

УДК 006.91:531.787

ШКОЛА ГРУЗОПОРШНЕВОЙ МАНОМЕТРИИ ВНИИФТРИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ГОСУДАРСТВЕННОГО ЭТАЛОНА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

В.М. Боровков, С.С. Секоян, А.Э. Асланян, С.М. Гаврилкин
ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.
pressure@vniiftri.ru

При создании ВНИИФТРИ погрешность грузопоршневых манометров высокого давления достигала 0,6 %. Основной причиной этого, как выяснилось в созданном отделе высоких давлений ВНИИФТРИ, являлось несовершенство теоретической модели поршневой пары высокого давления с противодавлением. Благодаря совершенствованию теории, измерению параметров нецилиндричности поршневых пар, свойств жидкости под давлением, модулей упругости материалов поршневых пар, а также новым конструкторским и технологическим решениям был создан Государственный эталон высоких давлений ГЭТ 43-73, после усовершенствования в 2013, его неисключенная погрешность составила 0,002 %

Ключевые слова: грузопоршневая манометрия, поршневые пары, государственный эталон

История государственного эталона высокого давления неразрывно связана с историей ВНИИФТРИ.

Практически все национальные эталоны единицы давления в диапазоне от вакуума до сверхвысоких давлений основаны на принципе грузопоршневого манометра (ниже он будет обозначаться как ГПМ), его классическое исполнение приведено на рис.1.

Как видно, он состоит всего из четырех элементов: поршня (1), цилиндра (2), нагрузки (3) и рабочей среды под поршнем и в зазоре поршневой пары (4), которая может быть как жидкой, так и газообразной.

Поршень для исключения сухого трения с цилиндром непрерывно вращается (часто – по инерции). Благодаря чрезвычайно малому зазору между поршнем и цилиндром

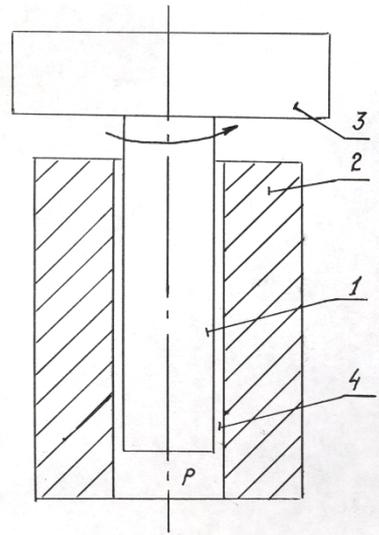


Рис. 1.

(от единиц до долей микрометра) рабочая среда через зазор вытекает медленно, соответственно медленно опускается поршень, замещая вытекающую жидкость (скорость опускания – очень малые доли мм/с).

Давление p , воспроизводимое ГПМ, вычисляется по простой фор-

муле, соответствующей физическому определению давления: сила (вес поршня с нагрузкой G), деленная на площадь (эффективную площадь поршневой пары $S_{\text{эф}}$, которая очевидно больше площади поперечного сечения поршня и меньше площади поперечного сечения цилиндра)

$$p = G/S_{\text{эф}}$$

Стоит заметить, что, с метрологической точки зрения, ГПМ - вовсе не манометр, а многозначная мера давления.

Вся история ГПМ связана с решением трех основных задач:

- правильно нагрузить поршень для воспроизведения высоких давлений, когда нагрузка доходит до многих килоньютонов,
- обеспечить достаточно малые скорости опускания поршня,
- обеспечить определение с высокой достоверностью эффективной площади.

Для решения первой задачи применяются известные в других областях физики и техники решения: колокольные тарелки, центрирование с использованием шариковых подшипников и гидравлические измерительные мультипликаторы (с неуплотненными поршнями [1]), позволяющие воспроизводить высокие давления с применением сравнительно небольших нагрузок.

Впервые гидравлический мультипликатор применил в составе меры высокого давления французский физик Эмиль Амага (1841-1915), используя в качестве источника низкого давления ртутный манометр. Первый отечественный из-

мерительный мультипликатор был создан под руководством М.К. Жоховского [2]. В последующие десятилетия конструкция измерительных мультипликаторов многократно совершенствовалась.

С возрастанием воспроизводимого давления скорость опускания поршня увеличивается, причем если сначала это увеличение происходит пропорционально давлению, то затем оно происходит все более стремительно. Это обусловлено деформацией поршневой пары, приводящей к увеличению зазора (рис. 2).

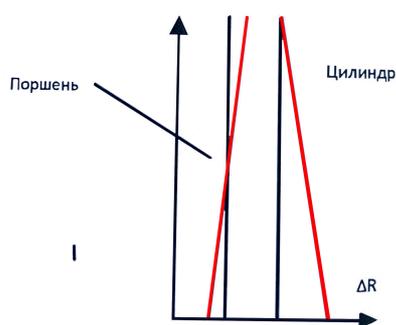


Рис. 2. Деформация простой поршневой пары

- начальный профиль
- профиль под давлением

При небольших давлениях уменьшить скорость опускания поршня удастся простым уменьшением зазора поршневой пары и применением жидкости с большей вязкостью. Но при более высоких давлениях деформационное увеличение зазора превышает его начальный размер, а выбор жидкостей существенно суживается, так как большинство из них при высоком давлении твердеют, и для уменьшения скорости опускания поршня приходится

принимать другие меры. Наиболее радикальное решение проблемы нашел нобелевский лауреат по физике П.В.Бриджмен [3]. Им предложена поршневая пара с противодавлением на боковую поверхность цилиндра (рис. 3).

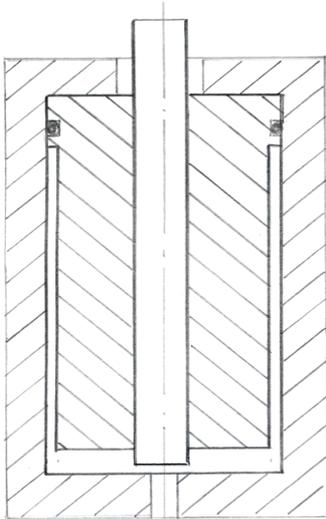


Рис. 3. Поршневая пара с противодавлением

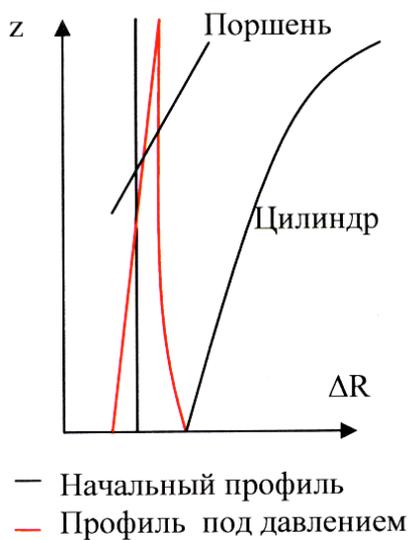


Рис. 4. Деформация поршневой пары

В такой поршневой паре, если поршень и цилиндр изготовлены из одного материала, зазор внизу с ростом давления не меняется, благодаря чему скорость опускания поршня вырастает только при сравнительно небольших давлениях. При дальнейшем же росте давления она даже уменьшается, так как зазор в поршневой паре (исключая ее низ) с ростом давления уменьшается, поскольку на цилиндр действует сжимающее его давление по всей длине, а давление внутри уменьшается до атмосферного. Наконец, наступает момент, когда дальнейшее деформационное уменьшение зазора (в верхней части пары) становится нежелательным, так как удлиняется переходный процесс установления воспроизводимого давления и резко увеличивается момент вязкого трения (рис. 4, 5).

Для предотвращения этого явления канал цилиндра выполняют не цилиндрическим, как в простых поршневых парах, а с расширением кверху, компенсирующим чрезмерное деформационное сужение зазора.

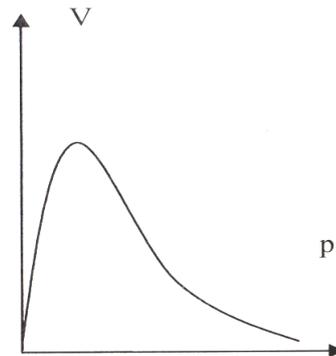


Рис. 5. Типичная барическая зависимость скорости опускания поршня

Теорию ГПМ разработал наш соотечественник д.т.н. проф. М.К. Жоховский в сороковых-пятидесятых годах прошлого века, его монография [1] выдержала три издания в СССР, была опубликована за рубежом. Эта теория учитывала деформацию поршневых пар, а также барическое увеличение вязкости жидкостей. Выполненные экспериментальные проверки теории на простых поршневых парах подтвердили ее правильность в диапазоне точностей вплоть до сотых долей процента при давлениях до 250 МПа. Однако сличения ГПМ высокого давления, в которых применены поршневые пары с противодействием, показали существенное различие воспроизводимых давлений, достигавшее при давлении 1 ГПа 0,6 %. Причина этого различия была овершено непонятна. При этом оказалось, что нет образцовых средств для поверки манометров высокого давления класса точности 1,0 с требуемым запасом по точности 4. Кроме того, пропала уверенность в правильности расчета и ГПМ средних давлений. Эта ситуация привела к тому, что при создании ВНИИФТРИ был предусмотрен отдел высоких и сверхвысоких давлений, первой задачей которой было устранение обнаружившегося несовершенства теории ГПМ, с этого и начинается история ГПМ во ВНИИФТРИ.

В скором времени в отделе были образованы пять лабораторий:

- собственно грузопоршневых манометров высокого давления и

измерения вязкости жидкостей,

- измерения сжимаемости жидкостей и фазовых равновесий веществ при высоком давлении,

- манганиновых манометров,

- акустических измерений параметров упругости конструкционных материалов,

- аппаратуры для создания высоких давлений.

Кроме того, в состав отдела вошла макетная мастерская со станочным оборудованием. В институте был создан опытный завод.

Сначала работой отдела руководил д.т.н. М.К.Жоховский, затем к.т.н. Е.В.Золотых (специалист по вискозиметрии высокого давления). Работа по проблеме ГПМ была поручена выпускнице механико-математического факультета МГУ В.В.Бахваловой (по результатам этой работы она в 1967 г. защитила кандидатскую диссертацию). Оказалось, что причиной несовершенства теории ГПМ явилось несоответствие математической модели реальным поршневым парам высокого давления. Дело в том, что вычисление эффективной площади поршневых пар связано с необходимостью решения системы дифференциальных уравнений в частных производных Навье - Стокса, которая не решается в радикалах в принципе. Обычным выходом из этого положения было упрощение постановки математической задачи. Так поступил и М.К.Жоховский: он предположил все поршневые пары строго цилиндрическими, а также применил для описания деформации поршневых

пар решение задачи Ляме теории упругости, описывающее деформацию бесконечно длинных полых цилиндров под действием постоянного по длине давления. Полученные точные решения упрощенной задачи были применены к реальным поршневым парам. При этом предполагалась цилиндричность поршневых пар, поскольку считалось, что она обеспечивается технологически - притиркой. Почему полученные решения были применены к заведомо нецилиндрическим поршневым парам с противодавлением, неизвестно. Но с более корректной постановкой математической задачи нашелся и способ ее решения – численным методом, с применением только что появившихся ЭВМ [4,5].

Однако для полного успеха необходимо было измерить и ввести в ЭВМ профиль продольного сечения канала цилиндра поршневой пары, а средств его измерения не существовало. Благодаря совместным усилиям специалистов ВНИИГК (в настоящее время ВНИИМС), завода «Калибр» и ВНИИФТРИ требуемое средство было создано на основе применения пневматического длинмера, его разрешающая способность достигла 0,1 мкм при номинальном диаметре канала 3 мм.

Выполненные измерения имевшихся поршневых пар высокого давления показали чрезвычайно большие различия их исполнений, причем ни один из имевшихся цилиндров с соответствующим поршнем, обеспечивающим достаточно малую скорость его опускания, не

удалось рассчитать в требуемом диапазоне высоких давлений 0 – 1500 МПа. Тогда было принято решение создать государственный эталон высоких давлений с тремя рассчитываемыми поршневыми парами, образованными одним цилиндром и тремя разными поршнями на давления 100-600 МПа, 600-1000 МПа и 1000-1500 МПа. Необходимые для расчетов параметры рабочей жидкости (вязкость и сжимаемость) измерили при высоких давлениях на созданных ими уникальных установках к.т.н. Е.В. Золотых, к.т.н. Д.И. Кузнецов и к.т.н. В.Н.Разумихин, а параметры упругости материалов (сталей) поршневых пар – к.т.н. С.С. Секоян [6].

При создании эталона была существенно доработана математическая модель поршневой пары высокого давления. Благодаря методической помощи кафедры гидромеханики механико-математического факультета МГУ (проф. Н.А. Слезкина) был реализован новый метод решения системы уравнений Навье – Стокса.

Предыдущая гидродинамическая модель была внутренне противоречивой, так как разработана путем хоть и точных решений, но настолько сильно упрощенной задачи, что неточность полученных решений оценить было невозможно. Новая модель была разработана путем приближенного решения задачи в точной постановке с хорошо обоснованной точностью (приведение уравнений к безразмерному виду, оценка порядка величины от-

дельных слагаемых, отбрасывание несущественных слагаемых и получение системы укороченных дифференциальных уравнений) [6]. Новая модель впервые учитывала сжимаемость рабочей среды.

После определения желаемого профиля канала цилиндра поршневой пары необходимо было разработать специальный технологический процесс, изготовить специальные оснастку и инструменты для исполнения цилиндра. Это было сделано совместными усилиями работников отдела и опытного завода, специальные стали были изготовлены в ЦНИИЧермет.

Совместными усилиями десятков специалистов в 1973 г. был создан первый Государственный эталон единицы давления на область высоких давлений ГЭТ 43-73 с диапазоном воспроизводимых давлений 100 – 1500 МПа и неисключенной систематической погрешностью 0,02 % [7].

Уже при создании эталона он был заочно сличен с лучшими зарубежными ГПМ высокого давления через процедуру измерения давления фазового равновесия ртути [6, 8]. В последующие годы благодаря применению первого малогабаритного измерительного мультипликатора «МДИТП» (ВНИИФТРИ) были выполнены сличения с национальными эталонами ПНР, ГДР и ВНР до 600 МПа, а с применением малогабаритного манганинового манометра – с эталоном Франции. Результаты сличений не противоречили авторским оценкам метрологических парамет-

ров сличенных приборов. Результаты исследования ГЭТ 43-73 неоднократно докладывались на международных конференциях и симпозиумах, а также в ПТБ (Германия).

Созданная аппаратура для измерения канала цилиндров позволила выполнить измерения поршневых пар из состава образцовых ГПМ с верхними пределами измерений 60 МПа и 250 МПа. Установлено, что поршневые пары этих приборов (номинально цилиндрические) имеют значительные отклонения от цилиндричности, обусловленные, как особенностями применяющегося технологического процесса притирки (притирка свободным абразивом), так и отсутствием у производителя средств для контроля профиля продольного сечения канала цилиндров. Было установлено, что эти отклонения от цилиндричности не позволяют применять к этим парам математическую модель М.К. Жоховского, а возникающая из-за этого дополнительная погрешность может существенно превышать нормированные для этих приборов значения.

В последующие десятилетия выполнялась работа по дальнейшему совершенствованию математической модели ГПМ высокого давления: была разработана модель некоаксиальных поршневых пар и уточненная модель измерительных мультипликаторов [6, 9], исследована степень применимости решения задачи Ляме для расчета деформации поршневых пар высокого давления [10 - 12], а также разработаны ори-

гинальный деформационный метод высокоточного измерения зазора и аппаратура быстрого и высокоточного измерения профилей продольного сечения поршней и канала цилиндров исходных поршневых пар большого диаметра – мер эффективной площади.

Во время эксплуатации ГЭТ 43-73 было установлено, что цилиндр высокого давления не обладает достаточной стабильностью размеров из-за релаксации внутренних напряжений. Единственным возможным способом избежать этого явления было применение цилиндра из твердого материала, имеющего достаточно высокую прочность на

сжатие, чтобы в нем не возникали остаточные внутренние напряжения. Также было обнаружено, что конструктивная несоосность поршневых пар измерительного мультипликатора многократно превышает сумму их зазоров (составляет 20 – 50 мкм) и меняется с ростом воспроизводимого давления. Для устранения этого недостатка была разработана в соответствии с теорией решения изобретательских задач ТРИЗ [13] новая конструкция измерительного мультипликатора «Мультибар» (рис. 6), в котором несоосность поршневых пар доведена до единиц микрометров и не зависит от воспроизводимого давления [6,9].



Рис. 6. Измерительный мультипликатор «Мультибар»
Измерительные мультипликаторы
Мультибар ВПИ 1,6 ГПа, К=100.
Несоосность поршневых пар уменьшена в 50 раз (до 1 мкм).
Ресурс поршней высокого давления увеличен в 30 раз (до 1000 ч).
Погрешность, вносимая приводом вращения поршней, уменьшена в 20 раз (до 2·10⁻⁶).
Масса уменьшена в 8 раз (до 8 кг) – возможность международных сличений и поверок рабочих эталонов на местах применения.

Применение в нем цилиндра высокого давления с оптимальными геометрическими параметрами в паре со стальным хромированным поршнем и нового программного обеспечения для расчетов [12] позволило при совершенствовании ГЭТ 43-73 (создании ГЭТ 43-2013 [14]) реализовать единую поршне-

вую пару высокого давления на весь диапазон высоких давлений до 1,6 ГПа, при этом в десятки раз уменьшить скорость опускания поршня и на порядок (до 0,002 %) уменьшить НСП, фотография поршневой пары высокого давления представлена на рис. 7.



Рис. 7. Поршневая пара высокого давления из твердого сплава

Выполнены работы по совершенствованию методики и аппаратуры для измерения упругих параметров материалов поршневых пар, в результате расширенная неопределенность результатов измерения была снижена до 0,05 % для коэффициента Пуассона и 0,1 % для модуля Юнга.

Возможность самостоятельно выполнять финишную притирку поршневых пар, получая желательные профили продольного сечения, и с высокой точностью измерять их диаметры и зазоры позволили при создании ГЭТ 43-2013 реализовать набор мер эффективной площади - три поршневые пары из карбида кремния с диаметром поршней 60 мм, фотография одной из них представлена на рис. 8.

Эти пары прослеживаются к государственному эталону единицы



Рис. 8. Поршневая пара с диаметром поршня 60 мм

Измерения диаметра поршня сравнением с КМД 1 разряда, ($\Delta = 0,032$ мкм – главная составляющая НСП).

Компаратор ($\Delta = 0,01$ мкм).

Измерения профилей сечения канала деформационным методом, пневмодлиномер ($\Delta = 0,01$ мкм).

длины через плоскопараллельную концевую меру длины первого разряда с применением компараторов длины с разрешающей способностью 10 нм. Оценка НСП комплекта из этих пар дала результат $\pm 2 \cdot 10^{-6}$.

Для передачи единицы эффективной площади поршневым парам высокого давления создан набор достоверно цилиндрических поршневых пар с диаметром поршня, мм: 25, 20, 16, 11, 5 и 2,5, при этом передача от одной пары другой выполняется с С.К.О. результата в пределах $5 \cdot 10^{-7}$. Часть этих пар использована для расширения диапазона воспроизводимых давлений ГЭТ 43-2013 в сторону меньших давлений до 10 МПа – верхней границы диапазона воспроизводимых давлений ГЭТ 23-2011.

Основные результаты 60-летней работы ВНИИФТРИ по созданию государственного эталона высоких давления приведены в таблице.

Таблица

Параметр	Значение	
	1955 г.	2013 г.
НСП, %	0,6	0,002
СКО, %	0,05	0,0005
Диапазон воспроизводимых давлений, МПа	100 - 1500	10 - 1600
Межремонтный ресурс, ч	30	1000
Разрешающая способность аппаратуры сличений при высоких давлениях, кПа	200	0,3
С.к.о. ряда при сличениях поршневых пар с прямым нагружением, %	0,005	0,0002
Трудоемкость сличений при давлениях 100 – 1600 МПа, ч	25	2
Трудоемкость сличений при давлениях до 0,1 - 250 МПа, ч	160	1
Масса измерительного мультипликатора, кг	50	5,5
Масса гидравлических узлов высокого давления, кг	50 - 70	не более 16

На созданной аппаратуре выполнены сотни договорных работ по исследованию различных жидкостей, конструкционных материалов, порошков и специальных материалов, частично они отражены в монографии отдела [6].

Фотография одной из гидравлических установок входящей в состав нового эталона, приведена на рис.9.



Рис. 9. Установка УСВД1600
(максимальное давление 1600 МПа)

СРАВНЕНИЕ ГЭТ 43-2013 С ЛУЧШИМИ ЗАРУБЕЖНЫМИ АНАЛОГАМИ

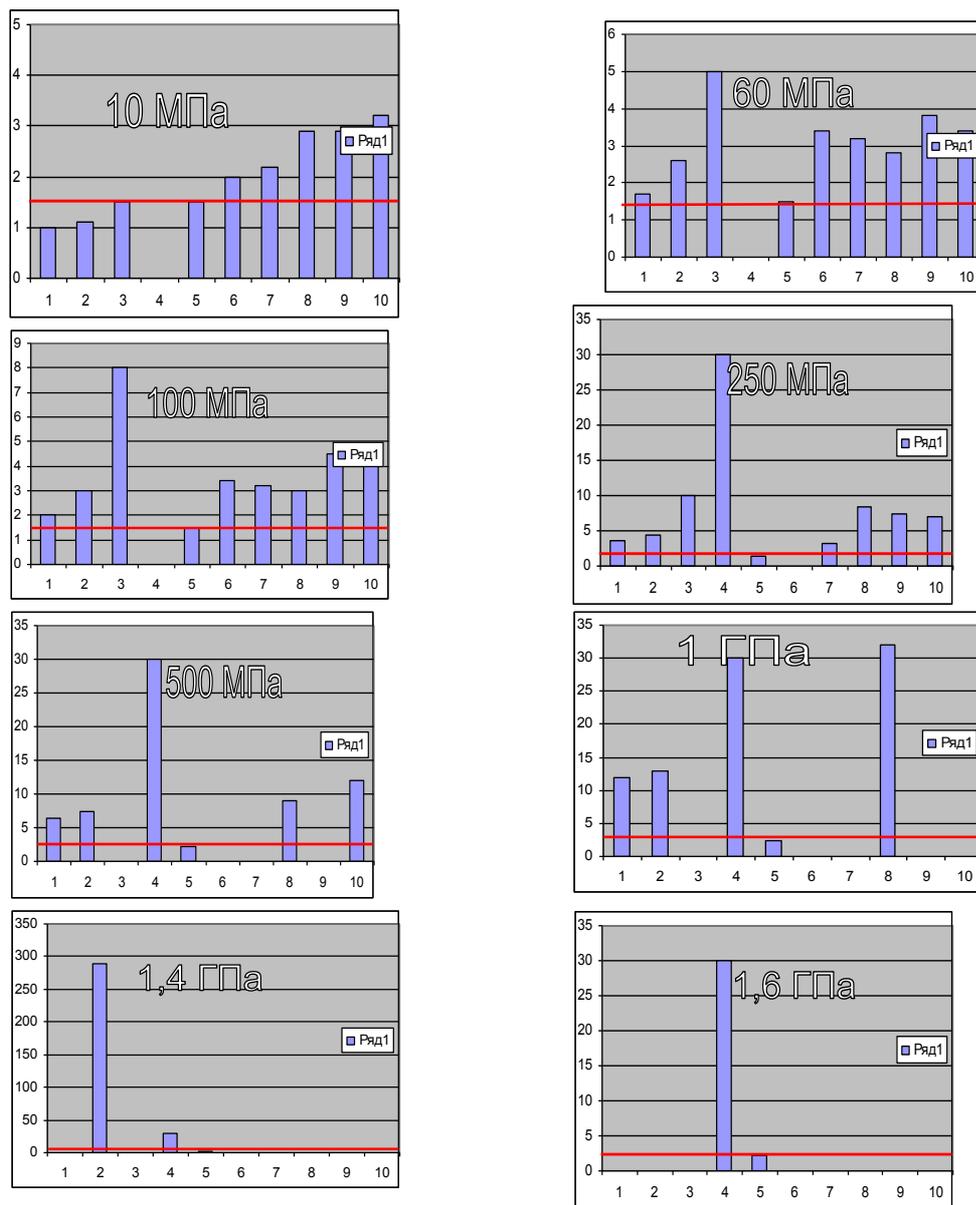


Рис. 10. Суммарная погрешность усовершенствованного эталона



Уменьшение погрешности от ГЭТ 43-73 к ГЭТ 43-2013

1 – Франция (LNE), 2 – Германия (PTB), 3 – РФ (ВНИИМ), 4 – РФ ГЭТ 43-73, 5 – РФ ГЭТ 43-2013, 6 – Китай (NIM), 7 – США (NIST), 8 – Италия (INRIM), 9 – Великобритания (NPL), 10 – Япония (NMIJ).

Одна из установок, входящих в состав эталона содержит две гидравлические системы: до 25 МПа и до 300 МПа, заполняемые соответственно маловязкой жидкостью, например, керосином, и вязкой, например, вакуумным маслом VM-1. Установка предназначена для сличения поршневых пар и грузопоршневых манометров прямого нагружения из состава эталона, а также для выполнения поверочно-калибровочных работ при давлениях до 300 МПа. Она снабжена электронным статоскопом, позволяющим следить за перемещением поршней с разрешающей способностью до 1 мкм.

Вторая установка содержит гидравлическую систему высокого давления, заполняемую глицерин-глицероловой смесью, содержит компаратор высоких давлений на основе манганиновых преобразователей давления с разрешающей способностью 300 Па.

Перспективы совершенствования эталона

Известно, что главная часть любого государственного первичного эталона – это его интеллектуальная часть – ученый хранитель с помощниками. В настоящее время в лаборатории – хранителе ГЭТ 43-2013 проходит процесс смены кадрового состава, обслуживающего и совершенствующего эталон. Из состава отдела высокого отдела численностью 60 человек осталось два сотрудника, младшему из них, ученому хранителю ГЭТ - 70 лет. Многие годы кадровая ситуация была

близка к катастрофичной, как в песне А. Городницкого об атлантах: «поставлены когда-то, а смена не пришла». В настоящее время есть кандидаты на замену, и им есть работа по совершенствованию собственно эталона, при выполнении которой они неизбежно и естественно приобретут достаточную квалификацию. Эту работу можно обозначить тремя направлениями.

1. *Совершенствование исходных мер эффективной площади.* Имеется возможность без больших материальных затрат реализовать достаточно большое количество поршневых пар большого диаметра. Это можно продемонстрировать на примере трех заготовок поршневых пар. Если их выполнить рационально, то из трех поршней и трех цилиндров можно образовать $3 \times 3 = 9$ поршневых пар. С учетом возможности переворачивать (опрокидывать) поршни и цилиндры можно реализовать $6 \times 6 = 36$ поршневых пар. Если же в них применить три класса жидкостей, например, жидкие диэлектрики - алканы, проводники – спирты и газ, то число комбинаций поршень – цилиндр - среда увеличится до 108. Это позволит более надежно проверить правильность линейных измерений и расчеты эффективной площади.

2. *Совершенствование вискозиметра высокого давления.* Основная составляющая погрешности существующего вискозиметра обусловлена погрешностью измерения высокого давления. Применяемый для этого манганиновый преобразо-

ватель давления может обеспечить измерения с погрешностью $\pm(0,2 - 0,5)$ %. Предлагается оснастить вискозиметр грузопоршневым манометром, хотя это и кажется невозможным в принципе, поскольку грузопоршневой манометр должен быть всегда вертикальным, а вискозиметр работает по принципу катящегося шарика, и его необходимо при измерениях поворачивать вокруг горизонтальной оси. К настоящему времени разработано техническое предложение по реализации этого направления. Данная мера позволит повысить точность вискозиметра более чем на порядок.

3. *Создание установки для реализации высокоточных реперов давления на кривой плавления ртути.* Выполнение этой работы позволит выполнять заочные и оперативные сличения национальных эталонов высокого давления. Непосредственное сличения этих эталонов организовать трудно из-за различия рабочих жидкостей высокого давления.

Литература

1. Жоховский М.К. Теория и расчет приборов с неуплотненным поршнем. М.: Машгиз, 1959. 204 с.
2. Жоховский М.К.// «Точная индустрия» № 1, 1935.
3. Бриджмен П.В. Физика высоких давлений, ОНТИ, 1935.
4. Бахвалова В.В.// Эффективная площадь недеформированного поршня в поршневой системе искаженной формы// Измерительная техника, 1966, №1, с. 44-48.
5. Бахвалова В.В.// Эффектив-

ная площадь деформированного поршня в поршневой системе искаженной формы// Измерительная техника, 1966, №3, с. 34-38.

6. Боровков В.М., Атанов Ю.А., Золотых Е.В., Кузнецов Д.И. и др. Исследования в области высоких давлений. М.: Изд-во стандартов, 1987, 304 с.

7. Бахвалова В.В., Золотых Е.В., Боровков В.М.// Государственный специальный эталон единицы давления на диапазон $2500 \cdot 10^5 - 15000 \cdot 10^5$ Па// Измерительная техника, 1973, №11, с. 3-4.

8. Бахвалова В.В., Боровков В.М. // Метрология, 1974, № 2.

9. Боровков В.М. Теоретические модели, вопросы проектирования, технологии и рационального применения грузопоршневых манометров избыточного давления. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук в форме научного доклада. М., ВНИИФТРИ, 1991.

10. Асланян А.Э.// Метрология, 2011, № 6. с. 20-25.

11. Aslanyan A. Abstracts of "CCMP-5 and IMEKO TC-16 Conference". - Berlin: 2011, p. 4-6.

12. Асланян А.Э. Методы уменьшения неисклученной систематической составляющей погрешности государственного первичного специального эталона единицы давления ГЭТ 43-73. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Менделеево, ФГУП «ВНИИФТРИ», 2012.

13. Альтшуллер Г.С. Найти идею. Введение в ТРИЗ — теорию

решения изобретательских задач. Изд-во Альпина Бизнес Букс, 2007.

14. Боровков В.М., Кузнецов Д.И., Секоян С.С., Щипунов А.Н., Асланян А.Э., Гаврилкин С.М. Создание Государственного первично-

го эталона единицы давления в диапазоне 10 – 1600 МПа и единицы эффективной площади поршневых пар грузопоршневых манометров в диапазоне 1 – 0,005 см²// Измерительная техника, 2014, №11, с. 7–10.