

УДК 621.3.049.77

© Д. Г. Грязин, В. Л. Ткалич, К. В. Бочин

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СИЛЬФОНОВ И МЕМБРАН, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ДАТЧИКАХ ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Сделана попытка определения динамической жесткости сильфонов и мембран, применяемых в качестве чувствительных элементов датчиков давления. Предложены результаты экспериментальных исследований характеристики, определяющей динамическую жесткость этих элементов, выполнявшихся при различных условиях. Для проведения исследований разработан специализированный стенд. Рассмотрены вопросы определения гидродинамических коэффициентов (а именно: коэффициентов присоединенных масс и коэффициентов сопротивлений), необходимых для расчетов динамических характеристик упругих чувствительных элементов.

ВВЕДЕНИЕ

Измерительные преобразователи давления нашли широкое применение в устройствах автоматики, системах управления движением подвижных объектов, гидрометеорологических и других приборах. Режимы функционирования датчиков давления определяются особенностями методов измерений, для которых они используются. Широко распространено использование этих датчиков в качестве пороговых устройств, сигнализирующих о выходе измеряемого давления за допустимые пределы. Как правило, в этих приборах датчики работают в режиме статического нагружения.

Наибольший интерес представляет использование указанных датчиков в приборах, метод измерения которых предполагает динамические режимы работы. К числу таких устройств следует отнести гидрометеорологические приборы, измеряющие морское волнение, приборы управления самолетами, измеряющие пульсации давления при срыве потока во время преодоления самолетом звукового барьера, датчики давления нефтепродуктов в продуктопроводах и т.д. К сожалению, как правило, заводы-изготовители датчиков давления не указывают в технических условиях их динамические характеристики, что ограничивает возможности применения датчиков.

Конструкция датчиков давления состоит из чувствительного преобразователя давления в перемещение, например штока, и системы преобразования перемещения в электрический сигнал. В основе этой системы обычно лежат тензометрический, струнный, индуктивный или потенциометрический преобразователи. Следует отметить, что собственная частота тензометрического и потенциометрического преобразователей слабо влияют на частотные характеристики датчика, а собственная частота струнного или индуктивного преобразо-

вателей имеет значение нескольких килогерц. В качестве чувствительного преобразователя давления обычно применяется мембрана, мембранная коробка или сильфон. Очевидно, что указанные чувствительные элементы будут работать при воздействии на них измеряемой среды. В том случае, если среда имеет вязкость, то динамические характеристики датчика могут существенно зависеть и от этого параметра.

В соответствии с ГОСТ [1] полной динамической характеристикой средства измерений является любая из следующих: дифференциальное уравнение, импульсная характеристика, переходная характеристика, передаточная функция, совокупность амплитудной и фазочастотной характеристик. В связи с удобством реализации в автоматике наибольшее распространение получил метод измерения амплитудной и фазочастотной характеристик.

Исследование динамических характеристик упругих чувствительных элементов может производиться и путем принудительного их колебания с известной амплитудой при одновременном измерении силы сопротивления. В этом случае может быть получена такая частная характеристика как отношение амплитуды упругой деформации к вызвавшей эту деформацию силе на различных частотах, т. е. величина, обратная динамической жесткости упругого элемента.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для исследования динамических характеристик сильфонов и мембран была разработана специализированная экспериментальная установка. Установка (рис. 1) состоит из вибростенда 1, на вибраторе которого закреплена балка с установленным на ней динамометром 3. Динамометр представляет собой балку специального профиля, изготовленную из пружинной стали с наклеенным на нее

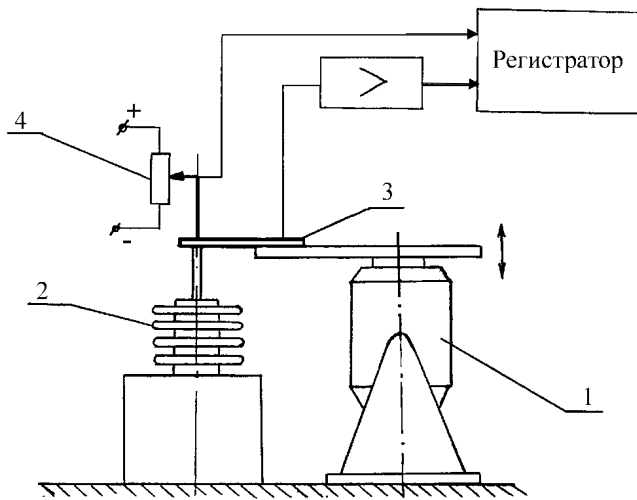


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 — вибростенд, 2 — исследуемый элемент, 3 — тензобалка, 4 — потенциометрический датчик перемещений

тензопреобразователем. К динамометру через шток подсоединен исследуемый упругий чувствительный элемент 2. Таким образом, усилие, создаваемое вибростендом, передается через тензобалку на исследуемый упругий элемент. Для измерения задаваемого перемещения служит потенциометрический преобразователь перемещений 4, движок которого закреплен в точке крепления сильфона. Сигналы датчика перемещений и тензобалки подаются на регистратор, в качестве которого в эксперименте использовался шлейфный осциллограф. Таким образом, при проведении исследований регистрируются задаваемое перемещение, а также сила, пропорциональная перемещению конца тензобалки.

Перед проведением экспериментальных исследований была определена градуировочная характеристика тензобалки. Для этого точка крепления сильфона отклонялась от свободного положения под действием известной массы, при этом регистрировался электрический сигнал с тензобалки. Во время градуировки были произведены три серии измерений. Нелинейность градуировочной характеристики составила 3 %, а суммарная погрешность 4,5 %. Кроме того, была определена градуировочная характеристика датчика перемещений, погрешность которого составила 2 %. После градуировки указанных датчиков была произведена запись частоты свободных колебаний тензобалки, которая составила 160 Гц.

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДАВЛЕНИЯ

Для выполнения исследований были выбраны следующие образцы:

1. Сильфон 24×6×0.11 БрБ2 по ГОСТ 21482 из бериллиевой бронзы, с эф. площадью 3.15 см² и массой 3.7 г.

2. Сильфон 28×8×0.2 12Х18Н10Т по ГОСТ 21482 из нержавеющей стали с эф. площадью 4 см² и массой 7.4 г.

3. Мембрана из бериллиевой бронзы диаметром 56 мм, толщиной 0.1 мм с числом гофров 8 и массой 3.7 г.

На первом этапе производились экспериментальные исследования статических характеристик указанных чувствительных элементов давления. Они производились путем определения их упругих деформаций Z при различном продольном нагружении силой F . Нагружение выполнялось гириями известной массы m , измерение линейных размеров производилось с помощью микрометрического измерителя длины с ценой деления 0.01 мм и погрешностью 0.005 мм. Для исключения влияния на результаты измерений перекосов гофров сильфонов и мембран, обусловленных несимметричностью их нагружения, отсчеты производились в нескольких точках, по образующей исследуемого образца, а затем осреднялись. Жесткость исследуемых элементов составила: первого образца — 11 Н/мм, второго — 16 Н/мм, третьего — 8.3 Н/мм.

Очевидно, что динамические характеристики упругих чувствительных элементов будут зависеть от среды, в которой происходят колебания, в качестве этих сред были выбраны воздух и вода. Использование воды для проведения исследований представляется целесообразным в связи с тем, что ее плотность $\rho = 1 \text{ г/см}^3$, что удобно при пересчете гидродинамических коэффициентов на плотность других сред. Кроме того, при проведении экспериментов исследовалось влияние начального растяжения упругого элемента на его динамические характеристики. Характеристики определялись в диапазоне частот f от 0.5 до 40 Гц. Частота колебаний от 0.5 до 4 Гц задавалась стенду от внешнего низкочастотного генератора, частота от 4 до 40 Гц — от встроенного в вибростенд генератора.

Графики зависимостей $\frac{Z_0}{F}(f)$ (Z_0 — амплитуда деформации), полученные при исследованиях трех чувствительных преобразователей давления, представлены на рис. 2–5.

При проведении экспериментальных исследований было отмечено, что степень распространения колебаний по длине сильфона зависит от амплитуды задаваемых колебаний. Так, при малых

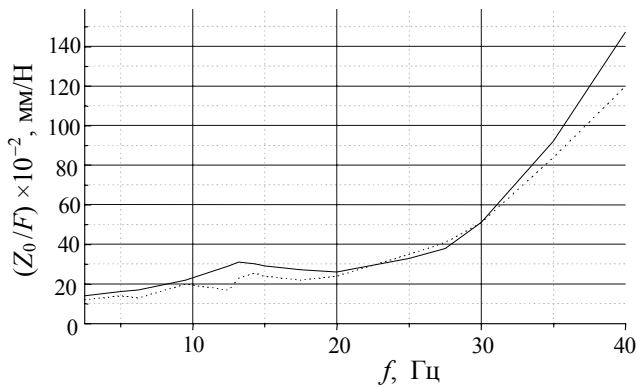


Рис. 2. Сравнение характеристик сиффона первого типа при наличии и отсутствии растяжения:
 ————— сиффон растянут,
 сиффон не растянут

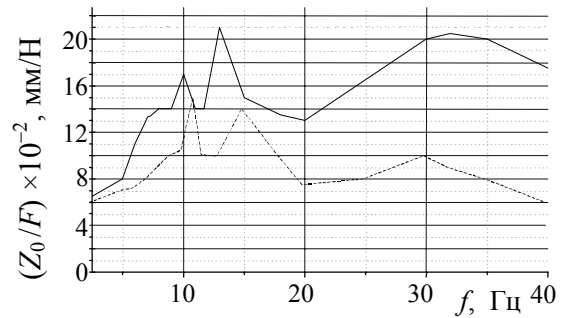


Рис. 5. Характеристики мембраны:
 ————— характеристика в воздухе,
 ----- характеристика в воде

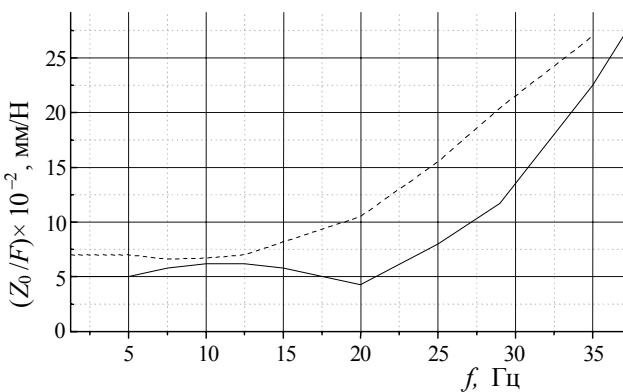


Рис. 3. Характеристики сиффона второго типа, полученные в различных средах:
 ————— характеристика в воздухе,
 ----- характеристика в воде

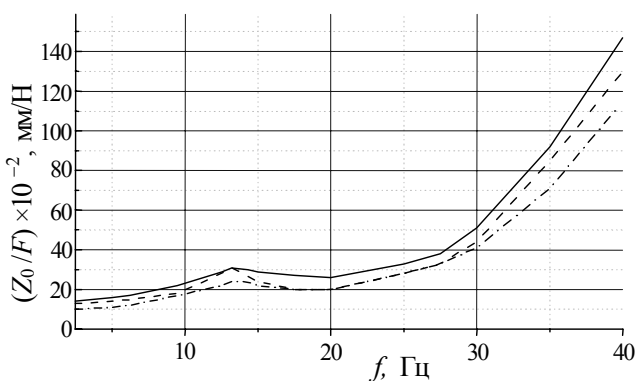


Рис. 4. Характеристики сиффона первого типа, полученные в различных средах:
 ————— характеристика в воздухе,
 ----- характеристика в воде при наличии воздуха внутри сиффона,
 - · - · - характеристика в воде

амплитудах колебаний сиффона второго типа, составляющих около 2 мм, заметно вибрировали лишь два верхних гофра, и лишь при увеличении амплитуды до 5 мм колебания передавались нижнему гофру. Анализ кривых, представленных на рис. 2 и полученных при колебаниях сиффона в воздухе, показывает, что начальное растяжение упругих чувствительных элементов существенно сказывается на их динамических характеристиках, что выражается в сглаживании характеристики в области нижних частот и уменьшении числа вторичных резонансных пиков. Сравнение кривых, полученных при колебаниях образцов в воздухе и воде (рис. 3–5), показывает их существенное различие, причем кривые, характеризующие колебания в воде, лежат ниже характеристик, полученных в воздухе, что объясняется увеличением силы сопротивления в воде. Из рис. 5 хорошо видно, как вторичные резонансные пики на характеристике в воде смещаются в область высоких частот по сравнению с характеристикой в воздухе. Заметим, что эти кривые получены при начальном растяжении сиффонов на 0.5 мм, а мембраны на 0.2 мм. На рис. 4 представлены зависимости $\frac{Z_0}{F}(f)$ для сиффона первого типа. Исследования характеристик этого сиффона производились в трех режимах, при которых сиффон находился в воздухе, воде, а также тогда, когда сиффон был установлен в воде, а во внутренней его полости находился воздух. Из рисунка видно, что характеристика сиффона, полученная в воде при наличии внутри него воздуха, лежит не между двумя другими характеристиками и в разных областях частот приближается или сливается с одной из характеристик, полученных при установке сиффона

целиком в одну из сред. Следует отметить, что все характеристики, полученные в воздухе и воде сближаются в области нижних частот.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ

Очевидно, что для расчета динамических характеристик сильфонов и мембран, работающих в вязкой среде, необходима информация о гидродинамических коэффициентах, которые могут быть получены из экспериментальных данных. Значение коэффициента сопротивления можно найти по разности фаз между задаваемым перемещением и возникающей при этом силой. В том случае, если сила F_0 изменяется гармонически, то она может быть описана простейшим уравнением

$$F_0 = F \sin(\omega t + \delta), \quad (1)$$

здесь F — амплитудное значение силы, δ — сдвиг фаз между силой и перемещением. Преобразуем выражение (1) к виду:

$$F_0 = F \sin \omega t \cos \delta + F \cos \omega t \sin \delta$$

и обозначим $F \cos \delta = F_a$, $F \sin \delta = F_b$.

Сила, возникающая при колебаниях упругого элемента в жидкости, может быть описана уравнением второго порядка

$$(m + \lambda_m) \ddot{Z} + W_B \dot{Z} + CZ = F \sin(\omega t + \delta), \quad (2)$$

здесь m — масса элемента, λ_m — присоединенная масса жидкости, W_B — коэффициент сопротивления. C — жесткость элемента. Решение уравнения (2) ищется в традиционной форме $Z = Z_0 \sin \omega t$, где Z_0 — амплитуда колебаний. После преобразований получим, что член $W_B \dot{Z}$ пропорционален $\cos \omega t$, что позволяет записать равенство

$$W_b Z_0 \omega \cos \omega t = F_b \cos \omega t,$$

которое преобразуется к виду $W_b Z_0 \omega = F_b$, или $W_b Z_0 \omega = F \sin \delta$. Выражая W_b , получим

$$W_b = \frac{F \sin \delta}{Z_0 \omega}. \quad (3)$$

Используя выражение (3), были получены коэффициенты сопротивления в зависимости от скорости V колебаний мембраны и сильфона, которые представлены на рис. 6 и 7.

Для вывода выражения, определяющего значение присоединенной массы воды при колебаниях упругого элемента в воде, воспользуемся уравнением сил. В соответствии с принципом Даламбера можно записать:

$$F_0 - CZ + (m + \lambda_m) \ddot{Z} = 0.$$

Принимая во внимание выражение (1), получим:

$$\lambda_m = \frac{F \cos \delta - CZ_0}{\omega^2 Z_0} - m. \quad (4)$$

Из формулы (4) видно, что значение λ_m в значительной степени зависит от сдвига фаз δ , который должен быть измерен с высокой точностью. Точность выполняемых экспериментальных исследований не позволила обеспечить качественное измерение этого параметра, так как запись реализации производилась на шлейфный осциллограф. Отметим, что выражение для собственной частоты упругих элементов может быть записано в виде

$$\omega_c = \sqrt{\frac{C}{m + \lambda_m}}.$$

Как было указано ранее, значение C составляет от 8 до 16 Н/мм, при этом масса элементов составляет от 3 до 7 грамм, кроме того, известно [2], что значение присоединенной массы цилиндрических тел и круглых пластин при их колебаниях в воде лежат в пределах 0.5–0.8 m . Таким

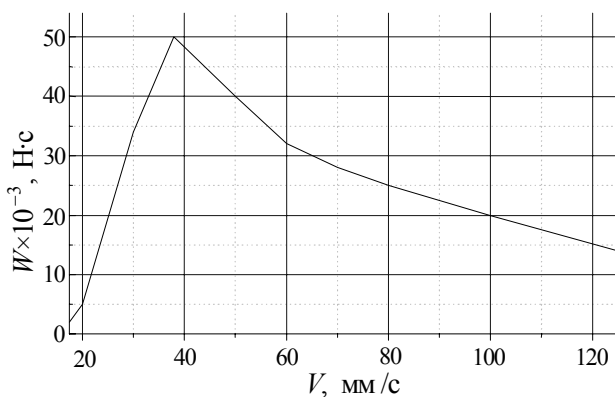


Рис. 6. Зависимость сопротивления от скорости для мембраны в воде

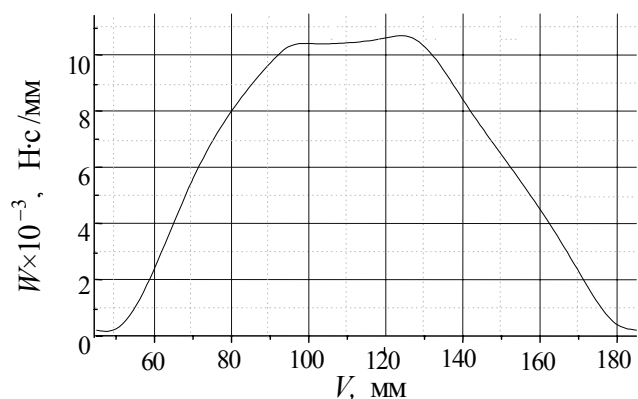


Рис. 7. Зависимость сопротивления от скорости в воде для сильфона первого типа

образом, значение λ_m не окажет существенного влияния на линейность характеристики в области рабочих частот, и для инженерного расчета АЧХ целесообразно воспользоваться справочными данными.

ВЫВОДЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Особенности, отмеченные при анализе кривых, представленных на рис. 2–5, позволяют сделать вывод о значительном параметрическом резонансе, возникающем при колебаниях упругих чувствительных элементов сложной формы, и влиянии рабочей среды на характеристики этого резонанса. Указанный параметрический резонанс обусловлен жесткостью отдельных элементов, составляющих поверхность сильфонов и мембран, возбуждаемых при колебаниях местами их заделки. Жесткость этих элементов в свою очередь определяется как их линейными размерами и точками изгиба, так и погрешностью изготовления формы и толщиной каждого из этих элементов. Указанное явление по-

зволяет говорить о невозможности сопоставления жесткости сильфонов и мембран в статическом режиме с их динамической жесткостью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 8.256 Нормирование и определение динамических характеристик аналоговых средств измерений. С. 8.
2. *Короткин А.И.* Присоединенные массы судна. Справочник. Л.: Судостроение, 1986. 312 с.

Санкт-Петербургский государственный институт точной механики и оптики (Технический университет)

Материал поступил в редакцию 19.05.2000.

STUDY OF CHARACTERISTICS OF BELLOWS AND MEMBRANES USED IN PRESSURE SENSORS FOR DYNAMIC MEASUREMENTS

D. G. Gryazin, V. L. Tkalich, K. V. Bochin

Saint-Petersburg State Institute of Fine Mechanics and Optics (Technical University)

An attempt is made to determine dynamic rigidity of bellows and membranes used as detector elements for pressure sensors. The results of experimental studies of characteristics defining dynamic rigidity of these elements obtained under different conditions are offered. A special-purpose stand is designed to perform the studies. The questions of determination of hydrodynamic factors required to calculate dynamic characteristics of elastic detector elements are considered.