

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ ДО 1 ГПа НА ИМПУЛЬСНОЙ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ УСТАНОВКЕ

В. Н. Рычков

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск

Описана конструкция манганинового датчика для измерения давлений до 1 ГПа, предназначенного для работы в наиболее напряженных местах импульсного источника рабочего газа газодинамической установки. Приведена электрическая схема для измерения и регистрации давления. Работу датчика в условиях реального цикла подготовки и вытеснения рабочего газа на адиабатической установке А-1 демонстрирует осциллограмма одного из экспериментов.

В газодинамическом эксперименте на импульсных аэродинамических установках практически всегда возникает потребность измерять давление в форкамере, поскольку это позволяет независимо контролировать и оценивать параметры потока в рабочей части. Это необходимо также потому, что не всегда удается внедрить датчики для измерения давления непосредственно в поток, заметно не возмущая рабочей среды.

В процессе эксплуатации импульсных аэродинамических установок типа Hotshot, Longshot и ударных аэродинамических труб [1], а также установок адиабатического сжатия газа с тяжелым поршнем [2] при измерении давлений P_0 в форкамере возникают специфические трудности. На датчик воздействует газ с быстро меняющимся давлением высокой интенсивности (до 200 МПа) и температурой до 2000–4000 К. На установках сверхвысокого давления [3] эти трудности еще более возрастают, поскольку рабочее давление в форкамере достигает 1–1,5 ГПа, что в 5–10 раз превышает рабочие давления на обычных импульсных аэродинамических установках.

Время рабочего режима t_z на импульсных аэродинамических установках находится в интервале от 0,01 до 0,3 с и более. В течение этого времени датчик оказывается под воздействием химически агрессивного газа высокой температуры и плотности. Часто размер рабочего пространства, доступного для размещения датчика в форкамере, очень мал (менее 0,06 см³) [3, 4].

Измерения осложняются при давлении более 500 МПа, поскольку практически невозможно рабочий газ из форкамеры вывести к датчику даже через капиллярный канал, как это, например, сделано на импульсных установках типа Hotshot [1]. Наличие такого канала приводит также к заметному ухудшению динамических характеристик измерительного тракта системы. Решить эту проблему удастся с помощью специальных компактных электровводов 6 (рис. 1), которые позволяют работать с высокими давлениями. Такие электровводы изготавливаются обжатием корпуса 5 с помощью взрыва. Метод описан в [5]. В качестве изолятора используется фарфоровая термопарная соломка 3. Многократное использование сопловой пробки с этими электровводами и датчиками давления и температуры в динамическом режиме при давлениях до 1 ГПа и температурах до 1700 К показало высокую надежность такого устройства. На рис. 1 можно видеть расположение и других элементов сопловой пробки: сопловой вставки 4, датчика давления 1, проволочного измерителя температуры 2.

Для измерения давления применялся метод, основанный на изменении сопротивления манганиновой проволоки при ее объемном обжатии [6]. Датчик из такой проволоки обладает рядом положительных качеств:

1. Изменение сопротивления линейно в диапазоне давлений от 0 до 3 ГПа [7] (нелинейность менее 1%).

2. Достаточно низкий температурный коэффициент сопротивления ($\alpha_T < 10^{-7} \div 10^{-8} \text{ K}^{-1}$ при комнатной температуре) [8] при нагреве проволоки заметно растет и при $T = 100^\circ \text{C}$ увеличивается на два порядка.

3. Манганиновая проволока широко применяется в промышленности, имеет стабильные характеристики и довольно высокое удельное сопротивление. Так, у проволоки диаметром 0,05 мм погонное сопротивление 2,63 Ом/см, что позволяет делать малогабаритные датчики с достаточно высоким сопротивлением.

4. Манганин имеет относительно высокий коэффициент пьезочувствительности ($\alpha_p = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ МПа}^{-1}$), что позволяет надежно использовать его при $P_0 \geq 100 \text{ МПа}$. При применении мостовой схемы включения с одним активным датчиком величина полезного сигнала, снимаемого с моста, составляет $U_{\text{вых}} = (\Delta R/R_0)U_0/4 = (\alpha_p P_0 R_0/R_0)U_0/4 = (\alpha_p P_0)U_0/4$. Например, если для питания моста использовать $U_0 = 20 \text{ В}$, то при рабочем давлении $P_0 = 1 \text{ ГПа}$ получим $U_{\text{вых}} = 0,122 \text{ В}$. Сигнал такого уровня легко и с высокой точностью регистрируется современными измерительными системами.

5. Манганиновые датчики в отличие от пьезодатчиков позволяют проводить статическую тарировку измерительной системы.

Схема миниатюрного датчика, предназначенного для работы в условиях малоразмерной форкамеры аэродинамической установки, показана на рис. 2. На каркас из стеклотекстолита 6 наматывается бифилярно внавал изолированная проволока 5 диаметром 0,05 мм (сопротивление до 500 Ом). Датчик крепится на пробку 7 между электропроводами 8, к ним припаиваются выводы 9. Защитный колпачок 4, заполненный маслом 3, надевается на датчик и прижимается к пробке накладкой 2. В дренажной полости помещается несколько слоев (3–4) медной сетки 1, которая, как показали эксперименты, обеспечивает хорошее охлаждение газа, воздействующего на датчик даже при времени измерения больше 0,7 с.

Такая конструкция датчика во время опыта (порядка 0,5 с и более) надежно защищает его от воздействия высокотемпературного газа и обеспечивает измерение давления в форкамере с хорошим быстродействием и точностью. Отсутствие заметного прогрева датчика демонстрирует осциллограмма рабочего цикла рис. 3, где практически не фиксируется смещение нулевой линии после окончания процесса.

Наличие колпачка, имеющего определенную жесткость, приводит к тому, что измеряемое давление $P_{0(i)}$ отличается от P_0 на величину ΔP_0 ($P_{0(i)} = P_0 - \Delta P_0$). Величина ΔP_0 определяется упругопластической деформацией колпачка и зависит от его конструкции и материала. Чтобы уменьшить эту дополнительную погрешность измерения P_0 до уровня $\Delta P_0/P_0 \leq 1\%$, используются колпачки (цилиндры эллиптической формы) из мягкой

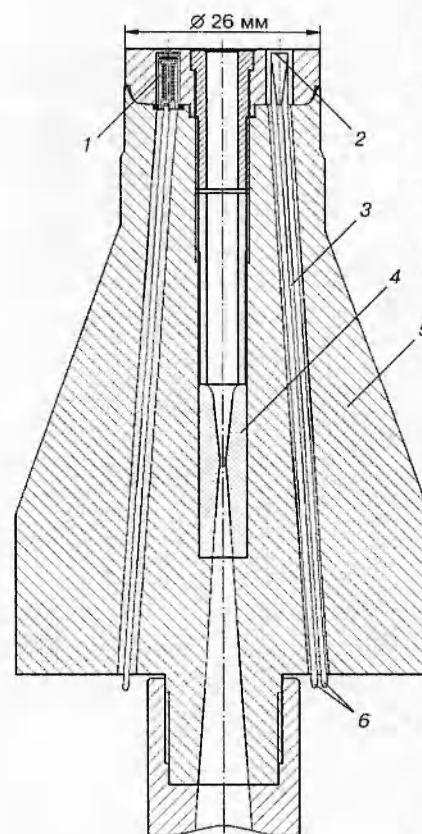


Рис. 1

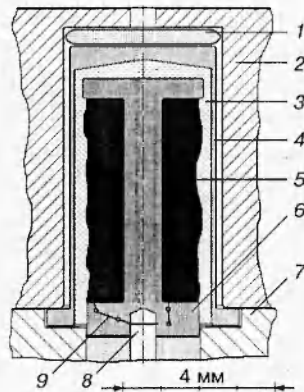


Рис. 2

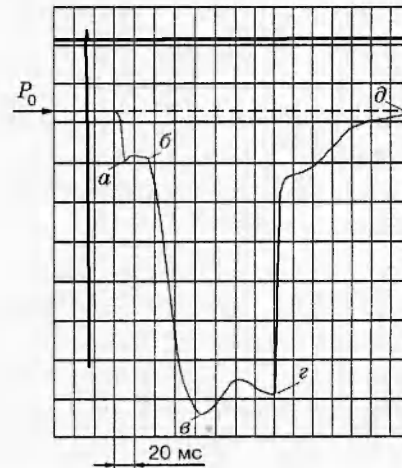


Рис. 3

латуни или стали с толщиной стенки меньше 0,1 мм.

Под действием давления P_0 уменьшение объема масла составит

$$\Delta V_m = V_m \chi_m P_0,$$

где χ_m — коэффициент сжимаемости масла. При комнатной температуре он равен $0,7 \div 0,4 \text{ ГПа}^{-1}$ и уменьшается с увеличением давления.

Коэффициент уменьшения объема колпачка эллиптической формы (см. [9]) имеет величину:

$$\chi_k = 0,157[12(1 - \mu^2)(1 - b^2/a^2)/\pi E](a/h)^3(a/b),$$

где E — модуль Юнга; μ — коэффициент Пуассона; a и b — большая и малая полуоси эллипса; h — толщина стенки ($h \ll a$). Если, например, $a = 4 \text{ мм}$, $b = 3 \text{ мм}$ и $h = 0,1 \text{ мм}$, то для стали $\chi_k \approx 10,2 \text{ ГПа}^{-1}$. В итоге имеем $\chi_m/\chi_k \approx 0,07 \div 0,04$. Поэтому упругость колпачка заметно не влияет на показания датчика.

Для кратковременных режимов ($t_3 < 0,2 \text{ с}$) может применяться колпачок из фторопласта, модуль Юнга которого много меньше, чем у латуни, и поэтому влияние колпачка становится вообще малозаметным. Для такого колпачка даже для обычного цилиндра с толщиной стенки около 0,2 мм $\chi_k \geq 30 \text{ ГПа}^{-1}$ и $\chi_m/\chi_k \leq 0,01$.

На рис. 3 приведена осциллограмма, которая демонстрирует работу датчика в условиях реального цикла подготовки и вытеснения рабочего газа на адиабатической установке А-1 [3]. Скачок a — рост давления (до $\approx 140 \text{ МПа}$) при работе первой ступени. Участок a - b — время пуска второй ступени, b - b' — вторичное сжатие до 885 МПа, b' - e — рабочий

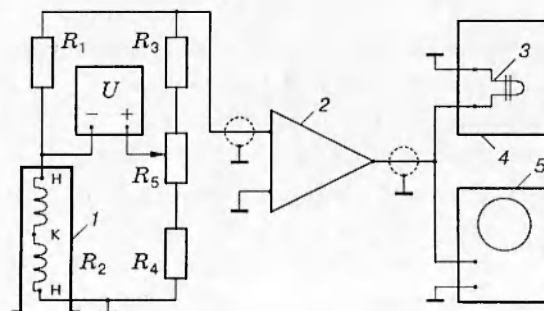


Рис. 4

цикл квазистационарного истечения. Датчик фиксирует колебания давления, возникающие вследствие резонансных явлений в системе энергообеспечения. Точка g отражает момент остановки вытесняющего поршня. После спада давления (за точкой d) фиксируется не сместившаяся нулевая линия.

Вариант блок-схемы для измерения и регистрации давления P_0 приведен на рис. 4. Датчик 1 включен в одно из плеч моста (n, k — соответственно начало и конец бифилярно намотанной катушки датчика давления). Усилитель 2 служит для согласования выходного сопротивления моста с сопротивлением нагрузки 3. В качестве регистрирующего прибора 4 можно использовать шлейфовый осциллограф Н-115 или Н-117 (сопротивление шлейфа порядка 20 Ом) или электронный осциллограф с запоминанием 5, например С 8-17 или С 9-16.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Lokasiewicz J.** Experimental Methods of Hypersonics. N. Y.: Marcell Dekker, Inc., 1973.
2. **Топчийн М. Е., Харитонов А. М.** Аэродинамические трубы для гиперзвуковых исследований (достижения, проблемы, перспективы) // ПМТФ. 1994. Т. 35, № 3. С. 66–81.
3. **Пинаков В. И., Рычков В. Н., Топчийн М. Е.** Возможности моделирования гиперзвуковых потоков на газодинамических установках адиабатического сжатия с высокими давлениями // ПМТФ. 1982. № 1. С. 63–69.
4. **Пинаков В. И.** Динамика, прочность элементов и обоснование схемы импульсной аэродинамической трубы: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск: Ин-т гидродинамики, 1984.
5. **Топчийн М. Е., Пинаков В. И., Рычков В. Н. и др.** Исследование процессов, сопровождающих сжатие газа в первой ступени установки А-1: Отчет о НИР (по теме № 123-74) / СО АН СССР. Ин-т гидродинамики и СКБ гидроимпульсной техники. Новосибирск, 1975.
6. **Циклис Д. С.** Техника физико-химических исследований при высоких и сверхвысоких давлениях. М.: Химия, 1976.
7. **Агейкин Д. И.** Приборы контроля и регулирования. М.: Машиностроение, 1965.
8. **Бойко Н. А., Звездин П. С., Резник Л. Б.** Измерение давлений при быстропроходящих процессах. М.: Энергия, 1970.
9. **Девидсон Т. Э., Кендалл Д. П.** Механические свойства материалов под высоким давлением. М.: Мир, 1976.

Поступила в редакцию 25/III 1997 г.
