

УДК 531.787

**ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДАВЛЕНИЯ**

*Жилин В. Г., Ивочкин Ю. П., Огородников В. П.,  
Осинов В. В.*

Представлены результаты разработки и испытаний оптико-механического преобразователя давления высокой чувствительности, в котором малые перемещения отражающей свет мембраны преобразуются в электрический сигнал. Обоснован выбор стекла в качестве наиболее подходящего материала для чувствительных элементов (мембран) таких датчиков. Приведены результаты испытаний волоконно-оптического преобразователя. Получены статические, динамические и температурные характеристики конкретной конструкции преобразователя давления с диаметром мембраны 1,8 мм. Рабочий диапазон измерения давления 0–200 Па. Резонансная частота мембраны  $f_{рез} \approx 4$  кГц. Зависимость характеристик преобразователя давления от температуры в диапазоне температур 20–90°С не обнаружена. Измерения распределения осредненной скорости в осесимметричной турбулентной струе с помощью оптико-механического преобразователя давления с насадком, изготовленным в виде трубки Пито, показали хорошее соответствие с опытными данными других авторов.

Несмотря на большое разнообразие аппаратуры для измерений давления [1–3], измерение малых переменных во времени перепадов давления связано с большими, в ряде случаев еще не преодоленными, трудностями.

По нашему мнению, сейчас лучшими преобразователями давления являются конденсаторные микрофоны фирмы «Брюл и Къер», используемые в аппаратуре для измерения давления компании «Диза — Электроник». В качестве чувствительных элементов в этих микрофонах используется тонкая (2 или 6 мкм) металлическая мембрана, образующая вместе с плоским электродом конденсатор, емкость которого зависит от межэлектродного зазора и, следовательно, от прогиба мембраны под действием приложенного перепада давления. Однако хорошие динамические характеристики этой аппаратуры связаны не столько с качествами самого первичного преобразователя, сколько с совершенством вторичной электронной аппаратуры, обеспечивающей частотную модуляцию и усиление весьма слабого электрического сигнала и коррекцию амплитудно-частотной характеристики. Следует также иметь в виду зависимость сигнала таких преобразователей от диэлектрической проницаемости рабочей среды и трудность их защиты от электромагнитных помех. Весьма желательно также уменьшение размеров преобразователей, так как только при размещении преобразователя непосредственно в точке измерения может быть достигнуто высокое временное разрешение. Применение протяженных импульсных линий существенно ухудшает динамические характеристики аппаратуры [4]. Учитывая сказанное, можно сформулировать следующие требования к мембранным преобразователям давления.

1. При заданной чувствительности, определяемой условиями эксперимента и свойствами системы измерения прогиба мембраны, преобразователь должен обладать минимально возможными размерами. Отсюда следует, что материал мембраны должен допускать изготовление мембран минимальной толщины со стабильными упругими свойствами.

2. Резонансная частота мембраны должна быть при прочих равных условиях наивысшей.

3. Система регистрации прогиба мембраны должна обладать высокой чувствительностью, но не требовать сложной вторичной аппаратуры.

Условия 1, 2 позволяют получить критерий оптимизации выбора материала упругой мембраны.

Прогиб  $y$  в центре круглой упругой мембраны диаметром  $2r_0$  и толщиной  $h$ , защемленной по контуру, линейно зависит от перепада давления  $p$  и может быть определен по формуле [5]

$$y = \frac{3}{16} p \frac{1 - \mu^2}{E h^3}, \quad (1)$$

где  $\mu$  и  $E$  — соответственно коэффициент Пуассона и модуль упругости материала.

В рамках данного рассмотрения считаем заданными чувствительность  $y/p$  и толщину мембраны (последняя должна быть минимально возможной и определяться только возможностями технологии). Следовательно, будем в дальнейшем считать заданной и постоянной величину

$$16yh^3/3p = C_1.$$

Тогда

$$r_0^2 = C_1^{1/2} E^{1/2} (1 - \mu)^{-1/2}.$$

Частота собственных колебаний мембраны (первый резонанс) определяется согласно [5] как

$$f_{\text{рез}} = \frac{10,21 \cdot h}{r_0^2} \left( \frac{E}{12(1 - \mu^2)\rho} \right)^{1/2} = C_2 \rho^{-1/2}, \quad (2)$$

где  $\rho$  — плотность материала мембраны.

Следовательно, при принятых допущениях резонансная частота мембраны тем выше (и материал ее тем лучше), чем меньше ее плотность.

На рис. 1 проведено сравнение с этой точки зрения ряда металлов и стекла. Наиболее перспективными материалами являются алюминий и стекло. Однако у стекла существуют дополнительные преимущества перед металлами: технологичность, стабильность упругих свойств и чрезвычайно слабая их зависимость от температуры [6]. Поэтому в качестве материала для мембран преобразователей давления выбрано стекло. Перспективные при таком подходе пластмассы и резины исключены из рассмотрения ввиду их нетехнологичности и малой термостабильности. Нами разработана технология получения тонких (толщиной 1—3 мкм) стеклянных мембран.

Система преобразования прогиба мембраны в электрический сигнал должна сочетаться с материалом мембраны и не требовать специальных ее покрытий, ухудшающих динамические характеристики преобразователя. С нашей точки зрения, наиболее подходящим является волоконно-оптический преобразователь прогиба мембраны в электрический сигнал. В настоящее время имеются работы [7—12], где использован такой метод. Суть его заключается в следующем (рис. 2). Параллельно поверхности мембраны  $3$  располагается плоский торец пучка большого числа волоконных световодов  $2$ , часть из которых связана с источником света  $1$ , а остальные — с фотоумножителем  $4$ . Количество света, попадающего в фотоприемник, зависит от расстояния  $h$  между торцом пучка световодов и отражающей свет мембраной.

Характер этой зависимости показан на рис. 3. Ее максимум, как показали специальные измерения при различных диаметрах световодов, имеет место на расстоянии, близком к диаметру световодов, из которых состоит

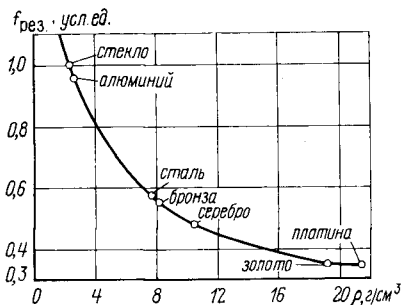


Рис. 1

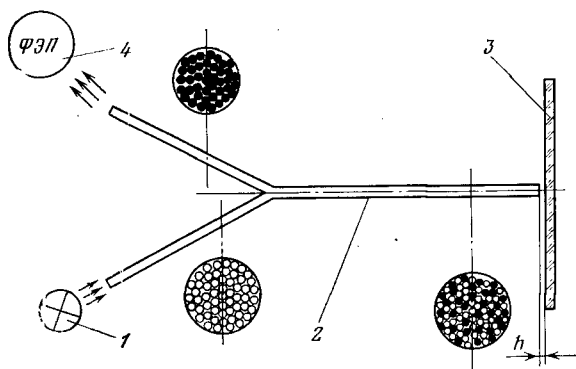


Рис. 2

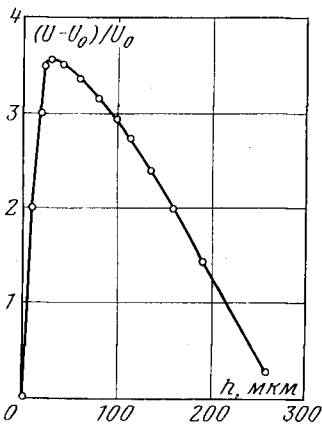


Рис. 3

пучок. В отличие от [8], нами использовалась восходящая ветвь зависимости, обеспечивающая более высокую чувствительность преобразователя. Очевидно также, что чувствительность к перемещению возрастает при уменьшении диаметра отдельного световода.

С учетом высказанных соображений изготовлен и подвергнут различным испытаниям микропреобразователь давления, конструкция которого схематически показана на рис. 4. Стеклопленочная мембрана 1 (толщиной  $\sim 1$  мкм) напаяна на торец стеклянного капилляра 2 диаметром 1,8 мм. Торец пучка световода 3, состоящий из волокон диаметром 25 мкм, находился на расстоянии 15 мкм от мембраны. Источник света — малогабаритная лампочка накаливания размещен в державке датчика. В качестве приемника света использовался фотоумножитель ФЭУ-38, сигнал которого измерялся высокоомным цифровым вольтметром Ф-30. Тарировочная кривая, приведенная на рис. 5, показывает, что этот микропреобразователь давления обладает высокой чувствительностью и может быть использован в диапазоне давлений от 0 до 20 мм  $H_2O$ . Характеристика с точностью, не превышающей погрешности вторичной аппаратуры, воспроизводилась при многократных измерениях и не изменялась при варьировании температуры окружающей среды в пределах от 20 до 90° С.

С помощью акустического динамика, питаемого от звукового генератора, определялась резонансная частота мембраны датчика. Амплитудное значение сигнала датчика измерялось с помощью осциллографа. Результаты этого эксперимента показаны на рис. 6. Первый резонанс наблюдается при частоте  $\sim 4$  кГц. Для сравнения отметим, что оценки по формуле (2) резонансных частот металлических мембран наиболее совершенных конденсаторных микрофонов фирмы «Брюл и Кьер» дают следующие значения. Для микрофона типа 4135 (толщина мембраны  $h=2$  мкм)  $\sim 0,5$  кГц, для типа 4136 ( $h=6$  мкм)  $\sim 1,5$  кГц. При этом считалось, что

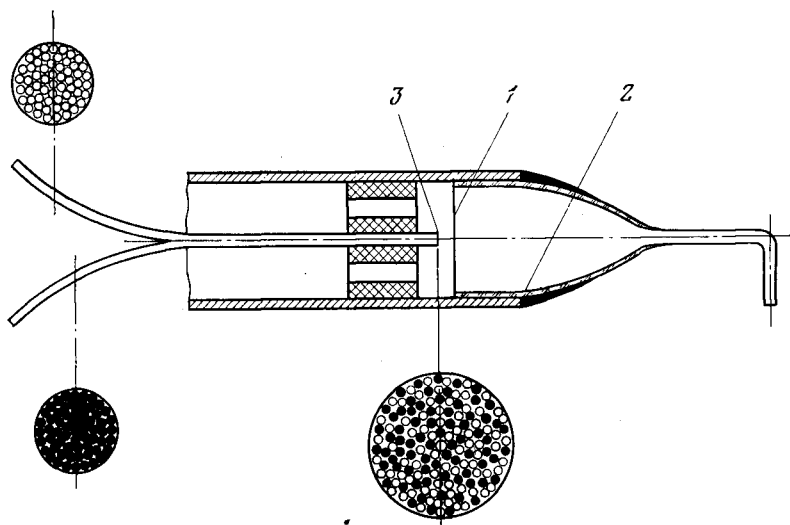


Рис. 4. Конструкция оптико-механического преобразователя давления

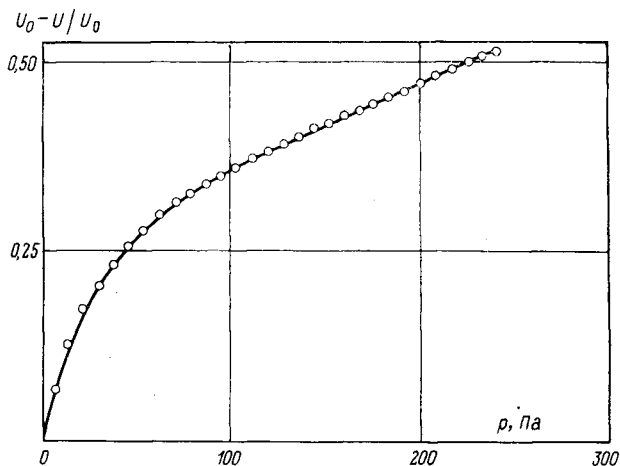


Рис. 5

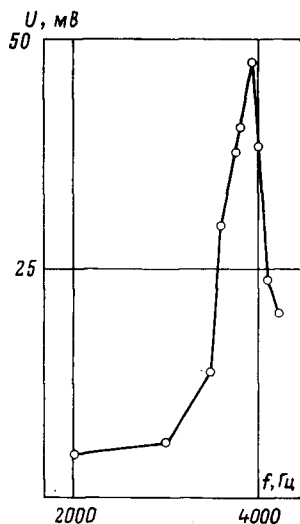


Рис. 6

Рис. 5. Статическая тарировка оптико-механического преобразователя давления

Рис. 6. Результаты динамического испытания оптико-механического преобразователя давления

Рис. 7. Измеренное распределение средней скорости в турбулентной затопленной струе на расстоянии 12 калибров от среза сопла: 1 — эксперимент; 2 — данные [13]

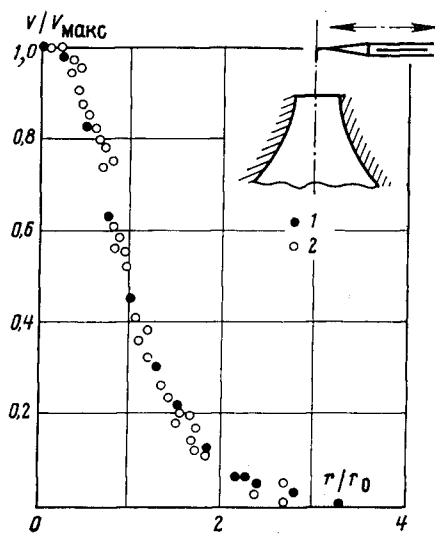


Рис. 7

предварительное натяжение мембран отсутствует. Впрочем, предварительное натяжение не может существенно улучшить качество преобразователя, поскольку возрастание резонансной частоты сопровождается уменьшением чувствительности мембраны.

Нами использовалась мембрана без дополнительных отражающих покрытий. Коэффициент отражения такой мембраны можно оценить (по нижнему пределу) по известной формуле для нормального падения света

$$R=2(n-1/n+1)^2,$$

где  $n$  — коэффициент преломления материала мембраны. Характерные значения:  $n=1,5$ ;  $R \approx 8 \cdot 10^{-2}$ . Эта величина может быть увеличена почти до единицы нанесением отражающих покрытий, однако при этом уменьшится собственная частота. Поэтому при использовании датчика в газовых средах с  $n \approx 1$  покрытия нецелесообразны. Если одна из поверхностей мембраны находится в контакте с более оптически плотной средой, то в предельном случае равенства коэффициентов преломления среды и материала мембраны величина  $R$  уменьшится вдвое. Однако это также еще не уменьшает чрезвычайно световой поток и не требует применения специальных сложных устройств для освещения и регистрации светового потока.

Описанный преобразователь давления использовался в качестве приемника давления в трубке Пито, с помощью которой было измерено распределение скорости в турбулентной затопленной струе азота на расстоянии 12 калибров от среза сопла. Результаты измерений показаны на рис. 7 в сопоставлении с данными [13]. Используются обычные автомобильные переменные: по оси ординат — отношение локальной скорости к максимальной на оси струи, по оси абсцисс — отношение текущего радиуса  $r$  к радиусу  $r_0$ , на котором скорость уменьшается в два раза по сравнению с максимальной. Полученные результаты хорошо согласуются с данными прежних измерений.

Приведенные статические, динамические и температурные характеристики свидетельствуют о работоспособности волоконно-оптического преобразователя давления, который по своим параметрам вполне может конкурировать с лучшими существующими образцами, выгодно отличаясь от них высоким уровнем выходного сигнала ( $\sim 10-10^2$  мВ), простотой конструкции вторичной регистрирующей аппаратуры.

Институт высоких температур  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
8 XII 1978

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Электрические измерения неэлектрических величин (под ред. П. В. Новицкого). «Энергия», Л., 1975.
2. И. Л. Повз. Аэродинамический эксперимент в машиностроении. «Машиностроение», Л., 1974.
3. M. Combe. Techn. mes. esoul. Cycle conf. Ermenonville, 1973, Paris, 1974, p. 281.
4. DISA Information, № 7, January, 1969.
5. А. П. Филиппов. Колебания деформируемых систем. «Машиностроение», 1970.
6. А. Ф. Зак, Ю. П. Манько. ЖТФ, 24, 1983, 1954.
7. R. Strack. Патент США № 3580082 кл. 73-406, 1972.
8. Паслер, Робертс мл. Конструирование и технология машиностроения, 99, № 1, 1977.
9. C. R. Harell, S. L. Engel. J. Scient. Instrum., Ser. 2, 2, 110, 1969.
10. T. R. Hsu, R. G. Moyer, F. B. Bank. J. Scient. Instrum., Ser. 2, 2, 1132, 1969.
11. A. Ramirez, H. B. Hood, Jr., M. Polyani, R. Wagner, N. A. Yankopoulos, W. H. Abelman. J. Appl. Physiology, 26, № 5, 1969.
12. G. W. Margerum, MS thesis, Naval Post Graduate School, Monterey, June, 1972.
13. Бай Шу-и. Теория струй. ИЛ, 1960.