

**III. Теоретические исследования, расчёты, выбор методов моделирования и конструирования аппаратуры для ГЭТ**

УДК 531.787

**ГРУЗОПОРШНЕВЫЕ МАНОМЕТРЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ: МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ ПОРШНЕВЫХ ПАР С ПРОТИВОДАВЛЕНИЕМ**

**В.М. Боровков**

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.  
pressure@vniiftri.ru

*Рассматриваются поршневые пары с верхним пределом воспроизводимых давлений 1,6 ГПа, предназначенные для работы с глицерин-гликолевой или силиконовой жидкостями. Приведены барические зависимости скорости опускания поршня и эффективного зазора.*

*Piston pairs with an upper limit of reproducible pressures of 1.6 GPa, designed to work with glycerin glycol or silicone fluids are considered. The barometric dependences of the piston fall speed and effective clearance are given.*

*Ключевые слова: профиль канала цилиндра, зазор, эффективный зазор, пьезокоэффициент вязкости, сжимаемость жидкости, модули упругости, эффективная площадь, Мультибар, Государственный специальный эталон единицы давления ГЭТ 43-73, Государственный первичный эталон единицы давления и эффективной площади поршневых пар ГЭТ 43-2013.*

*Key words: cylinder channel profile, clearance, effective gap, pressure-viscosity coefficient, fluid compressibility, elastic moduli, effective area, Multibar, State special standard of pressure unit GET 43-73, State primary standard of pressure unit and effective area of piston pairs GET 43-2013.*

При создании грузопоршневого манометра высокого давления (ГПМ ВД) с верхним пределом воспроизводимых давлений (ВПВД) более 600 МПа приходится преодолевать множество препятствий, принимать соответствующие решения, вот лишь некоторые из них:

- обеспечение прочности конструкции;
- обеспечение отсутствия релаксирующих напряжений в поршневой паре;
- выбор оптимальной рабочей жидкости;
- выбор оптимального исполнения поршневой пары, обеспечивающего достаточно малую скорость опускания поршня;
- выбор оптимальных геометрических характеристик поршневой пары.

При этом нельзя применять модель цилиндрических поршневых пар, которая рассматривается в монографии М.К. Жоховского.

Для поршневых пар без противодействия эта модель не годится потому, что для воспроизведения высоких давлений создаются ГПМ с малыми диаметрами поршня, например, в манометрах на давления до 600 МПа приме-

няется поршень с диаметром 1,6 мм (эффективная площадь — 0,02 см<sup>2</sup>). Соответственно притереть канал цилиндра с достаточно малыми отклонениями от цилиндричности, чтобы ими можно было пренебрегать при расчёте барической поправки к эффективной площади поршневой пары, весьма проблематично. Для ГПМ на давления до 250 МПа с диаметром поршня 2,5 мм (эффективная площадь — 0,05 см<sup>2</sup>) отклонения от цилиндричности приводят к отклонениям эффективной площади от результатов расчёта по формулам М.К. Жоховского [1] 0,02–0,05 %. Для ГПМ с ВПВД более 600 МПа нередко необходимо расширять канал цилиндра вверх, чтобы скомпенсировать чрезмерное уменьшение зазора из-за пуассонова расширения поршня.

Для поршневых пар с противодавлением модель М.К. Жоховского тем более не годится, так как цилиндр изготавливается умышленно нецилиндрическим, с расширением кверху, чтобы компенсировать чрезмерное сжатие цилиндра. Это расширение многократно превышает минимальный зазор пары в нижней части при атмосферном давлении. Теоретическая модель нецилиндрических поршневых пар с учётом всех известных свойств жидкостей приведена в [2]. Для того чтобы создать высокоточную ППВД с противодавлением, требуется выполнить действия, которые не выполняются при изготовлении пар среднего давления:

- требуется создать средство измерения профиля канала цилиндра — тонкого длинного канала, причём с высокой точностью — до сотых долей микрометра;
- с высокой точностью измерить параметры упругости материалов поршня и цилиндра;
- найти подходящую жидкость (не твердеющую под давлением, обладающую стабильными свойствами, обладающую смазывающими свойствами);
- измерить барическую зависимость вязкости жидкости и её сжимаемость во всём диапазоне воспроизводимых давлений;
- рассчитать оптимальный профиль канала цилиндра и зазор в нижней части;
- притереть канал, исполнив канал с профилем, близким к желаемому;
- рассчитать параметры поршневой пары с учётом реального профиля канала для различных зазоров, выбрать оптимальный зазор и сделать под него поршень;
- выполнить эксперименты для проверки правильности результатов измерений и расчётов.

Выполненные предварительные сравнительные расчёты показали, что поршневая пара с противодавлением с цилиндром из карбида вольфрама и стальным поршнем обладает значительными преимуществами перед другими парами, поэтому представляется наиболее предпочтительной для создания ГПМ ВД. Однако с учётом большого разброса модулей упругости твёр-

досплавных изделий необходимо выполнить цилиндр высокого давления так, чтобы модули упругости можно было измерить непосредственно на нём, а не на образцах-копиях. При этом измерении необходимо ввести различные поправки, в том числе на отличие значений модуля упругости статического от динамического [3].

Для измерения профиля канала цилиндров во ВНИИФТРИ под руководством В.В. Бахваловой создан специальный прибор на основе пневматического длиномера со сферическим калибром.

Для использования в ГПМ ВД пригодны немногие жидкости. Из них можно выделить две. Одна, применявшаяся в ГЭТ 43-73, — глицерин-этиленгликолевая смесь, очень мало сжимаемая (15 % при 1 ГПа), обладающая малым пьезокоэффициентом вязкости — показателем степени экспоненты барического возрастания вязкости (4,8/1 ГПа) и достаточно большой вязкостью при атмосферном давлении (0,2 Па · с) [2]. Правда, у неё есть недостатки: гигроскопичность, электропроводность, токсичность и коррозионная агрессивность к металлам в присутствии воздуха. Вторая жидкость — силикон ПЭС, лишена недостатков глицериновых жидкостей, но у неё гораздо более высокий пьезокоэффициент вязкости, что создаёт неудобства при реализации поршневой пары.

Знать барические свойства жидкости совершенно необходимо для проектирования ПП ВД. При этом нельзя пользоваться вибрационными методами измерения вязкости, так как результаты сильно искажаются вязкоупругостью. Вискозиметр с катящимся шариком даёт гораздо более правильные результаты, поскольку движение жидкости в этом вискозиметре очень близко к её движению в поршневой паре.

Скорость опускания поршня в поршневых парах с противодавлением имеет максимум при давлении около 100–200 МПа.

На рис. 1 приведена типичная барическая зависимость скорости опускания поршня для трёх начальных зазоров (0,5; 0,75 и 1 мкм) и трёх жидкостей: с глицерин-гликолевой жидкостью (синие линии); с жидкостью ПЭС-3 (зелёные линии); с жидкостью ПЭС-5 (красные линии).

Барическое изменение эффективного зазора поршневых пар существенно зависит как от свойств жидкости, так и от её геометрических параметров. При удачном исполнении можно реализовать очень малое барическое изменение эффективного зазора. На рис. 2 показаны два варианта зависимости для двух разных пар и разных жидкостей.

На рис. 3 представлены подобные графики для двух пар (стальной цилиндр + стальной поршень и твердосплавный цилиндр + стальной поршень) с глицерин-гликолевой жидкостью.

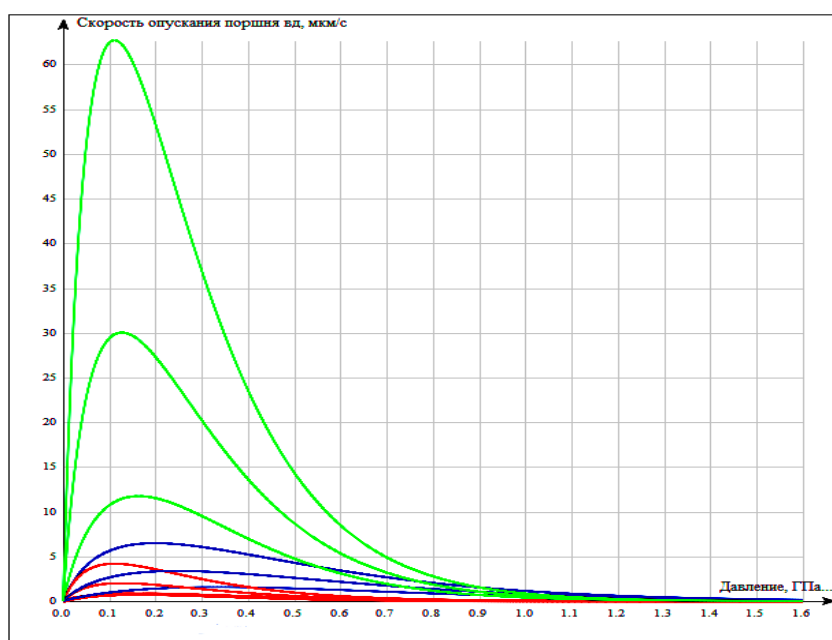


Рис. 1. Барические зависимости скорости опускания поршня с глицерин-гликолевой жидкостью (синие линии); с жидкостью ПЭС-3 (зелёные линии); с жидкостью ПЭС-5 (красные линии)

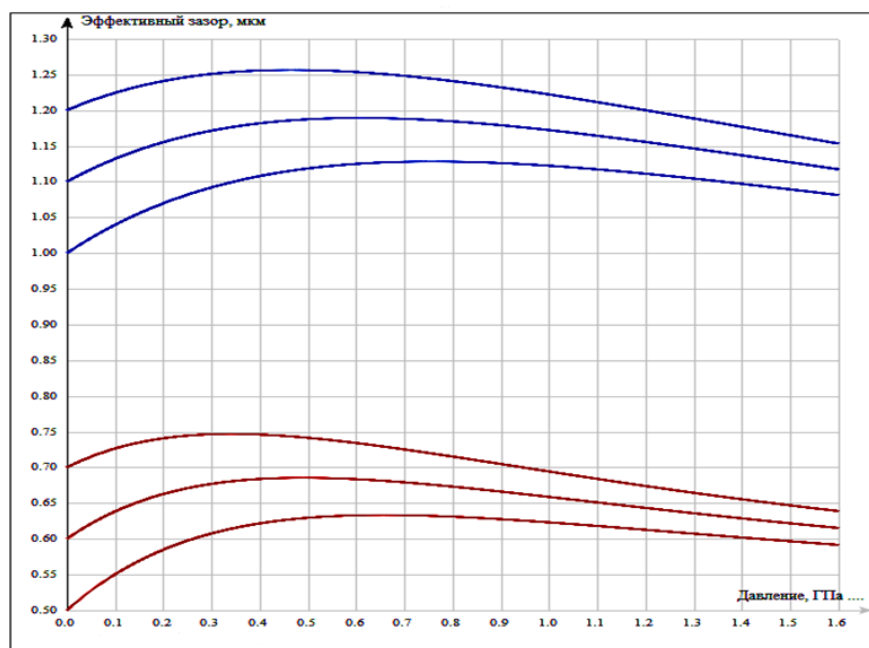


Рис. 2. Барическое изменение эффективного зазора двух пар для трёх разных зазоров, близких к оптимальному

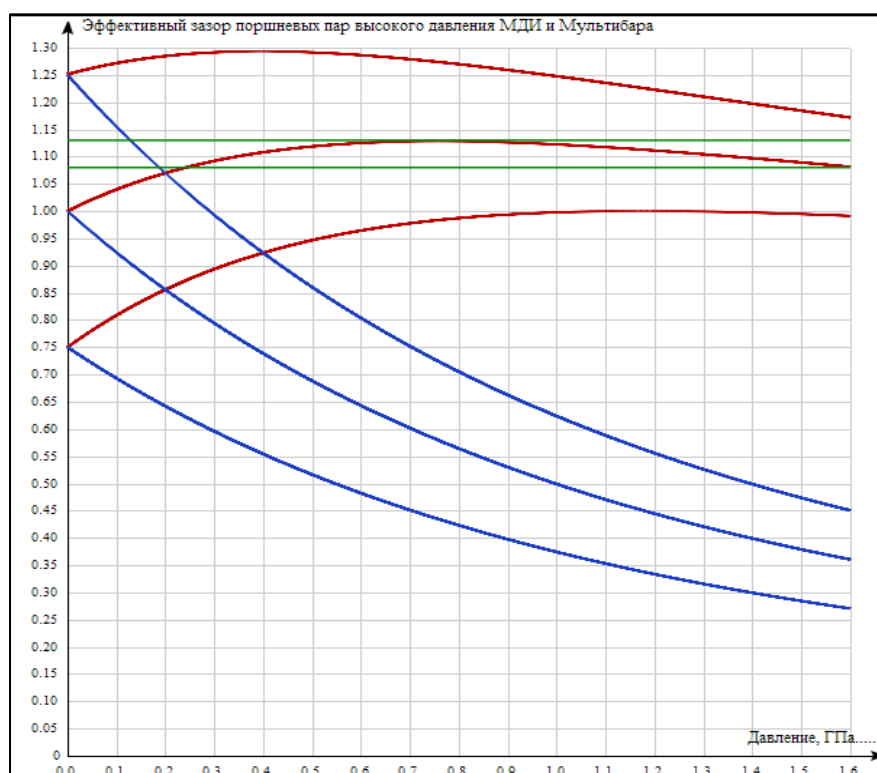


Рис. 3. Барическое изменение эффективного зазора в парах с глицерин-гликолевой жидкостью: комбинированная ПП — красные линии; стальная ПП — синие линии

Барическое изменение эффективной площади поршневой пары состоит из двух слагаемых:

- изменение за счёт деформации поршня (изменение диаметра торца, Пуассона расширения и наклона боковой поверхности), определяемое по формуле М.К. Жоховского и равное  $(1-3\mu) p/E$ , где  $\mu$  и  $E$  — соответственно коэффициент Пуассона и модуль Юнга стали; при давлении 1 ГПа это слагаемое близко к 0,05 %;
- изменение трения жидкости о поршень соответствует частному от деления изменения эффективного зазора на радиус поршня. Вторая составляющая может быть очень малой. Для реализации высокого уровня точности следует по результатам измерения притёртого канала цилиндра и нижнего зазора при атмосферном давлении рассчитать более точно барическое изменение эффективного зазора с численным решением дифференциального уравнения распределения давления в паре. Однако это решение может оказаться очень сложным, поскольку куб зазора входит в знаменатель ядра уравнения, то есть является полюсом третьего порядка. Из-за этого стандартные алгоритмы решения таких уравнений обычно

не работают, приходится применять специальные [4]. Вычислить влияние на эффективную площадь поршневой пары отклонение деформации пары от решения задачи Ляме можно итерационным методом [5].

Обычно ППВД работает в составе измерительного гидравлического мультипликатора.

Теоретическая модель такого мультипликатора в плане обеспечения соосности ППВД приведена в [2]. В ГЭТ 43-73 был применён мультипликатор Жоховского–Миринского. Его конструкция позволяла обеспечивать несоосность поршневых пар низкого и высокого давления на уровне головки поршня высокого давления 20 мкм, масса мультипликатора составляла около 50 кг.

Применённый в ГЭТ 43-2013 мультипликатор «Мультибар» [6] обеспечивает несоосность поршневых пар в пределах нескольких микрон, его масса составляет 5,5 кг.



Рис. 4. Измерительные мультипликаторы «Мультибар»

Нормированная неисключённая систематическая погрешность ГЭТ 43-2013 равна 0,002 %. Выполненные исследования показали, что при необходимости на основе разработанной теоретической модели применения комбинированной поршневой пары с противодавлением и «Мультибара» можно создать ГПМВД с неопределённостью результата около 0,0005 % при воспроизведении давления до 1,6 ГПа.

### Литература

1. Жоховский М.К. Теория и расчёт приборов с неуплотнённым поршнем. М.: Изд-во стандартов, 1980.
2. Исследования в области высоких давлений / под ред. Е.В. Золотых. М.: Изд-во стандартов, 1987.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика, том VII. Теория упругости. М.: Наука, 1981. 248 с.
4. Асланян А.Э. Методы уменьшения неисключённой систематической составляющей погрешности Государственного первичного специального эталона единицы давления ГЭТ 43-73: дис. ... канд. техн. наук. Менделеево: ВНИИФТРИ, 2012.
5. Асланян А.Э. Отклонение деформации от решения задачи Ляме в Государственном эталоне высокого давления (ГЭТ 43-73) // Законодательная и прикладная метрология. 2011. № 5. С. 12–14.
6. Боровков В.М., Секоян С.С., Асланян А.Э., Гаврилкин С.М. Школа грузопоршневой манометрии и перспективы Государственного эталона высокого давления // Альманах современной метрологии. 2015. № 2. С. 63–71.