

**ВЛИЯНИЕ ОТКЛОНЕНИЯ ОТ ЦИЛИНДРИЧНОСТИ
ЗАЗОРА МЕЖДУ ПОРШНЕМ И ЦИЛИНДРОМ
НА ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ НОМИНАЛЬНО
ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОРШНЕВОЙ ПАРой
ИЗ СОСТАВА ГРУЗОПОРШНЕВОГО МАНОМЕТРА**

А.Э. Асланян

*ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия,
andrey_aslanyan@vniiftri.ru*

Аннотация. Статья описывает влияние нецилиндричности зазора между поршнем и цилиндром в номинально цилиндрических поршневых парах на метрологические характеристики грузопоршневых манометров.

Ключевые слова: поршневая пара, высокое давление, эффективная площадь.

**THE EFFECT OF DEVIATION FROM THE CYLINDRICITY
OF THE GAP BETWEEN THE PISTON AND THE CYLINDER
ON THE REPRODUCTION OF PRESSURE BY A NOMINALLY
CYLINDRICAL PISTON PAIR FROM THE COMPOSITION
OF A PISTON-CYLINDER PRESSURE GAUGE**

A.E. Aslanyan

*FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo, Moscow region, Russia,
andrey_aslanyan@vniiftri.ru*

Abstract. The article describes the effect of the non-cylindrical gap between the piston and the cylinder in nominally cylindrical piston pairs on the metrological characteristics of piston-cylinder pressure gauges.

Keywords: piston-cylinder gauge, high pressure, effective area.

В грузопоршневых манометрах узлом, воспроизводящим давление, является поршневая пара. Для воспроизведения давлений до 400 МПа применяют номинально цилиндрические поршневые пары без противодействия, в которых зазор между поршнем и цилиндром равен постоянной величине по всей длине цилиндра. Воспроизводимое давление определяется как отношение силы, действующей на поршень, к эффективной площади.

Эффективная площадь такой поршневой пары рассчитывается по формуле [1]:

$$S_{\text{эф}} = \pi r^2 \left(1 + \frac{H_0}{r} p_0 (0,5k_1 + k_2 + 0,5k_3 + k_4) \right), \quad (1)$$

где r — радиус поршня; H_0 — зазор между поршнем и цилиндром; p_0 — подпоршневое давление.

$$k_1 = -\frac{(1 - \mu_p)}{E_p}; \quad k_2 = \frac{\mu_p}{E_p}; \quad k_3 = \frac{1 + (r/R)^2}{1 - (r/R)^2} + \mu_c; \quad k_4 = 0,$$

где μ_p — коэффициент Пуассона поршня; E_p — модуль Юнга поршня; R — внешний радиус цилиндра; μ_c — коэффициент Пуассона цилиндра; E_c — модуль Юнга цилиндра.

При изготовлении поршневой пары неизбежно возникают отклонения от цилиндричности зазора между поршнем и цилиндром. Это связано с технологическими особенностями притирания цилиндра и поршня. В настоящее время отклонения от цилиндричности зазоров поршневых пар никак не нормируются и не проверяются. При этом в реестре средств измерений есть грузопоршневые манометры с пределами погрешности $\pm 0,005$ % от воспроизводимого давления, которые, согласно Государственной поверочной схеме, могут применяться в качестве рабочих эталонов. Математическое моделирование влияния отклонений от цилиндричности поршневых пар на воспроизводимое давление показало существенное влияние профиля зазора на метрологические характеристики грузопоршневых манометров. Для моделирования была выбрана поршневая пара из состава грузопоршневого манометра утверждённого типа. Данные о поршневой паре приведены в таблице.

Таблица

Исследуемая поршневая пара

Материал поршня	Карбид вольфрама
Материал цилиндра	Карбид вольфрама
Рабочая жидкость	Вакуумное масло ВМ-1
Радиус поршня	1,26 мм
Внешний радиус цилиндра	3,78 мм
Максимальное воспроизводимое давление	100 МПа
Длина цилиндра	75 мм

Давление в зазоре поршневой пары меняется от максимального (в крайней нижней точке зазора) до атмосферного (в крайней верхней точке зазора). Закон изменения давления определяется системой уравнений [2]:

$$\frac{dp}{dz} = -Q \frac{6\eta_0 e^{c(p_0 - p(z))}}{\pi r (1 + k_1 p(z) + k_2 p_0) \rho_0 (1 + \gamma(p(z) - p_0)) (H_0(z) + p(z)k - p_0 k')^3}, \quad (2)$$

$$k = r(k_3 - k_1); \quad k' = r(k_2 - k_4); \quad p(0) = p_0; \quad p(L) = p_a,$$

где z — продольная координата, направленная по оси цилиндра вверх от точки с подпоршневым давлением p_0 до точки с атмосферным давлением p_a ; Q — расход жидкости через зазор; η_0 — вязкость жидкости при подпоршневом давлении; c — пьезокоэффициент вязкости; ρ_0 — плотность рабочей жидкости при подпоршневом давлении; γ — коэффициент сжимаемости жидкости; L — длина цилиндра; p_a — атмосферное давление.

Зазор между поршнем и цилиндром до деформации в точке $z = 0$ (далее — начальный недеформированный зазор) принимался равным 0,5; 1; 2 мкм. Для каждого начального недеформированного зазора моделировалось отклонение от цилиндричности в виде конусного расширения в область зазора с атмосферным давлением. Отклонение от цилиндричности зазора между поршнем и цилиндром (ξ) определялось как отношение разности зазора до деформации поршневой пары в точках $z = L$ и $z = 0$ к начальному недеформированному зазору. Рассматривалось увеличение недеформированного зазора в верхней части на 6,25; 12,5; 25; 50; 100; 200; 300; 400 % от начального недеформированного зазора. Так как в рамках модели зазор между недеформированным поршнем и цилиндром зависит от продольной координаты, то уравнение (2) не решается аналитически. Распределения давления в зазорах (рис. 1, 2) определялись путём решения уравнения (2) численным методом Адамса — Мултона — Башфорта [3].

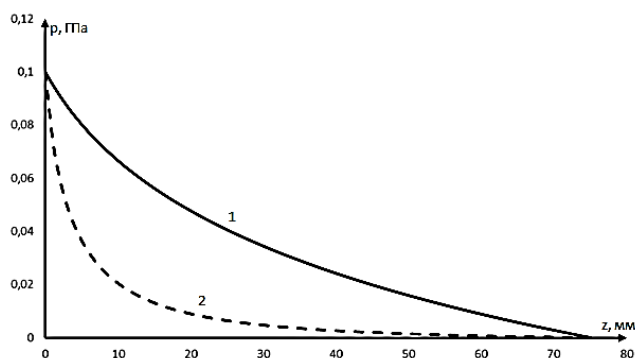


Рис. 1. Распределение давления в зазоре поршневой пары для разных отклонений от цилиндричности: 1 — отклонение от цилиндричности 6,25 %; 2 — отклонение от цилиндричности 400 %

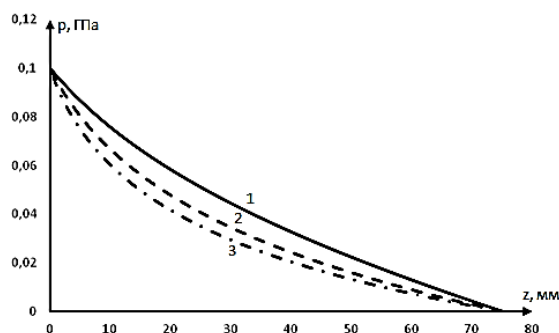


Рис. 2. Распределение давления в зазоре поршневой пары для отклонения от цилиндричности 6,25 % и разных начальных недеформированных зазоров: 1 — начальный недеформированный зазор составляет 0,5 мкм; 2 — начальный недеформированный зазор составляет 1 мкм; 3 — начальный недеформированный зазор составляет 2 мкм

Эффективная площадь поршневой пары в общем случае определяется формулой из [1]:

$$S'_{\text{эф}} = \pi r^2 (1 + p_0 (0,5k_1 + k_2 + 0,5k_3 + k_4) + \int_L^0 \frac{H_0(z)}{rp_0} \frac{dp}{dz} dz) \quad (3)$$

Используя найденные распределения давления, для каждого случая рассчитаны эффективные площади поршневой пары с учётом отклонений от цилиндричности. Относительное отклонение между эффективной площадью, определённой с учётом отклонений от цилиндричности (3) и эффективной площадью, вычисленной по формуле для номинально цилиндрических поршневых пар (1), является относительным отклонением воспроизводимого давления. На графике (рис. 3) показаны зависимости отклонений воспроизводимого давления от нецилиндричности зазора между поршнем и цилиндром.

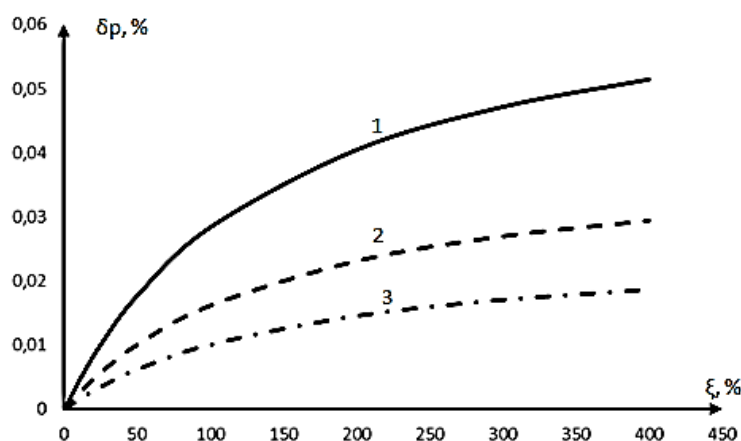


Рис. 3. Отклонения воспроизведения давления в зависимости от нецилиндричности зазора поршневой пары для разных начальных недеформированных зазоров: 1 — начальный недеформированный зазор составляет 2 мкм; 2 — начальный недеформированный зазор составляет 1 мкм; 3 — начальный недеформированный зазор составляет 0,5 мкм

Из графика следует, что для начальных недеформированных зазоров от 1 мкм и больше при нецилиндричности 12,5 % отклонение воспроизведения давления грузопоршневым манометром превышает пределы допускаемой погрешности, нормируемой в описании типа. Для начального недеформированного зазора 0,5 мкм пределы погрешности воспроизведения давления будут превышены при нецилиндричности 50 %.

Полученные результаты показывают, что уменьшение начального недеформированного зазора номинально цилиндрической поршневой пары приводит к уменьшению влияния нецилиндричности зазора между поршнем и цилиндром на воспроизводимое давление.

Из рис. 4 следует, что отклонение воспроизводимого давления линейно зависит от величины начального недеформированного зазора между поршнем и цилиндром. Угол наклона линии зависит от нецилиндричности зазора поршневой пары. Используя найденную зависимость и эталонную поршневую пару с известным отклонением от цилиндричности зазора между поршнем и цилиндром, можно определить отклонение от цилиндричности зазора другой поршневой пары, сличив её с эталонной.

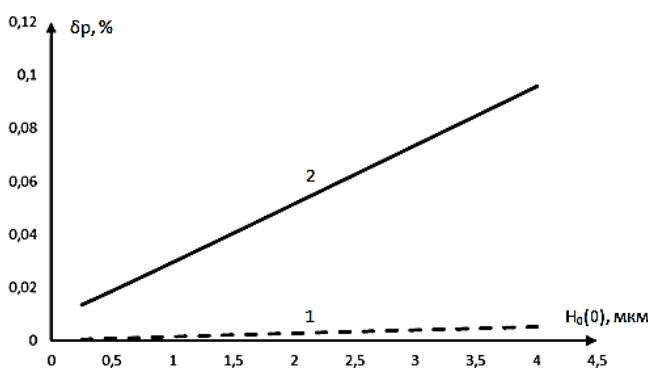


Рис. 4. Зависимость отклонения воспроизводимого давления от начального недеформированного зазора поршневой пары: 1 — нецилиндричность составляет 6,25 %; 2 — нецилиндричность составляет 400 %

Заключение

В результате моделирования номинально цилиндрической поршневой пары показана необходимость в оценке отклонений от цилиндричности зазора между поршнем и цилиндром для корректного определения метрологических характеристик грузопоршневых манометров. Обнаружена линейная зависимость отклонения воспроизведения давления номинально цилиндрической поршневой пары от начального недеформированного зазора между поршнем и цилиндром.

Список литературы

1. Исследования в области высоких давлений / Под ред. Золотых Е.В. — М.: Издательство стандартов, 1987. — 200 с.
2. Боровков В.М. Грузопоршневые манометры высокого давления: математическое моделирование и реализация поршневых пар с противодавлением // Альманах современной метрологии. — 2019. — № 1 (17). — С. 109–115.
3. Асланян А.Э. Моделирование изменения параметров поршневой пары высокого давления с рабочей жидкостью ПЭС-3 при параболическом распределении давления в зазоре между поршнем и цилиндром // Прикладная физика. — 2020. — № 4. — С. 85–91.

Статья поступила в редакцию: 30.03.2022 г.

Статья прошла рецензирование: 31.03.2022 г.

Статья принята в работу: 07.04.2022 г.