

тервала длины приблизительно в 58 м составила не более 3,5 мкм.

Исходя из полученных результатов, можно с уверенностью сказать, что усовершенствованный во ВНИИФТРИ комплекс метрологического обеспечения СИ длины позволит передавать единицу длины ко всем перспективным СИ длины с требуемой точностью.

Л и т е р а т у р а

1. **Федеральный** закон Российской Федерации от 26 июня 2008 г. № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений».

2. **ГОСТ 8.503—84.** ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений длины в диапазоне от 24 до 75000 м.

3. **Приказ** Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 28 декабря 2012 г. № 1214 «Об утверждении Государственного первичного специального эталона единицы длины».

4. **ГОСТ Р 8.750—2011.** ГСИ. Государственная поверочная схема для координатно-временных средств измерений.

5. **ГОСТ Р 53606—2009.** Глобальная навигационная спутниковая система. Методы и технологии выполнения геодезических и землеустроительных работ. Метрологическое обеспечение. Основные положения.

Дата принятия 30.09.2014 г.

531.787

Создание государственного первичного эталона единицы давления в диапазоне 10—1600 МПа

В. М. БОРОВКОВ, Д. И. КУЗНЕЦОВ, С. С. СЕКОЯН, А. Н. ЩИПУНОВ, А. Э. АСЛАНЯН, С. М. ГАВРИЛКИН

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Россия, e-mail: pressure@vniiftri.ru

Создан Государственный первичный эталон единиц давления в диапазоне 10—1600 МПа и эффективной площади поршневых пар грузопоршневых манометров в диапазоне 0,05—1 см² ГЭТ 43—2013 в целях усовершенствования Государственного первичного специального эталона единицы давления в диапазоне 250—1500 МПа ГЭТ 43—73. Показано, что неисключенная систематическая погрешность уменьшена в 10 раз.

Ключевые слова: грузопоршневой манометр, поршневая пара, эффективная площадь, измерительный мультипликатор, задача Ляме.

As a result of the special state primary standard of pressure unit GET 43—73 on range 250—1500 MPa upgrading the state primary standard of pressure unit in the range 10—1600 MPa and of effective area unit for piston pairs of dead-weight pressure gauges in the range 0,05—1 cm² GET 43—2013 has been created. At the same time a nonexcluded systematic error is diminished by the factor of 10.

Key words: dead-weight pressure gauge, piston pair, effective area, measuring multiplier, task Lame.

В начале 50-х годов XX века при исследовании образцовых грузопоршневых манометров высокого давления МОП-10000, МОП-15000 (верхние пределы воспроизводимых давлений соответственно 1 и 1,5 ГПа) было обнаружено существенное отклонение воспроизводимого ими давления от теоретической модели М. К. Жоховского [1]. Это обстоятельство не позволяло вычислять деформационные поправки эффективной площади поршневых пар высокого давления с требуемой точностью, как это делали для грузопоршневых манометров среднего давления МОП-60, МОП-600 и МОП-2500 (верхние пределы воспроизводимых давлений соответственно 60—250 МПа). При классе точности рабочих манометров 1,0 класс точности средств их поверки должен быть не более 0,2. В отдельных случаях разность давлений, воспроизводимых различными экземплярами МОП-10000 и МОП-15000, достигала 0,4 %.

Указанные причины послужили основой для создания Государственного первичного специального эталона единицы давления в диапазоне 250—1500 МПа ГЭТ 43—73 [2]. Погрешность грузопоршневых манометров высокого давления была уменьшена до 0,02 %. В состав ГЭТ 43—73 входил измерительный мультипликатор, который позволял при использовании грузов общей массой 50 кг создавать усилие на поршень высокого давления 10 кН.

Однако мультипликатор имел следующие недостатки: неизбежная несоосность поршневых пар низкого и высокого давления приводила к появлению дополнительной погрешности и ускоренному износу поршней высокого давления (их ресурс составлял около 30 ч);

принудительный привод вращения поршней способствовал появлению дополнительной составляющей неисключенной систематической погрешности (НСП);

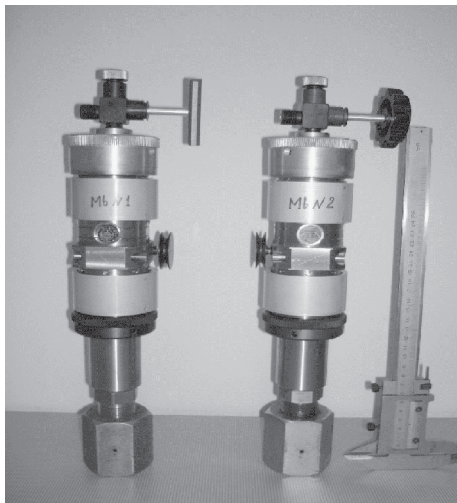


Рис. 1. Измерительные мультипликаторы «Мультибар»

масса измерительного мультипликатора составляла более 40 кг, что вызывало трудности при его эксплуатации и транспортировании.

Усовершенствование ГЭТ 43—73. Был разработан новый измерительный мультипликатор «Мультибар» (рис. 1), коэффициент мультипликации которого $K = 100$, а его масса снижена до 5,5 кг. Несоосность поршневых пар низкого и высокого давления в новом мультипликаторе уменьшена в десятки раз. В результате этого и из-за применения износостойкого покрытия поршней высокого давления их ресурс увеличен с 30 до 1000 ч. Совершенствование конструкции позволило уменьшить составляющую НСП эталона, обусловленную приводом вращения поршней, до пренебрежимо малого значения.

К 2010 г. гидродинамическая модель поршневых пар высокого давления имела оцениваемую точность, в ней были учтены все известные факторы течения рабочей жидкости и барическое изменение ее свойств [3, 4]. Данную модель можно было использовать для несоосных нецилиндрических поршневых пар. Деформационная модель была не так адекватна, поскольку деформацию поршневой пары высокого давления рассчитывали в соответствии с задачей Ляме теории упругости, решенной для бесконечно длинной трубы, находящейся под постоянным давлением [5]. В реальных поршневых парах условия задачи Ляме не соблюдаются: давление меняется от подпоршневого до атмосферного, размеры цилиндра ограничены. Метод конечных элементов позволял учитывать распределение давления и конструкционные особенности поршневых пар при расчете их деформации. Для реализации этого метода использовали программу «ANSYS». Так как метод являлся приближенным и точность решения априори была неизвестна, провели специальное исследование по оценке погрешности этого метода при расчете деформации конкретных поршневых пар. Анализ полученных данных с применением основных положений линейной теории упругости показал, что максимальная погрешность вычислений составляет 0,02 мкм [6—8].

Распределение давления в поршневой паре находили из решения дифференциального упругогидродинамическо-

го уравнения [3, 4]. Входящие в него параметры существенно зависят от давления: при воспроизведении давления 1,6 ГПа жидкость сжимается на 25 %, зазор в верхней части поршневой пары уменьшается в 20 раз, вязкость увеличивается в 1000 раз. Из-за противодействия в ядре уравнения образуется полюс 3-го порядка, который не позволил рассчитать распределение давления в поршневой паре ГЭТ 43—73 во всем диапазоне воспроизводимых давлений. По этой причине при создании ГЭТ 43—73 диапазон воспроизводимых давлений 100—1500 МПа был разбит на три участка шириной по 500 МПа, но даже эта мера не дала возможности получить необходимые скорости опускания поршня.

В результате применения твердосплавного цилиндра со стальным поршнем и нового программного обеспечения при создании Государственного первичного эталона единиц давления в диапазоне 10—1600 МПа и эффективной площади поршневых пар грузопоршневых манометров в диапазоне 0,05—1 см² ГЭТ 43—2013 удалось реализовать единые поршневые пары высокого давления в диапазоне 100—1600 МПа с малыми зазорами (до 0,5 мкм). При этом максимальная скорость опускания поршня и соответствующая составляющая НСП эталона были снижены в 40 раз.

При создании ГЭТ 43—73 параметры упругости материалов поршневых пар (стали 50ХФА и ШХ15) измеряли на образцах специальной формы, термообработанных аналогично поршням и цилиндрам. В новом эталоне применены поршневые пары, изготовленные из стали, твердого сплава и карбида кремния. Поскольку по техническому заданию требовалось повысить точность эталона на порядок, а также учитывая недостаточную воспроизводимость свойств стандартных твердых сплавов, была разработана методика измерений упругих параметров элементов поршневых пар не на образцах, а на изделиях. Первые измерения спеченных заготовок из твердого сплава показали, что сплавы отличаются значительной неоднородностью, не позволяющей реализовать требуемые метрологические характеристики эталона. Для исправления этого положения сначала корректировали состав сплава и технологию изготовления заготовок, а после получения заготовки с достаточной однородностью и изотропностью выполняли высокоточные измерения их модуля Юнга и коэффициента Пуассона. Измерения проводили ультразвуковым методом с возбуждением резонансных крутильных и продольных колебаний, параметры рассчитывали с введением поправок на дисперсию и адиабатичность колебаний. Расширенная неопределенность результатов измерений модуля Юнга и коэффициента Пуассона составила 0,1 и 0,05 %, соответственно. Сдвиговую вязкость при высоких давлениях глицерин-гликолевых смесей измеряли с помощью усовершенствованного вискозиметра высокого давления методом катящегося шарика. Давление при этом измеряли манганиновым манометром, который использовали как компаратор (калибровали непосредственно до и после измерений вязкости жидкости). Расширенная неопределенность результатов измерений барического увеличения вязкости жидкости составила 1 %. Измерения вязкости жидкости можно было бы упростить, применив вибрационный метод, однако в этом случае результаты были бы искажены вязкоупругими параметрами жидкости.

Впервые в названии государственного первичного эталона единицы давления учтено важнейшее свойство грузопоршневых манометров: при их поверке им передается не единица давления, а единица эффективной площади поршневой пары.

В состав усовершенствованного эталона включена групповая мера эффективной площади — три поршневые пары из карбида кремния с поршнем диаметром 60 мм [9]. Достоинства этого материала: гомогенность и изотропность, высокая твердость (9 по шкале Мооса) и износостойкость, малый температурный коэффициент линейного расширения ($3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$). Заготовки поршневых пар изготовлены фирмой «ВИКА МЕРА» (г. Москва). Исследования с целью получения требуемых параметров нецилиндричности поршней и цилиндра выполнены во ВНИИФТРИ. Для линейных измерений поршневых пар в ГЭТ 43—2013 применяли компараторы длины «Микро» и «Аэротест» с разрешающей способностью 0,01 мкм; концевая мера длины класса точности 0 была поверена во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева с нормированной погрешностью $\pm 0,032$ мкм. Для уменьшения случайной составляющей НСП выполнены 100-кратные измерения всех геометрических величин, температуру при этом определяли с помощью платиновых термометров в 10 точках. Эффективную площадь поршневых пар рассчитывали по данным линейных измерений с учетом реальных профилей продольного сечения каждой пары, деформации, а также их несоосности, возникающей из-за неизбежной эксцентricичности центра масс нагрузки. Результирующая расширенная суммарная неопределенность результатов измерений эффективной площади поршневых пар составила $2 \cdot 10^{-6}$. Это значение подтверждено гидростатическими уравновешиваниями поршневых пар как с жидкостным, так и газовым заполнением зазора, стандартная неопределенность типа A результатов уравновешиваний не превышала $5 \cdot 10^{-7}$.

Измерительная техника № 11, 2014

Мера эффективной площади — поршневая пара с номинальной площадью 1 см^2 — была откалибрована по эталону-копии ГЭТ 23—2011 с расширенной неопределенностью результата $1,8 \cdot 10^{-5}$, различие результатов калибровки и измерений составило $3,5 \cdot 10^{-6}$, что не противоречит оценке НСП этой меры.

Реализация технической возможности поверять грузопоршневые эталоны на штатных жидкостях и в диапазоне воспроизводимых давлений привлекательна по двум причинам:

компенсируется неточность барической поправки к эффективной площади поршневых пар, обусловленная отсутствием контроля профиля продольного сечения канала цилиндров при изготовлении грузопоршневых манометров.

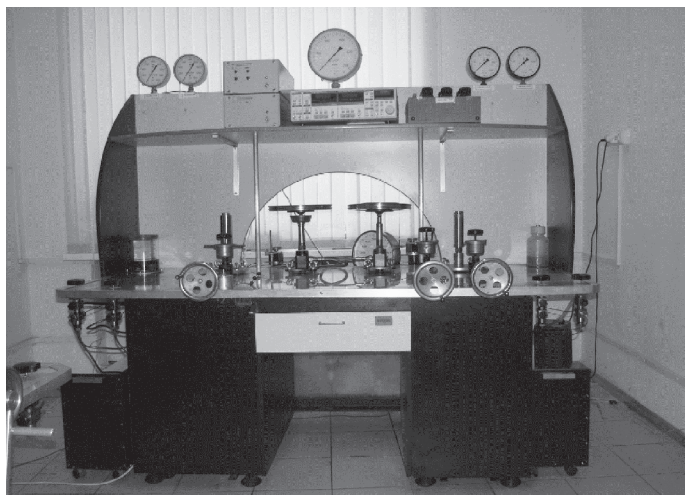


Рис. 2. Установка УСВД-1600

давлениях (от нескольких сотен килопаскалей) из-за изменения плотности газа при использовании газообразной среды.

Практикуемая в России поверка грузопоршневых манометров с верхними пределами измерений выше 10 МПа на жидкостях, сильно отличающихся от штатной, а также поверка воспроизводимых давлений только в начальной части диапазона способствуют необоснованному бракованию грузопоршневых эталонов по скорости опускания поршня и не обеспечивают единства измерений с нормированными метрологическими параметрами.

Созданная во ВНИИФТРИ аппаратура позволяет повысить достоверность результатов поверки грузопоршневых манометров, устранить их бракование по скорости опускания поршня, сократить время поверки до 1—3 ч, уменьшить трудоемкость и стоимость поверки.

Для воспроизведения единицы давления и выполнения поверок эталонов в диапазоне до 1600 МПа создана установка УСВД-1600 (рис. 2), которая отличается от применявшейся в ГЭТ 43—73 с узлами массой до 50 кг тем, что масса входящих в ее состав гидравлических узлов высокого давления не превышает 16 кг. Кроме того, конструктивное исполнение установки облегчает доступ к узлам. В состав установки входит компаратор высоких давлений на основе манганиновых преобразователей давления с разрешающей способностью 300 Па.

Нормированная НСП эталона при воспроизведении единицы эффективной площади поршневых пар и единицы давления в диапазоне до 250 МПа с целью гармонизации с ГЭТ 23—2011 принята равной $\pm 1,5 \cdot 10^{-5}$, при воспроизведении давления до 1600 МПа — $\pm 2 \cdot 10^{-5}$.

Литература

1. **Жоховский М. К.** Теория и расчет приборов с неуплотненным поршнем. М.: Машгиз, 1959.
2. **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; **Bakhvalova V. V., Zolotikh E. V., Borovkov V. M.** State special standard for pressure units in the range from $2500 \cdot 10^5$ to $15000 \cdot 10^5$ Pa // Measurement Techniques. 1973. V. 16. N. 11. P. 1603—1605.
3. **Исследования** в области высоких давлений / Под ред. Е. В. Золотых. М.: Изд-во стандартов, 1987.
4. **Боровков В. М.** Теоретические модели, вопросы конструирования, технологии и рационального применения грузопоршневых манометров избыточного давления: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. докт. техн. наук. М., 1991.
5. **Феодосьев В. И.** Сопротивление материалов. М.: Наука, 1972.
6. **Асланян А. Э.** Отклонения деформации поршня и цилиндра поршневой пары высокого давления от деформации, рассчитанной с использованием решения задачи Ляме // Метрология. 2011. № 6. С. 20—25; **Aslanyan A. E.** Deviation of deformation of piston and cylinder of high-pressure piston pair from deformation as calculated with the use of a solution of the Lamé problem // Measurement Techniques. 2011. V. 54. N. 6. P. 694—697.
7. **Aslanyan A.** Abstracts of «CCMP-5 and IMEKO TC-16 Conference». Berlin, 2011.
8. **Асланян А. Э.** Методы уменьшения неисключенной систематической составляющей погрешности государственного первичного специального эталона единицы давления ГЭТ 43—73: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. Менделеево, 2012.
9. **Пат. 2219506 РФ.** Грузопоршневой манометр / В. М. Боровков, С. В. Боровков // Изобретения. Полезные модели. 2003. № 35.

Дата принятия 15.09.2014 г.