

IV. Измерения высоких статических и динамических давлений

УДК 531.787 + 519.876.2

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ
РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ ПЭС-3
В ПОРШНЕВЫХ ПАРАХ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ**

А.Э. Асланян

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

Аннотация. В статье обосновывается замена в поршневых парах высокого давления рабочей жидкости из смеси глицерина и этиленгликоля на ПЭС-3, которые отличаются нетоксичностью, малогорючестью и которые не меняют вязкость с изменением температуры.

Рассматриваются поршневые пары с противодавлением для поршневых давлений 1; 1,2; 1,6 ГПа. Параметры поршневых пар определены с помощью математического моделирования.

Ключевые слова: поршневые пары высокого давления, рабочие жидкости, моделирование.

**MODELLING OF APPLICATION OF PES-3 WORKING FLUID
IN HIGH PRESSURE PISTON AND CYLINDER UNITS**

A.E. Aslanyan

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

Annotation. In the article the replacement is substantiated in high-pressure piston and cylinder units of the working fluid from a mixture of glycerin and ethylene glycol at PES-3, which are non-toxic, low flammable and which do not change viscosity with temperature changes.

Piston and cylinder units with back pressure for piston pressures 1; 1.2; 1.6 GPa are considered. The parameters of the piston and cylinder units are determined using mathematical modelling.

Key words: high pressure piston and cylinder units, working fluids, modelling.

Введение

В поршневых парах с противодавлением, предназначенных для воспроизведения давлений от 1 ГПа и выше, используются жидкости, не затвердевающие при данных давлениях, в основном смеси глицерина с этиленгликолем. Однако данные смеси являются токсичными и, как следствие, небезопасными в применении.

Для безопасного использования поршневых пар высокого давления предлагается использовать в качестве рабочей жидкости полиэтилсилоксановую жидкость, например ПЭС-3. Полиэтилсилоксановые жидкости представляют собой смеси полимеров линейной и циклической структуры с различным

числом силоксановых звеньев, их получают из этилхлорсиланов. Этилхлорсиланы получают прямым синтезом из кремния и хлористого этила. Данные жидкости нетоксичны, являются диэлектриками, не меняют вязкость с изменением температуры, взрывобезопасны, малогорючи.

При замене рабочей жидкости со смеси глицерина (70 %) и этиленгликоля (30 %) на ПЭС-3 изменятся вязкость жидкости и зависимость вязкости от давления.

Вязкость рабочей жидкости меняется при высоких давлениях в 1000 раз, поэтому применение другой жидкости в поршневой паре, предназначенной для работы со смесью глицерина с этиленгликолем, приведёт к изменению распределения давления в зазоре между поршнем и цилиндром, изменению эффективного зазора и поправки Бахваловой [1], что приведёт к неверным значениям воспроизводимых давлений. Таким образом, для поршневых пар высокого давления, работающих на жидкости ПЭС-3, необходимо заново рассчитать профиль зазора между поршнем и цилиндром для различного вида распределений давлений и различных подпоршневых давлений. Зависимость вязкости жидкости ПЭС-3 от давления взята из [2]. На основании этих данных была определена зависимость пьезокоэффициента вязкости от давления. Полученные результаты аппроксимированы с помощью полинома третьей степени. Зависимость описывается формулой (1):

$$c = -4,102p_0^3 + 14,79p_0^2 - 17,911p_0 + 14,828, \quad (1)$$

где c — пьезокоэффициент вязкости; p_0 — подпоршневое давление.

Рассмотрим поршневые пары с противодавлением для подпоршневых давлений 1; 1,2; 1,6 ГПа. Параметры поршневой пары: поршень из стали (модуль Юнга 210 ГПа, коэффициент Пуассона — 0,285); диаметр поршня — 2,5 мм; цилиндр из карбида вольфрама (модуль Юнга — 580 ГПа, коэффициент Пуассона — 0,215); внешний диаметр цилиндра — 8 мм. Зазор в нижней точке между недеформированными поршнем и цилиндром варьируется от 0,2 до 1 мкм с шагом 0,2 мкм.

Вязкость жидкости от давления менялась согласно формуле (2):

$$\eta(p) = \eta_{\text{атм}} e^{c \cdot (p(z) - p_{\text{атм}})}, \quad (2)$$

где η — вязкость жидкости при подпоршневом давлении; $\eta_{\text{атм}}$ — вязкость жидкости при атмосферном давлении; c — пьезокоэффициент вязкости; $p(z)$ — зависимость давления в зазоре поршневой пары от продольной осевой координаты; $p_{\text{атм}}$ — атмосферное давление.

Плотность жидкости от давления менялась согласно формуле (3):

$$\rho(p) = \rho_{\text{атм}} (1 + \gamma (p(z) - p_{\text{атм}})), \quad (3)$$

где ρ — плотность жидкости при подпоршневом давлении; $\rho_{\text{атм}}$ — плотность жидкости при атмосферном давлении; γ — коэффициент сжимаемости жидкости.

Изменение давления в зазоре в поршневой паре описывается уравнениями из [3]. При моделировании рассматривалось линейное распределение давления между поршнем и цилиндром. С помощью математического моделирования определены эффективные зазоры для различных поршневых пар и скорости опускания поршня. Эффективный зазор рассчитывался по формуле:

$$H_{\text{эфф}} = \frac{1}{p_0} \int_{p_{\text{атм}}}^{p_0} H_d(p) dp, \quad (4)$$

где $H_{\text{эфф}}$ — эффективный зазор; H_d — профиль зазора между деформированными поршнем и цилиндром.

Он определяет поправку, которую нужно добавить к радиусу поршня, чтобы вычислить площадь, которая будет соответствовать давлению, воспринятому поршневой парой при нагружении поршня известной силой.

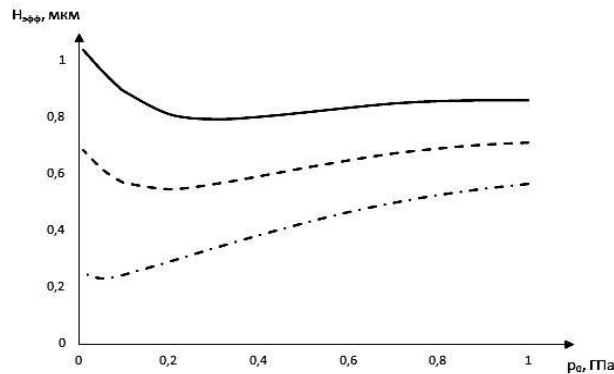


Рис. 1. Зависимость эффективного зазора от подпоршневого давления для максимального давления 1,0 ГПа: сплошная линия — поршневая пара с начальным зазором 1 мкм; пунктирная линия — поршневая пара с начальным зазором 0,6 мкм; штрихпунктирная линия — поршневая пара с начальным зазором 0,2 мкм

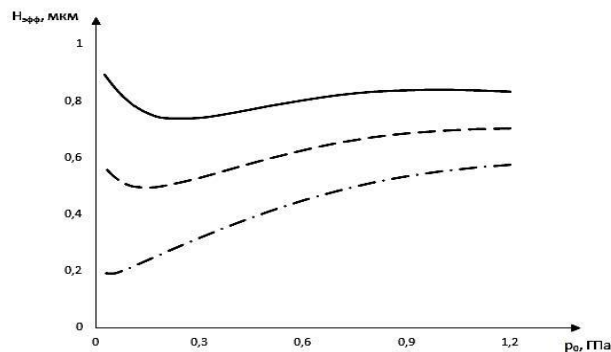


Рис. 2. Зависимость эффективного зазора от подпоршневого давления для максимального давления 1,2 ГПа: сплошная линия — поршневая пара с начальным зазором 1 мкм; пунктирная линия — поршневая пара с начальным зазором 0,6 мкм; штрихпунктирная линия — поршневая пара с начальным зазором 0,2 мкм

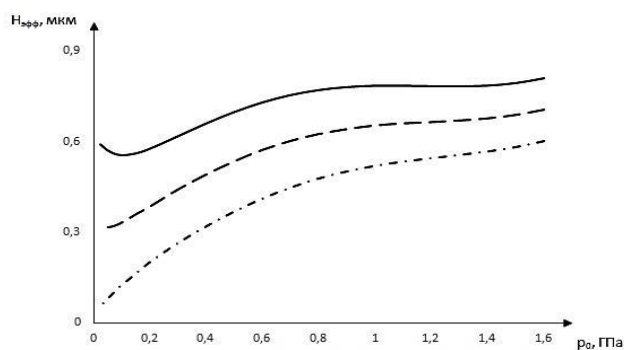


Рис. 3. Зависимость эффективного зазора от подпоршневого давления для максимального давления 1,6 ГПа: сплошная линия — поршневая пара с начальным зазором 1 мкм; пунктирная линия — поршневая пара с начальным зазором 0,6 мкм; штрихпунктирная линия — поршневая пара с начальным зазором 0,2 мкм

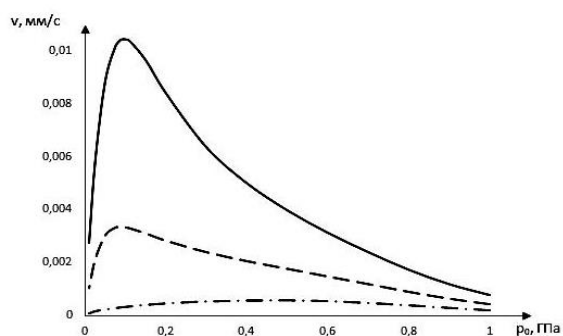


Рис. 4. Зависимость скорости опускания поршня от подпоршневого давления для максимального давления 1,0 ГПа: сплошная линия — поршневая пара с начальным зазором 1 мкм; пунктирная линия — поршневая пара с начальным зазором 0,6 мкм; штрихпунктирная линия — поршневая пара с начальным зазором 0,2 мкм

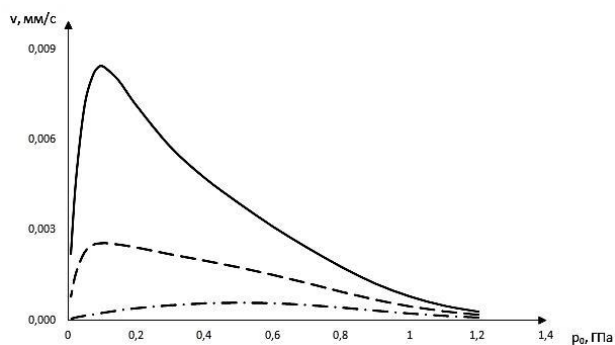


Рис. 5. Зависимость скорости опускания поршня от подпоршневого давления для максимального давления 1,2 ГПа: сплошная линия — поршневая пара с начальным зазором 1 мкм; пунктирная линия — поршневая пара с начальным зазором 0,6 мкм; штрихпунктирная линия — поршневая пара с начальным зазором 0,2 мкм

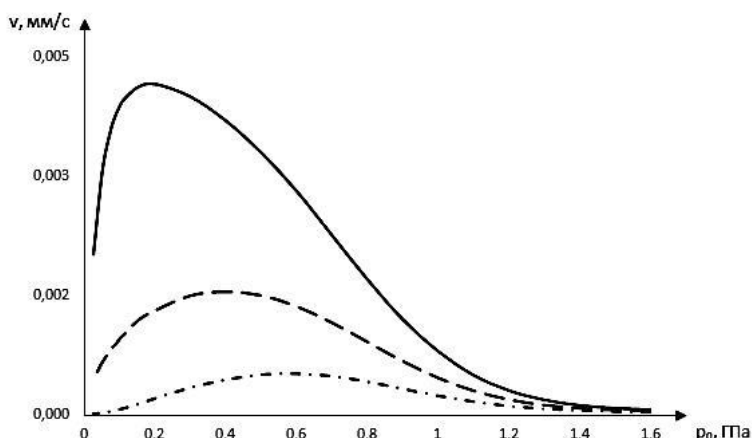


Рис. 6. Зависимость скорости опускания поршня от подпоршневого давления для максимального давления 1,6 ГПа: сплошная линия — поршневая пара с начальным зазором 1 мкм; пунктирная линия — поршневая пара с начальным зазором 0,6 мкм; штрихпунктирная линия — поршневая пара с начальным зазором 0,2 мкм

Как видно из рисунков, можно подобрать такой начальный недеформированный зазор, чтобы эффективный зазор слабо зависел от подпоршневого давления. Таким образом, с помощью математического моделирования определены параметры поршневых пар с противодавлением, работающих на нетоксичной жидкости ПЭС-3, которые позволяют:

- воспроизводить давление с низкой скоростью опускания поршня;
- для всех воспроизводимых давлений иметь слабую зависимость эффективного зазора от подпоршневого давления.

Список литературы

1. Бахвалова В.В. Эффективная площадь поршня реальных поршневых систем / Исследования в области высоких давлений. Труды метрологических институтов СССР. М.: Издательство Комитета стандартов мер и измерительных приборов при Совете министров СССР, 1969. Вып. 104 (164). С. 21–28.
2. Кузнецов Д.И. Вязкость жидкостей / под ред. Е.В. Золотых // Исследования в области высоких давлений. М.: Изд-во стандартов, 1987. С. 140–196.
3. Боровков В.М. Методы и приборы измерения высоких давлений / под ред. Е.В. Золотых / Исследования в области высоких давлений. М.: Изд-во стандартов, 1987. С. 5–77.

Статья поступила в редакцию: 26.10.2020 г.

Статья прошла рецензирование: 27.11.2020 г.

Статья принята в работу: 02.12.2020 г.