьшении частоты процесса.

При аэродинамических исследованиях обычно применяются входные дренажные отверстия с диаметром  $0.4$ — $0.8$  мм. Поэтому из приведенных графиков следует необходимость выбора датчика с малым рабочим объемом. Согласно данным фиг. 8, при частотах, не превосходящих  $30$  гц, и диаметре входного отверстия  $d \geq 0.4$  мм для измерений мгновенных давлений при больших дозвуковых и при сверхзвуковых скоростях может применяться датчик с рабочим объемом  $V = 0.02$  см<sup>3</sup>.

Поступило 17 III 1965

## ЛИТЕРАТУРА

1. Белоцерковский С. М., Скрипач Б. К., Табачников В. Г. К определению коэффициентов вращательных производных в аэродинамических трубах. Изв. АН СССР, Механика и машиностроение, 1964, № 3.
2. Белоцерковский С. М. Представление нестационарных аэродинамических моментов и сил при помощи коэффициентов вращательных производных. Изв. АН СССР, ОТН, 1956, № 7.
3. Чарный И. А. Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах. Гостехиздат, 1951.
4. Харкевич А. А. Теория электроакустических аппаратов. Связьиздат, 1940.