

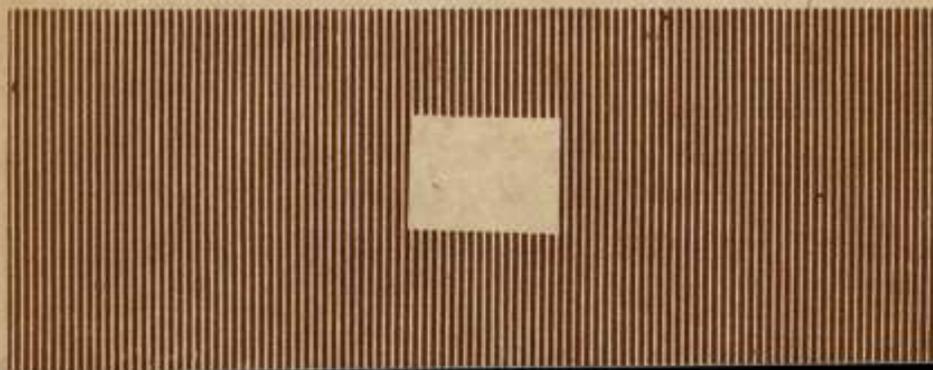
ВСЕСОЮЗНЫЙ
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
МЕТРОЛОГИИ им. Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

5/VI-78

ИССЛЕДОВАНИЯ
В ОБЛАСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ
ИЗМЕРЕНИЙ

ТРУДЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ИНСТИТУТОВ СССР

Выпуск 223 (283)



166948



ВСЕСОЮЗНЫЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ МЕТРОЛОГИИ
имени Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

ж/166945

БИБЛИОТЕКА
Всесоюзного научно-иссле-
дательского института метрологии
имени Д. И. Менделеева

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

ТРУДЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ИНСТИТУТОВ СССР

Выпуск 223 (283)

Под редакцией канд. техн. наук *Е. Ф. Долинского*



ЛЕНИНГРАД
1978

ПРЕДИСЛОВИЕ

Освещаются результаты работ по методам и аппаратуре для измерения избыточных, средних и малых абсолютных давлений, а также переменных во времени давлений.

Рассматривается построение фазо-частотных характеристик акселерометров по результатам испытаний на двойной центрифуге.

В области избыточных давлений дается классификация поршневых пар и рассматриваются грузоприемное устройство рабочего эталона и оптическое устройство для сличения показаний грузопоршневых манометров. Среднему абсолютному давлению посвящены статьи, в которых описаны созданные грузопоршневые манометры абсолютного давления и применяемые в ртутных барометрах интерференционные отсчетные устройства. В области вакуумных измерений рассмотрена задача оптимального режима при измерениях ионизационными манометрами, а также вопросы повышения верхнего предела измерений мембранно-емкостного манометра и применения редуцированных установок для измерения высокого и сверхвысокого вакуума.

К области переменных во времени давлений относится описание ударных труб, устройств для измерения скорости ударной волны, инерционного и клапанного методов воспроизведения переменных давлений, интерференционного преобразователя давления и исследования динамических погрешностей.

Сборник рассчитан на инженеров и научных сотрудников, работающих в области измерения давления, а также на студентов вузов.

Редактор

КЛАССИФИКАЦИЯ КОНСТРУКЦИЙ ПОРШНЕВЫХ МАНОМЕТРОВ

Поршневые манометры широко применяются для измерения абсолютных и избыточных давлений, а также разностей давлений. В настоящее время существует более 50 конструктивных разновидностей поршневых манометров в зависимости от назначения и пределов измерения.

Поршневой манометр состоит из следующих основных узлов: поршневой группы, системы нагружения, отсчетного устройства и устройства для вращения или вращательных колебаний поршня. Различные конструкции могут не содержать отдельных узлов или их частей.

Поршневая группа может включать несколько поршней и цилиндров. Поршни применяют простые и дифференциальные, причем последние могут быть одно-, двух- и трехступенчатыми.

Простейшая поршневая группа представляет собой поршневую пару — поршень и цилиндр (рис. 1).

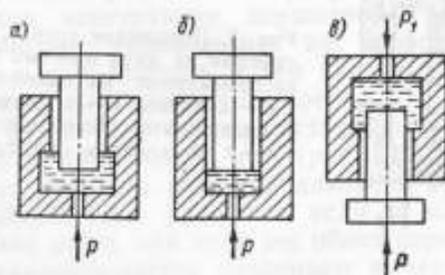


Рис. 1. Поршневые пары: а — с поршнем постоянной рабочей длины; б — с поршнем переменной рабочей длины; в — перевернутая

На рис. 1, *а* изображена пара с поршнем постоянной рабочей длины (длина зазора), а на рис. 1, *б* — с поршнем переменной рабочей длины (при осевом перемещении поршня относительно цилиндра длина зазора изменяется). Наибольшее распространение получили пары с поршнем постоянной рабочей длины.

На рис. 1, *в* показана перевернутая поршневая пара. Если в этой паре создать давление $p_1 = 0$, то с помощью манометра такой конструкции можно измерять атмосферное давление $p = p_в$, при $p_1 < p_в$ можно измерять разрежение, т. е. $p_p = p_в - p_1$.

Схема поршневой пары с дифференциальным поршнем изображена на рис. 2. Дифференциальные пары могут иметь также поршни постоянной или переменной длины или выполняться комбинированными: одна ступень с переменной, а другая — с постоянной длиной. Такая пара позволяет измерять как разность, так и сумму давлений p_1 и p_2 . Конструктивно дифференциальные пары иногда выполняют путем соединения двух простых поршней в одном дифференциальном цилиндре. Поршни соединяются с помощью гибких тросиков (если $p_1 > p_2$), подвижных шарниров или просто «в упор», если $p_1 < p_2$. Следует отметить, что изготовить два таких поршня технологически гораздо проще, чем один дифференциальный.

Принципиальная схема поршневой группы, состоящей из двух простых пар, расположенных на одной оси, показана на рис. 3. Способы соединения поршней аналогичны вышеупомянутым. При такой комбинации поршневых пар упрощается изготовление как поршней, так и цилинд-

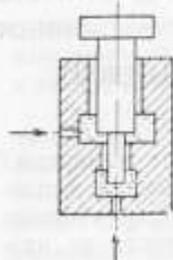


Рис. 2. Поршневая пара с дифференциальным поршнем.

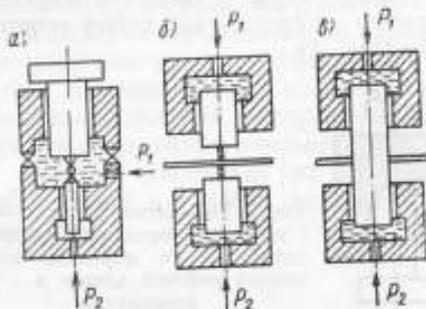


Рис. 3. Поршневая группа, состоящая из двух простых пар, расположенных на одной оси: а — с одним; б — с двумя подвижными шарнирами; в — с соединением «в упор»

ров, однако при сборке возникают трудности, связанные с установкой цилиндров по одной оси.

Широкое распространение получили поршневые группы, состоящие из простой и дифференциальной пар или трех простых пар, расположенных по одной оси (рис. 4 и 5). Такие конструк-

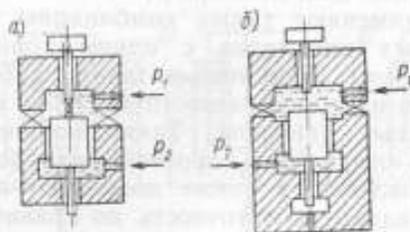


Рис. 4. Поршневые группы, состоящие из простой и дифференциальной пар; а — с жесткой связью между поршнями, б — с гидравлической связью поршней

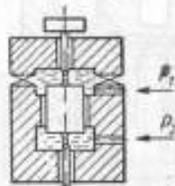


Рис. 5. Поршневая группа, состоящая из трех простых пар, расположенных на одной оси

ции позволяют измерять разности давлений $p_1 - p_2$ и абсолютные давления, если давление в верхней камере равно нулю.

На рис. 4, б изображена схема поршневой группы, в которой жесткая связь между простым и дифференциальным поршнем заменена гидравлической, при которой верхняя камера заполняется жидкостью. Приборы, построенные по такой схеме и получившие название измерительных мультипликаторов, позволяют измерять высокие давления.

Применяются также группы, в которых оси поршневых пар параллельны. На рис. 6 изображена принципиальная схема поршневой группы с двумя поршневыми парами — простой и дифференциальной. Такая конструкция поршневой группы позволяет уравновесить вес дифференциального поршня, и тем самым уменьшить нижний предел измерения.

Поршневая группа, состоящая из двух дифференциальных пар (рис. 7), позволяет измерять разность давлений $p_1 - p_2$ и абсолютные давления, если p_1 или p_2 равно нулю, при этом вес обоих поршней уравновешивается давлением в верхних камерах, соединенных между собой.

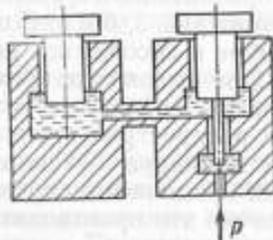


Рис. 6. Поршневая группа с двумя поршневыми парами — простой и дифференциальной

Конструктивно комбинацию из двух простых пар, расположенных на одной оси, выполняют без уплотнения цилиндров между собой (рис. 3, б). При такой схеме они связаны жестким каркасом. Приборы, построенные по этой схеме, позволяют измерять разности давлений $p_2 - p_1$ и абсолютные давления при $p_1 = 0$.

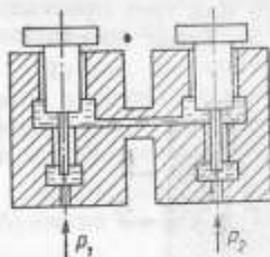


Рис. 7. Поршневая группа, состоящая из двух дифференциальных пар.

Применяют также комбинацию двух простых цилиндров с одним поршнем (рис. 3, в). С помощью таких приборов можно измерять разности давления и абсолютные давления. Такие поршневые пары отличаются простой технологией изготовления, а также позволяют получить наивысшую точность по сравнению с другими конструкциями с двумя цилиндрами.

Кроме вертикального расположения поршней, применяется наклонное и горизонтальное (рис. 8 и 9). Конструкции приборов

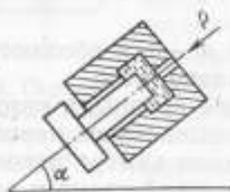


Рис. 8. Поршневая пара с наклонным расположением поршня.

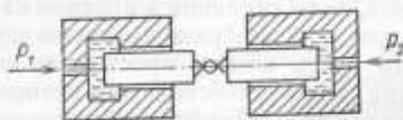


Рис. 9. Поршневая пара с горизонтальным расположением поршней.

с горизонтальным расположением поршня аналогичны приведенным на рис. 3, б и в. С помощью таких приборов измеряют атмосферное и абсолютное давления, а также разность давлений.

При высоких давлениях применяют цилиндры с «противодавлением», которое осуществляется несколькими методами. Наиболее распространенным из них является метод постоянного сжатия цилиндра путем напесковки на него другого цилиндра (так называемые скрепленные цилиндры) с некоторым натягом. Обычно это производится путем запресовки холодного внутреннего цилиндра в разогретый до определенной температуры наружный. Применяют также метод переменного сжатия цилиндра путем запресовки, по мере повышения давления, внутреннего цилиндра (наружная поверхность его имеет форму усеченного

конуса) во внешний. В некоторых конструкциях цилиндров противодействие создается автоматически с повышением измеряемого давления. На рис. 10, а, б, в приведены схемы цилиндров с автоматически повышающимся противодействием, на рис. 10, г — с автономным противодействием. В схеме, изображенной на рис. 10, а, измеряемое давление, действуя на наружную часть

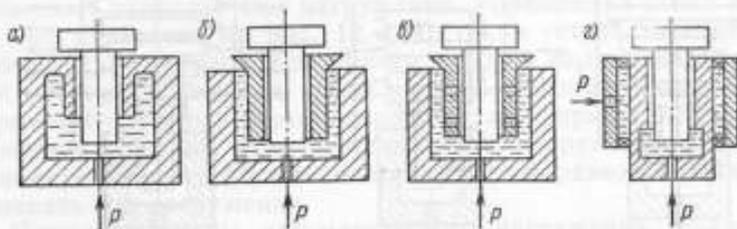


Рис. 10. Схемы цилиндров с автоматически создающимся противодействием: а, б, в — с автоматически повышающимся давлением; г — с автономным противодействием.

цилиндра, сжимает его и уменьшает зазор. Однако при определенном давлении зазор становится слишком малым и поршень «закусывает». В схеме, представленной на рис. 10, б, это происходит вследствие различных перепадов давлений по зазору между поршнем и цилиндром и наружной поверхностью цилиндра и корпуса.

Явление «закусывания» устраняется в схеме, показанной на рис. 10, в, так как благодаря наличию отверстий, соединяющих зазоры, сечения цилиндра находятся в состоянии всестороннего сжатия. Однако наличие дополнительного зазора увеличивает утечки жидкости, что при высоких давлениях весьма нежелательно.

Схема, изображенная на рис. 10, г, наиболее удобна в эксплуатации, так как позволяет изменять величину противодействия независимо от измеряемого давления.

Системы нагружения. В настоящее время в конструкциях поршневых манометров применяют три способа нагружения: ручной, полуавтоматический и автоматический.

Наложение грузов на грузоприемную тарелку поршня ручным способом является трудоемкой и тяжелой операцией, поэтому в последнее время для этой цели применяют различные полуавтоматические и автоматические устройства. Принципиальные схемы наиболее распространенных полуавтоматических устройств приведены на рис. 11 и 12. Наиболее распространенная схема последовательного наложения и снятия грузов показана

на рис. 11, а. Здесь каждый груз лежит на своей опоре. Между опорами предусмотрен необходимый интервал, и по мере опускания несущей каретки грузы ложатся на грузоприемную тарелку последовательно, один на другой. Разгрузку производят при подъеме несущей каретки.

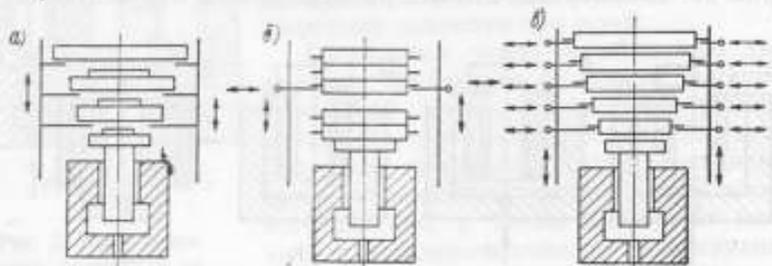


Рис. 11. Схемы полуавтоматических устройств наложения грузов: а — с последовательным наложением; б — с общей подвижной опорой; в — с подвижной опорой для каждого груза.

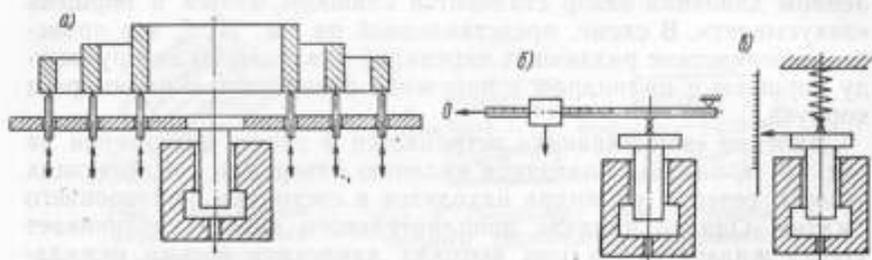


Рис. 12. Схемы устройств автоматического нагружения: а — путем комбинации грузов; б — с помощью рычажного механизма; в — с помощью динамометра.

Другая разновидность подобных устройств изображена на рис. 11, б. Грузы имеют выступы, которыми они опираются на подвижную опору. Опустив несущую каретку так, чтобы все грузы лежали на горизонтальной тарелке, подвижную опору поворачивают вокруг вертикальной оси и выводят из зацепления с буртиком грузов. Подвижную каретку перемещают вверх до высоты второго груза, затем опору вводят в зацепление. Операцию повторяют каждый раз, когда нужно положить или снять груз. Недостатком такой конструкции является низкая производительность.

В схеме, приведенной на рис. 11, в, для каждого груза предусмотрены подвижные опоры, и поэтому нет необходимости накладывать сначала все грузы на горизонтальную тарелку.

Устройства нагружения, изображенные на рис. 11, а, б и в, позволяют получать дискретные значения нагружающего усилия, причем шаг нагружения постоянный и равен весу одного груза.

Существуют устройства, которые путем комбинаций грузов позволяют изменять шаг нагружения. Упрощенная схема одного из них приведена на рис. 12, а. В таких устройствах имеется набор грузов разного веса, причем каждый из них снабжен опорой. Обычно применяют грузы кольцевой формы. Опоры могут перемещаться вдоль вертикальной оси, не соприкасаясь с грузоприемной тарелкой. Если опору опустить, то груз ляжет на грузоприемную тарелку. Путем сочетания грузов разного веса можно изменять шаг нагружения.

Примером схемы автоматического нагружения может служить рычажное устройство, схема которого показана на рис. 12, б. При перемещении груза вдоль рычага происходит плавное изменение силы, приложенной к поршню. Применение такого устройства возможно лишь при наличии систем слежения и обратной связи, удерживающих поршень в строго определенном положении. Иногда для уравнивания действия давления применяют динамометры. Схема такого устройства приведена на рис. 12, в. Недостатком такого устройства являются дополнительные погрешности, обусловленные применением динамометра и жесткого шарнира.

Системы отсчета. Применяются следующие способы отсчета положения равновесия поршня: визуальный без указателей и с указателями, оптический теневой или с микроскопом, с применением электрических преобразователей линейных перемещений.

Система уравнивания поршней. Уравнивание веса поршня с грузоприемным устройством применяют в тех случаях, когда нужно уменьшить нижний предел измерения. Схемы уравнивания веса поршня приведены на рис. 13. Неудобством системы уравнивания столбом жидкости (рис. 13, а) является громоздкость конструкции и необходимость постоянно фиксировать положение равновесия с помощью микроскопа, что быстро утомляет зрение оператора.

Общим недостатком схем, показанных на рис. 13, б, в, г, является наличие механической связи поршня с рычажными или пружинными устройствами, вызывающей дополнительные погрешности вследствие трения в соединительных шарнирах. Кроме того, схемы, изображенные на рис. 13, б, в, г, д, требуют

применения микроскопа, а из-за недостаточной упругости пружины возникает «непостоянство нуля». В схеме, приведенной на рис. 13, *д* пружина используется для увеличения быстродействия прибора.

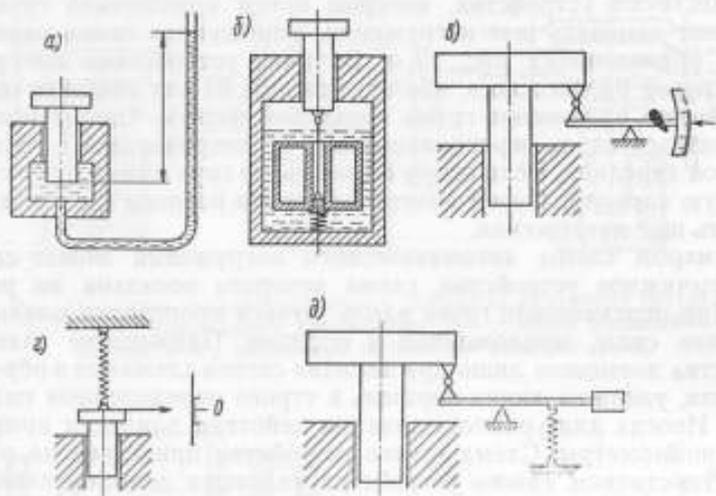


Рис. 13. Схемы уравновешивания веса поршня: а — столбом жидкости; б — под действием силы Архимеда; в — с помощью рычажного устройства; г — с помощью упругого элемента; д — с помощью рычажного устройства и упругого элемента.

Системы вращения поршня относительно цилиндра. Вращение осуществляют вручную или посредством привода. Иногда применяют вращение цилиндра при неподвижном поршне.

Грузоприемные устройства. Различают следующие грузоприемные устройства: простую грузоприемную тарелку, жестко соединенную с поршнем, и грузоприемники с трением скольжения или качения.

ИССЛЕДОВАНИЕ ГРУЗОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ РАБОЧИХ ЭТАЛОНОВ ЕДИНИЦЫ ДАВЛЕНИЯ С ВЕРХНИМ ПРЕДЕЛОМ ИЗМЕРЕНИЯ $6 \cdot 10^7$ ПА

При аттестации рабочих эталонов единицы давления с верхним пределом измерений $6 \cdot 10^7$ Па (~ 600 кгс/см²) их главный параметр — приведенная площадь поршня определяется методом гидростатического уравнивания нагружаемых поршней аттестуемого рабочего эталона и эталона-копии, имеющего верхний предел измерений $6 \cdot 10^6$ Па (~ 60 кгс/см²). Поскольку диапазоны измерений у этих эталонов различны, гидростатическое уравнивание проводят при давлении до $6 \cdot 10^6$ Па, т. е. до верхнего предела измерений эталона-копии.

В рабочих эталонах с верхним пределом измерений $6 \cdot 10^7$ Па передача усилия (веса грузов) на поршень осуществляется через грузоприемное устройство с шарикоподшипниками. Ввиду того, что силы трения в подшипниках учесть не представляется возможным, составляющая этих сил, действующая на поршень, компенсируется изменением приведенной площади поршня. Измененная площадь поршня определяется при гидростатическом уравнивании поршней.

При исследованиях рабочих эталонов были установлены допускаемые отклонения от овальности и конусности всех деталей грузоприемного устройства, которые могут влиять на значения сил трения. В связи с этим при первичной и последующих аттестациях рабочих эталонов приведенную площадь поршня и среднюю квадратическую погрешность определяли при давлениях до $6 \cdot 10^6$ Па, т. е. при нагрузке на поршень 120 Н (~ 12 кгс). Про-

веденные исследования позволили предположить, что указанные параметры сохраняют свои значения и при давлениях свыше $6 \cdot 10^6$ Па, т. е. при нагрузке на поршень более 120 Н. Для проверки полученных результатов проводились дополнительные исследования влияния сил трения в шарикоподшипниках грузоприемного устройства рабочих эталонов на значение приведенной площади поршня и средней квадратической погрешности ее определения. Для этого использовалась вспомогательная поршневая пара, конструкция которой была разработана в лаборатории измерения давления. Поскольку эти силы трения зависят от веса грузов, а максимальная нагрузка на поршень рабочего эталона равна 1200 Н (~ 120 кгс), то для достижения давления $6 \cdot 10^6$ Па при такой нагрузке приведенная площадь поршня вспомогательной поршневой пары должна составлять 2 см^2 .

Дополнительные исследования рабочих эталонов заключались в следующем. По эталону-копии находили характеристики вспомогательной поршневой пары — приведенную площадь поршня и среднюю квадратическую погрешность ее определения при непосредственной нагрузке на поршень до 1200 Н и давлении до $6 \cdot 10^6$ Па. Для этой цели применяли приспособление, принципиальная схема которого представлена на рис. 1. На поршень 1 надевали (запрессовывали) грузоприемный колокол 3, имеющий верхние и нижние окна для установки специальной пластинки. На устройство для создания давления устанавливали цилиндр 2 с поршнем 1 при помощи штуцера 5, к которому цилиндр крепился гайкой 4. После определения указанных характеристик колокол снимали с поршня, а вспомогательную и основную поршневую пару поочередно вставляли в корпус исследуемых рабочих эталонов для определений этих параметров по эталону-копии при тех же давлениях и нагрузках на поршень. При этом применяли приспособление, принципиальная схема которого приведена на рис. 2. Корпус 3 рабочего эталона со вставленной в него вспомогательной поршневой парой (поршень 1 и цилиндр 2) устанавливали на устройство для создания давления при помощи переходного штуцера 5, к которому цилиндр 2 крепился корпусом рабочего эталона через втулку 4.

Как показали дополнительные исследования, расхождения указанных параметров вспомогательной поршневой пары, определяемых при двух описанных способах нагружения поршня, лежат в допускаемых пределах. Эти допускаемые отклонения (в процентном выражении) справедливы и для поршня с номинальным значением приведенной площади $0,2 \text{ см}^2$.

Таким образом, дополнительные исследования подтвердили правильность выбора методики аттестации рабочих эталонов.

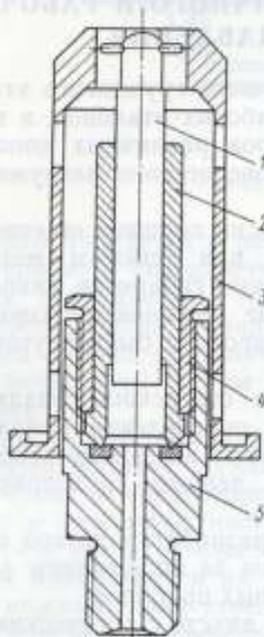


Рис. 1. Приспособление для непосредственной нагрузки на поршень вспомогательной поршневой пары.

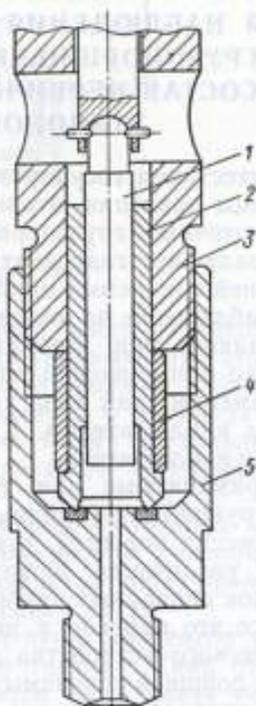


Рис. 2. Приспособление для нагрузки на поршень вспомогательной пары через грузоприемное устройство рабочего эталона

Поступила в редакцию 12/1-1977 г.

**ОПТИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО
ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ПОЛОЖЕНИЕМ РАВНОВЕСИЯ
ГРУЗОПОРШНЕВЫХ МАНОМЕТРОВ, ВХОДЯЩИХ
В СОСТАВ ПЕРВИЧНОГО, ВТОРИЧНОГО И РАБОЧИХ
ЭТАЛОНОВ ЕДИНИЦ ДАВЛЕНИЯ**

Аттестация государственного первичного группового эталона единицы давления, эталона-копии и рабочих эталонов, а также высокоточных грузопоршневых приборов различных конструкций включает гидростатическое уравнивание нагруженных поршей сличаемых приборов.

Наблюдение за положением равновесия поршей обычно осуществляют при помощи микроскопа или теневого методом. Однако при сличении приборов различных габаритов микроскоп неприменим, так как уравнивание поршей производится одним наблюдателем. Кроме того, микроскоп быстро утомляет зрение наблюдателя.

Применяемые при теновом методе статоскопы различных конструкций непригодны для точного определения положения равновесия поршей, так как они не дают на экране необходимого увеличения расстояния между тенями грузоприемных тарелок сличаемых приборов.

Все это привело к необходимости разработки другой схемы оптического устройства для наблюдения за положением равновесия поршей сличаемых грузопоршневых приборов.

В приведенной схеме (см. рисунок) вместе с оптическим устройством, разработанным во ВНИИМ, показано также устройство для создания давления с присоединенными к нему двумя грузопоршневыми приборами, поршни которых находятся в рабочем положении. Оптическое устройство состоит из двух одинаковых частей, каждая из которых предназначена только для одного грузопоршневого прибора.

На левой (и правой) части станины устройства для создания давления укреплен стержень (на рисунке не показан), имеющий резьбу. По стержню можно перемещать рейку с находящимися на ней зеркалами и положительной линзой, последнюю в свою очередь, можно перемещать по рейке в продольном направлении.

В зависимости от расстояния между станиной устройства для создания давления и грузоприемной тарелкой прибора, поршень

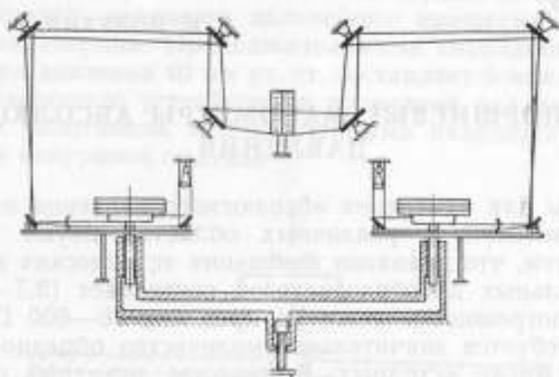


Схема оптического устройства

которого находится в рабочем положении, рейка перемещается по стержню и укрепляется на нем двумя гайками. При этом ось линзы, проходящая в направлении зеркал, должна находиться возможно ближе к задней (по отношению к наблюдателю) нижней кромке грузоприемной тарелки. Рейку устанавливают под небольшим углом к нижней плоскости грузоприемной тарелки.

Над устройством для создания давления укреплены экран, имеющий матовое стекло с нанесенными на нем делениями, и осветитель с конденсором, который питается через трансформатор от сети переменного тока напряжением 220 В.

Пучок света от осветителя проходит через конденсор и зеркалом направляется на грузоприемную тарелку. Тень от заднего нижнего края тарелки проектируется через линзу на зеркало и от него поочередно на зеркала. От зеркала тень проектируется на экран.

Для получения достаточно четкой тени на экране осветитель с конденсором перемещают в различных направлениях, а зеркала устанавливают под необходимым углом. Благодаря этому на левой и правой частях экрана появляются отдельные тени от грузоприемных тарелок приборов, установленных соответственно слева и справа от экрана.

Описанное оптическое устройство дает 25-кратное увеличение и хорошо зарекомендовало себя в эксплуатации.

Поступила в редакцию 12/1-1977 г.

ГРУЗОПОРШНЕВЫЕ МАНОМЕТРЫ АБСОЛЮТНОГО ДАВЛЕНИЯ

Приборы для измерения абсолютного давления находят широкое применение в различных областях науки и техники. В связи с тем, что диапазон измерения технических манометров и измерительных преобразователей составляет $(2,7-13000) \cdot 10^2$ Па, а их погрешность лежит в пределах 26—600 Па, для их проверки требуется значительное количество образцовых приборов, в том числе исходных. В качестве исходных образцовых средств измерений применяются грузопоршневые и ртутные манометры абсолютного давления.

Принцип действия грузопоршневых манометров основывается на уравнивании давления, действующего на поршень, весом поршня и грузов. Основным классификационным признаком этих приборов является тип поршневой системы. В зависимости от типа поршневой системы можно выделить манометры с простым поршнем, параллельными, соосными и горизонтальными поршнями. Поршни применяют простые и дифференциальные, причем последние могут быть одно- и двухступенчатыми. К первому типу относится грузопоршневой манометр (рис. 1), описанный в работе [1]. Основным элементом его является простая поршневая пара. Номинальное значение приведенной площади поршня $F=5 \text{ см}^2$. На поршне посредством сферического шарнира установлен грузоприемный колокол, на который накладывают грузы. В комплект прибора входит семь больших и четыре маленьких груза. Масса каждого большого груза соответствует давлению 100 мм рт. ст., а маленького—20 мм рт. ст. Нижний предел измерений ограничен массой поршня и колокола из-за отсутствия устройства для уравнивания их массы и составляет 40 мм рт. ст. Манометр снабжен нагружающим устройством. Грузы и часть нагружающего устройства помещены в верхнюю камеру, в которой во время измерений создают и поддерживают абсолютное давление ~ 2 мкбар. В приборе применена оригинальная система принудительного вращения поршня, состоящая из электродвигателя и рычага. Вал двигателя введен в измерительную камеру. На верхнем торце вала имеется кольцевая проточка, в которую вставлена резиновая O-образная прокладка. При подъеме двигателя рычагом прокладка упирается в торец поршня и поршень приводится во вращение. Максимальная ско-

рость вращения поршня составляет 50 об/мин. К моменту измерения двигатель опускают, дальнейшее вращение поршня происходит по инерции. Продолжительность свободного вращения поршня при давлении 40 мм рт. ст. составляет 5 мин. Подъемный вал нагружающего устройства и приводной вал имеют по два резиновых уплотнения, между которыми находится камера, заполненная вакуумной смазкой.

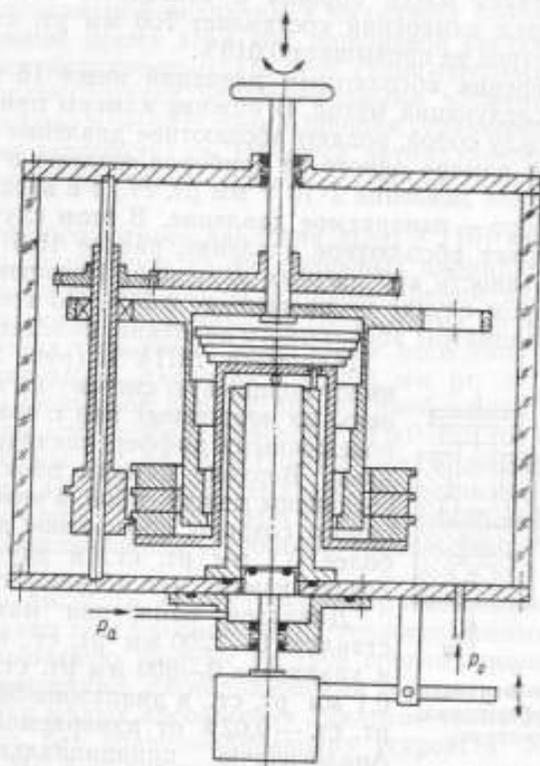


Рис. 1. Схема манометра с простым поршнем

Манометр имеет следующие метрологические характеристики: диапазон измерения абсолютных давлений 40—820 мм рт. ст., погрешность определения приведенной площади поршня $3 \cdot 10^{-3}\%$. Хотя в литературе не приводится значение предела основной погрешности, можно сделать вывод, что по точности прибор находится на уровне отечественных образцовых манометров абсолютного давления 1-го разряда.

Первичный эталон давления [2] состоит из двух параллельно расположенных манометров абсолютного давления. Принципиальная схема манометров одинакова и аналогична предыдущей. Основным элементом прибора является поршневая пара с простым поршнем. Манометры не имеют устройств, уравнивающих вес поршня и грузоприемного устройства, поэтому нижний предел измерений абсолютных давлений равен 15,5 мм рт. ст., что соответствует массе поршня и связанных с ним деталей. Верхний предел измерений составляет 760 мм рт. ст., погрешность манометров не превышает 0,015%.

Для измерения абсолютных давлений ниже 15 мм рт. ст. используют следующий метод. В нижние камеры приборов, соединенные между собой, подают абсолютное давление 15,5 мм рт. ст., в верхней камере одного из приборов создают и поддерживают абсолютное давление $2 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст., а в верхней камере другого прибора — измеряемое давление. В этом случае первый прибор измеряет абсолютное давление, равное 15,5 мм рт. ст., а второй — разность абсолютных давлений. Погрешность измерения во втором случае не превышает 0,05%. По этой же схеме построены манометры абсолютного давления, описанные в [3, 4].

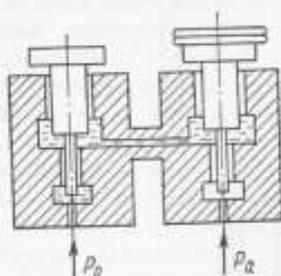


Рис. 2. Схема манометра с двумя дифференциальными поршнями.

Манометр МПА-3 (рис. 2) [5, 6, 7] имеет поршневую систему из двух параллельных поршневых пар с взаимно уравновешенными дифференциальными поршнями. Верхние камеры обоих приборов соединены между собой, в нижней камере одного создают абсолютное давление не более 0,1 мм рт. ст., в другую камеру подают измеряемое абсолютное давление.

Диапазон измерения манометра составляет 0—1200 мм рт. ст., погрешность в диапазоне 0—500 мм рт. ст. составляет 0,1 мм рт. ст., в диапазоне 500—1200 мм рт. ст. — 0,02% от измеряемой величины.

Аналогичную принципиальную схему имеет манометр абсолютного давления фирмы Desgranges and Huot (Франция) [8].

Манометр абсолютного давления МАД-2500 [6, 7] имеет поршневую систему из трех соосных поршневых пар (рис. 3). Измерительным поршнем является средний, верхний предназначен для передачи веса грузов, нижний — для компенсации влияния атмосферного давления и передачи усилия от уравнивающего устройства. Связь между поршнями осуществляется посредством упругих шарниров. Площадь измерительного

поршня равна $2,2 \text{ см}^2$; верхнего и нижнего— $0,2 \text{ см}^2$. Верхняя камера сообщается с вакуумной системой, в нижнюю подают измеряемое давление. Измеряемое давление уравнивают весом грузов, накладываемых на грузоприемную тарелку, закрепленную на верхнем поршне. Частичное уравнивание производят пружинным механизмом. Пределы измерения манометра $0—2500 \text{ мм рт. ст.}$, погрешность $0,05 \text{ мм рт. ст.}$ в диапазоне $0—150 \text{ мм рт. ст.}$, $0,1 \text{ мм рт. ст.}$ в диапазоне $150—500 \text{ мм рт. ст.}$ и $0,02\%$ от измеряемой величины в диапазоне $500—2500 \text{ мм рт. ст.}$ В настоящее время этот тип поршневой системы является наиболее распространенным. По этой схеме построен целый ряд приборов, отличающихся конструктивными элементами, приведенной площадью измерительного поршня, уравнивающими и отсчетными устройствами. Имеются автоматические манометры абсолютного давления с такой же схемой поршневой системы [9].

Манометр абсолютного давления МАД-3 [10] имеет поршневую систему, состоящую из двух соосных цилиндров и притертого к ним поршня (рис. 4). В основном принципиальная схема прибора аналогична предыдущей. В качестве уравнивающего устройства применены квадратные веса типа ВЛТК-5 кг. Диапазон измерения давления $2—2200 \text{ мм рт. ст.}$ Благодаря применению поршневой пары с приведенной площадью поршня 20 см^2 погрешность прибора доведена до $0,05 \text{ мм рт. ст.}$ в диапазоне $2—1000 \text{ мм рт. ст.}$ и $0,1 \text{ мм рт. ст.}$ в диапазоне $1000—2200 \text{ мм рт. ст.}$ По этой схеме создан также инспекторский манометр абсолютного давления ИМАД-4, отличающийся отсутствием уравнивающего устройства, небольшими габаритами и массой [11].

Манометр МС-2 [6, 7] построен по принципиальной схеме, отличной от схем всех рассмотренных грузопоршневых приборов. Он имеет поршневую систему из двух соосных поршневых пар с простыми поршнями, расположенными горизонтально (рис. 5). При измерении малых абсолютных давлений такая схема позволяет обойтись без уравнивающих устройств. Кроме того, в манометре МС-2 во вращение приводятся не поршни, а промежуточные втулки. Диапазон измерения манометра составляет $0—40 \text{ мм рт. ст.}$, погрешность $0,05 \text{ мм рт. ст.}$

Изучение всех типов поршневых систем манометров абсолютного давления позволяет сделать следующие выводы. Наиболее точными являются манометры с простым поршнем, отличающиеся простотой и технологичностью основного элемента — поршневой пары. К их недостаткам следует отнести размещение весовых и других устройств в герметичной камере, что требует при-

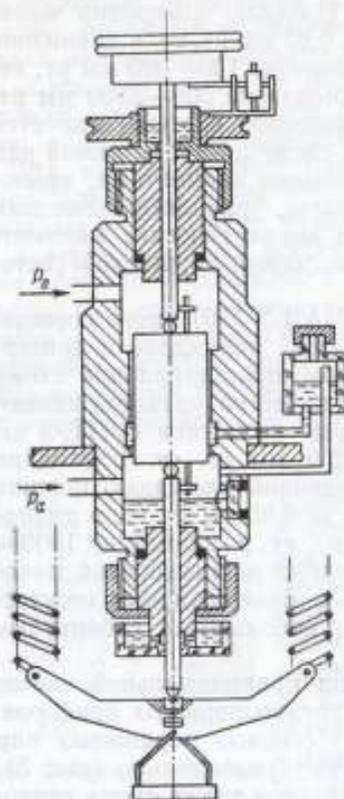


Рис. 3. Схема манометра с тремя соосными поршневыми парами.

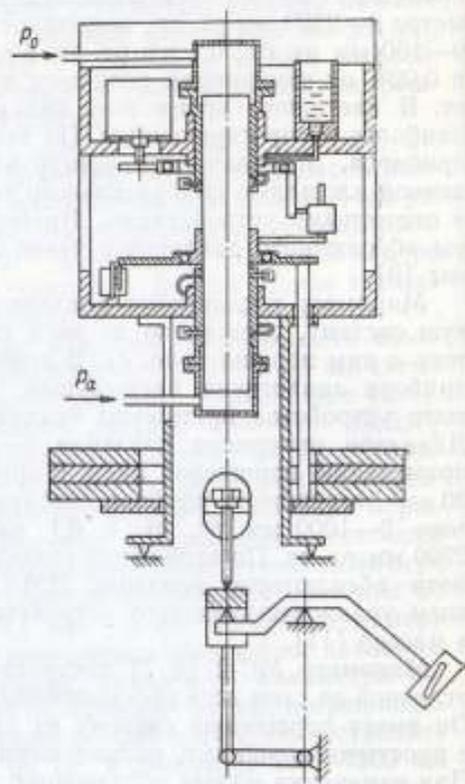


Рис. 4. Схема манометра с двумя соосными цилиндрами и одним поршнем.

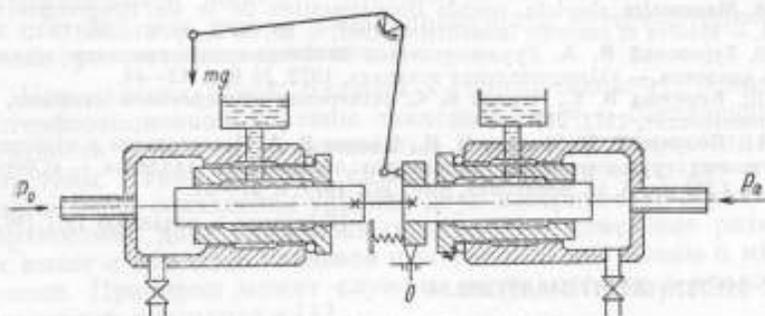


Рис. 5. Схема манометра с двумя соосными поршневыми парами, расположенными горизонтально.

менения вводов движения в вакуум. Такую схему целесообразно применять в приборах разряда эталонов.

Манометры типа МАД-3 имеют поршневую систему, технология изготовления которой не отличается от предыдущей. Конструкция прибора обеспечивает удобство наложения грузов, но имеет усложненную схему уравновешивающего устройства.

Манометры МАД-2500 имеют меньшую точность по сравнению с приборами других типов и самую сложную технологию изготовления поршневой системы. Однако, благодаря такой поршневой системе, эти приборы имеют самую рациональную конструкцию, простое нагружающее и уравновешивающее устройства. Поршневая система их может применяться в автоматических задатчиках абсолютного давления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gieleben J., Wanninger W., Drews K. Über ein Kolbenmanometer zur Prüfung der Barometer. — «PTB — Mitteilungen», 1973, № 3, pp. 158—160.
2. Gascoigne J. Precise pressure measurement in the range 0,1—500 torr. — «Vacuum», v. 21, № 1/2, 1971, pp. 21—26.
3. Ягодкин И. А., Павлов В. Н., Иванов Ю. Д. и др. Грузопоршневой мановакуумметр. Авт. свид. № 198738. — «Бюлл. изобр.», 1967, № 14, с. 26—27.
4. Нидрик П. В. Грузопоршневой манометр. Авт. свид. № 153385. — «Бюлл. изобр.», 1963, № 5, с. 11—12.
5. Точные приборы для измерения абсолютного давления. Составитель К. И. Хансуваров, М., Изд-во стандартов, 1971, 56 с. с ил.
6. Граменицкий В. Н. Грузопоршневые измерительные приборы. М., Изд-во стандартов, 1973, 143 с. с ил.
7. Граменицкий В. Н., Хансуваров К. И. Мановакуумметр с взаимно уравновешенными поршнями. Авт. свид. № 122631. — «Бюлл. изобр.», 1959, № 18, с. 9—11.

8. *Manometre absoluta poends Documentation de la ste Desgranges and Huot.* — *Meures et controle industriels*, 1961, v. 26, № 3, pp. 31—35.

9. Туровский В. А. Грузопоршневой автоматический манометр абсолютного давления. — «Измерительная техника», 1972, № 8, с. 43—44.

10. Карпуша В. Е., Чернов Б. С. Измерение атмосферного давления, Л., Гидрометеосдат, 1973, 277 с. с ил.

11. Полухин Г. И., Фатеев Н. П., Цвелик В. А. Исследование и аттестация образцовых грузопоршневых манометров абсолютного давления. — «Сборник трудов ГГО им. А. И. Воейкова», вып. 392, 1977, с. 27—31.

Поступила в редакцию 12/1-1977 г.

УДК 531.787:(532.217:546.49).082.54

Г. И. ПОЛУХИН, О. В. ЛАВРЕНЕВ, В. А. ЦВЕЛИК

ВНИИМ

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ РАЗНОСТИ УРОВНЕЙ РТУТИ В ЭТАЛОННЫХ МАНОМЕТРАХ АБСОЛЮТНОГО ДАВЛЕНИЯ

Жидкостные *U*-образные манометры абсолютного давления, применяемые в качестве эталонов, как правило, заполняются ртутью. Принцип действия таких манометров основан на уравновешивании измеряемого давления гидростатическим давлением столба жидкости, заполняющей измерительную систему. Абсолютное давление определяют по формуле

$$p_a = \rho g H + p_0$$

где ρ — плотность жидкости; g — ускорение свободного падения; H — высота столба жидкости; p_0 — абсолютное давление над ртутью в вакуумном колене.

Погрешности определения плотности ртути и ускорения свободного падения не зависят от конструкции прибора и их уменьшение возможно лишь после проведения фундаментальных исследований по определению этих характеристик. Таким образом, повышение точности ртутных эталонных манометров сводится к повышению точности измерения разности уровней ртути.

Настоящая работа была проведена с целью рассмотрения возможности применения интерференционных методов для измерения столба ртути в эталонных манометрах.

Интерференционные методы измерения можно разделить на две группы в зависимости от угла падения лучей света на поверхности зеркал интерферометра, который может быть близким к нулю или прямым. Применяемый источник света, белого или монохроматического, определяет соответственно метод отсчета разности уровней ртути: фиксацией нулевой разности хода по

ахроматической полосе с отсчитыванием по штриховой мере (в статике) или счетом числа прошедших интерференционных полос при изменении давления.

При падении лучей, близком к горизонтальному, появление интерференционной картины свидетельствует о совпадении поверхности ртути с поверхностью некоторой горизонтальной пластины. Таким образом, процесс измерения включает в себя определение совпадения уровней двух поверхностей ртути с поверхностями двух неподвижных пластин и измерение разности их высот с помощью концевой и штриховой мер длины и микроскопов. Примером может служить схема отсчета в эталонном манометре, описанная в [1].

Высоту ртутного столба в барометре (рис. 1) измеряют устройством с интерферометром белого света. Угол падения лучей на поверхность ртути и боковички, притертые к торцам концевой меры длины, не превышает $3-5^\circ$. Концевая мера может перемещаться в вертикальном направлении. Интерференционная картина наблюдается при совмещении плоскости верхнего боковичка с поверхностью ртути в вакуумном колене U-образной трубы, а также плоскости нижнего боковичка с поверхностью ртути в измерительном колене.

Перемещение концевой меры определяют с помощью микроскопа с окулярным микрометром по закрепленной на ней стеклянной штриховой мере длины.

Высота столба ртути равна сумме длины концевой меры, верхнего боковичка и их перемещения.

Погрешность измерения разности уровней ртути такой схемы отсчета составляет 6 мкм и складывается из следующих составляющих (их верхних границ):

Погрешность длины концевой меры	0,2 мкм
Погрешность длины боковичка	0,2 »

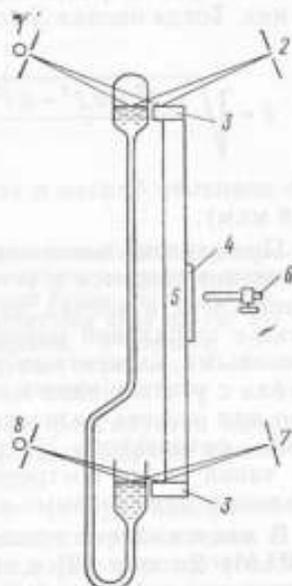


Рис. 1. Устройство для измерения давления с горизонтальным падением лучей: 1, 8 — источники света; 2, 7 — плоскости образования интерференционной картины; 3 — стеклянные боковички; 4 — штриховая мера длины; 5 — концевая мера длины; 6 — микроскоп с окулярным микрометром

Погрешность градуировки стеклянной штриховой меры	0,1 мкм
Погрешность определения цены деления барабана микрометра	0,05 >
Погрешность отсчета по барабану микрометра	2,0 >
Погрешность наклона меры (на 6')	2,0 >
Погрешность наклона стеклянной шкалы (на 6')	0,2 >
Погрешность наведения на поверхность ртути из-за наличия волн от вибрации	10 >

Принимая во внимание, что выше приведены модули соответствующих погрешностей, можно перейти к случайным погрешностям, приняв равномерный закон распределения для каждой из них. Тогда оценка S составит

$$S = \sqrt{\frac{0,2^2 + 0,2^2 + 0,1^2 + 0,05^2 + 2^2 + 2^2 + 0,2^2 + 10^2}{3}} = 5,7 \text{ мкм}$$

что довольно близко к экспериментально полученному значению (5,8 мкм).

При вертикальном падении лучей света на поверхность ртути измерение сводится к установлению нулевой разности хода двух лучей света в плечах интерферометра путем передвижения каретки с штриховой мерой длины и отсчитыванию по этой мере. Основными элементами подобной схемы являются: U -образная трубка с ртутью, один или несколько интерферометров и устройство для отсчета разности уровней, представляющее собой сочетание оптического устройства со штриховой мерой длины. По такой схеме построены эталонные манометры абсолютного давления, применяемые в настоящее время в Японии и Франции.

В национальной исследовательской лаборатории метрологии (NRLM) Японии [2] для проверки высокоточных манометров и барометров в 1963 г. был создан интерференционный первичный эталонный ртутный манометр абсолютного давления [2, 3]. Пределы измерения прибора составляют 0—900 мм рт. ст., U -образная трубка с внутренним диаметром 50 мм выполнена из нержавеющей стали и помещена в водяной термостат, обеспечивающий постоянство температуры во всем его объеме с погрешностью 0,005°С. Средняя квадратическая погрешность измерения абсолютного давления составляет 2,4 мкм рт. ст. (по данным авторов).

Манометр, схема которого приведена на рис. 2, состоит из U -образной трубки, заполненной ртутью, системы задания и

откачки давления, двух интерферометров Майкельсона и штриховой меры длины, установленной на подвижной каретке. Каждое из колен трубки снабжено интерферометром, образованным соответствующей поверхностью ртути и одним из зеркал, расположенных в верхней и нижней частях подвижной каретки. Изменение направления луча в одном из интерферометров с помощью специальной призмы связано с различным направлением изменения высот двух менисков ртути и, соответственно, длин оптических путей лучей в двух интерферометрах. При подаче давления в правое колено U-образной трубки уровень ртути в одном колене опускается, а в другом — поднимается. Таким образом, для уравнивания оптических длин путей необходимо уменьшить длину до зеркала *A* и увеличить ее до зеркала *B*. Равенство длин оптических путей в обоих интерферометрах фиксируется появлением в поле зрения двух интерференционных картин белого света с центральной ахроматической полосой.

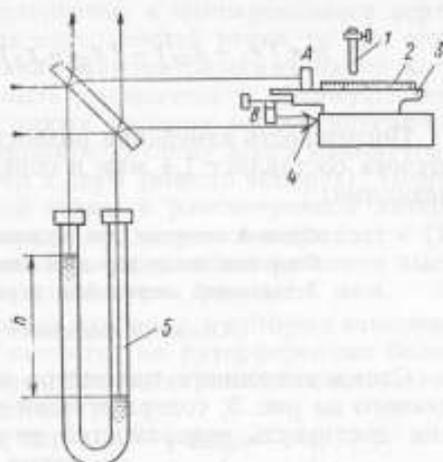


Рис. 2. Схема эталонного манометра для измерения абсолютного давления с двумя интерферометрами белого света: 1 — микроскоп; 2 — штриховая мера длины; 3 — подвижная каретка; 4 — призма; 5 — U-образная трубка с ртутью; *A*, *B* — зеркала интерферометров.

Процесс измерения давления включает четыре измерения: два — при одинаковом давлении в обоих коленах трубки и два — при разности давлений в них. Первые два измерения проводят при разности давлений, равной нулю. Каретку перемещают таким образом, чтобы оптические пути лучей до поверхности ртути и до зеркала *A* были равны, что приводит к появлению интерференционной картины. Затем отсчитывают положение X_0 зеркала *A* по штриховой мере с помощью микроскопа. Установку нулевой разности хода двух лучей во втором интерферометре осуществляют микрометрическим винтом, регулирующим положение X_{02} зеркала *B* без перемещения каретки.

После создания разности давлений в коленах U-образной трубки, в результате чего уровни ртути смещаются относительно друг друга, движением каретки уравнивают длины путей лучей

в первом интерферометре с отсчитыванием положения X_1 по штриховой мере и во втором интерферометре — с отсчитыванием положения X_2 . Тогда высота столба ртути составит

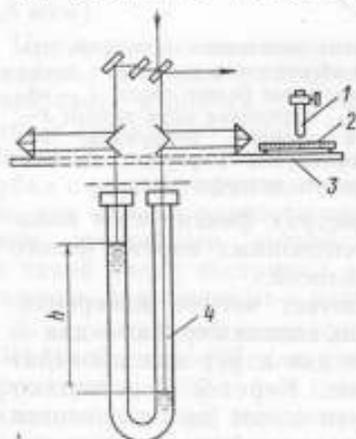
$$h = (X_1 - X_{01}) - (X_{02} - X_2) = X_1 + X_2 - X_{01} - X_{02}$$

Погрешность измерения разности уровней ртути такой схемы отсчета составляет 1,4 мкм и определяется следующими составляющими:

Суммой отсчетов для нулевого уровня	0,8 мкм
Отсчетом после передачи давления	1,0 мкм
Аттестацией штриховой меры	0,6 мкм

Оценка S составляет $S = \sqrt{0,8^2 + 1,0^2 + 0,6^2} = 1,4$ мкм

Схема эталонного манометра абсолютного давления, приведенного на рис. 3, содержит один интерферометр [4, 5]. Прежде чем достигнуть поверхностей ртути, лучи света отклоняются



двумя оптическими триэдрами в противоположные стороны в горизонтальном направлении. Два оптических триэдра, соединенные вместе, и шкала, связанная с микроскопом, являются движущимися частями устройства. При этих условиях равенства оптических путей можно добиться смещением каретки, несущей триэдры. Для определения разности высот достаточно произвести два измерения по формуле

$$h = 4(X_1 - X_2),$$

Рис. 3. Схема эталонного манометра для измерения абсолютного давления с одним интерферометром белого света: 1 — микроскоп; 2 — штриховая мера длины; 3 — подвижная каретка; 4 — U-образная трубка с ртутью.

где x_1 — отсчет положения каретки, соответствующий интерференции полос, когда поверхности ртути в обоих коленях трубки находятся на одном уровне, т. е. при одинаковом давлении; x_2 — отсчет при разности давлений. Компенсирующая пластина, расположенная на пути левого луча, колеблется с небольшой частотой вокруг своего положения равновесия, создавая, таким

образом, модуляцию оптического пути. Интерференционная картина, возникающая при равенстве оптических путей, наблюдается с помощью фотозлектрической системы. Так как подобная схема не обладает чувствительностью к одновременным вертикальным перемещениям обеих поверхностей ртути, то при определенном способе подвешивания манометрических камер колебания мениска ртути могут быть уменьшены. К преимуществам этой схемы следует отнести также наличие одного интерферометра вместо двух, более компактную схему всего манометра и сведение количества измерений к двум (вместо четырех). Точных данных о погрешностях такой схемы в рассмотренной литературе нет, но так как общий принцип измерения совпадает с [2], то можно считать, что погрешность определения разности высот уровней ртути, как и в предыдущей схеме, равна 1,4 мкм.

Существенными недостатками приборов, в которых измерение разности уровней ртути основывается на интерференции белого света, является трудность наведения на ахроматическую полосу из-за нестабильной поверхности ртути и необходимость применения мер длины и подвижной каретки, вносящих дополнительные погрешности. Этих недостатков лишены приборы, в которых для измерения разности уровней ртути применяют интерферометр монохроматического света. К таким приборам можно отнести манометр [6], схема которого приведена на рис. 4. В этом приборе применен лазерный интерферометр с автоматическим счетом полос. Такой способ измерения длины позволяет следить за изменением давления и производить отсчет в любой точке диапазона. Разность высот поверхностей ртути определяется в единицах известной длины волны лазера путем счета числа переходов через ноль синусоидальной составляющей сигнала в процессе изменения давления. Для уменьшения влияния волн, возникающих от вибрации на поверхности ртути, применяется CO_2 -лазер, дающий пучок света длиной волны 10,6 мкм, достаточно большой по сравнению с амплитудой волн, в результате

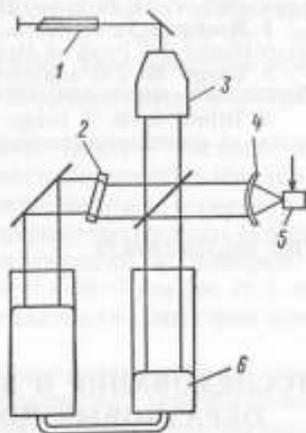


Рис. 4. Схема интерферометра монохроматического света для измерения разности уровней ртути: 1 — газовый лазер; 2 — модулирующая пластина; 3 — расширяющая пластина; 4 — фокусирующая линза; 5 — фотозлектрический преобразователь; 6 — U-образная трубка с ртутью.

чего сигнал может быть получен даже при возмущенной поверхности. Наличие волн на поверхности ртути, амплитуда которых особенно возрастает при перемещении ртути, ограничивает скорость изменения разности высот до 1—0,5 см/мин.

Из рассмотренных выше интерференционных методов измерения разности уровней ртути в эталонных манометрах абсолютного давления последний является наиболее оптимальным, так как он обеспечивает наименьшую погрешность измерения и позволяет полностью автоматизировать процесс измерения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Покровская И. А., Полухин Г. И., Парнищев В. А., Фатеев Н. П. Эталонные барометры гидрометслужбы СССР. — Труды ГГО им Воейкова, вып. 280, 1972, с. 17—20.
2. Kaneda Ryosaku, Sudo Seiji, Nishibata Ken. An Interferometric Primary Standard Barometer. — «Bulletin of the National Research Laboratory of Metrology», 1964, № 9, pp. 24—36.
3. Nishibata Ken, Sudo Seiji, Kaneda Ryosaku. An Interferometric Primary Standard Barometer. — «Report of the National Research Laboratory of Metrology», 1975, v. 24, № 2, pp. 27—48.
4. Bonhoure J., Terrien J. The new Standard Manobarometer of the Bureau International des Poids et Mesures. — «Metrologia», 1968, v. 4, № 2, pp. 15—18.
5. Congé M. Les capteurs dans la metrologie des pressions. — «Mesures-Regulation-Automatisme», 1974, November, pp. 57—60.
6. Tifford C. R. A fringe counting laser interferometer manometer. — «The review of scientific instruments», 1973, February, pp. 180—182.

Поступила в редакцию 12/1-1977 г.

УДК 531.788.7.089.79

С. М. БОРОДИЦКАЯ, А. В. ЕРЮХИН,
В. В. КУЗЬМИН, Е. К. ФРОЛОВ

ВНИИМ

ИССЛЕДОВАНИЯ И ВЫБОР ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РЕЖИМА ОБРАЗЦОВЫХ ИОНИЗАЦИОННЫХ МАНОМЕТРОВ

Согласно общесоюзной поверочной схеме для средств измерений низкого абсолютного давления*, передача размера единицы давления от государственного специального эталона и образцовых средств измерения 1-го разряда рабочим приборам производится с помощью образцовых ионизационных манометров 2-го разряда.

* ГОСТ 8.107-74 «Государственный специальный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений абсолютного давления с пределами от 10^{-3} до 10^2 Па». М., Изд-во стандартов, 1974.

В 1975—1976 гг. во ВНИИМ был аттестован комплект специальных образцовых ионизационных манометров 2-го разряда типов ВЮ-1, ВЮ-2 и ОИМ-8. Это позволило отказаться от применения в качестве образцовых рабочих вакуумметров, градуированных непосредственно по образцовой аппаратуре 1-го разряда**. Каждый из аттестованных манометров состоит из преобразователя, блока питания и измерителя ионного тока преобразователя. Рассмотрим состав, рабочий диапазон и условия применения этих манометров (по результатам аттестации).

Вакуумметр ионизационный образцовый типа ВЮ-1 [1] состоит из манометрического ионизационного преобразователя ПМИ-39-2, блока питания преобразователей БПП-1 и измерителя малых токов ИМТ-1. Вакуумметр предназначен для градуировки и поверки в области давлений 10^{-9} — 10^{-2} Па ($\sim 10^{-11}$ — 10^{-4} мм рт. ст.) по азоту вакуумметров преимущественно с преобразователями открытого типа (фланцевой конструкции).

Вакуумметр ионизационный образцовый типа ВЮ-2 состоит из манометрического ионизационного преобразователя МИ-29 [3], блока питания преобразователей БПП-2 и измерителя малых токов ИМТ-1. Он предназначен для градуировки и поверки в области давлений 10^{-4} — 10^{-1} Па ($\sim 10^{-6}$ — 10^{-3} мм рт. ст.) по азоту, водороду и некоторым инертным газам вакуумметров преимущественно со стеклянными преобразователями закрытого типа.

Образцовый ионизационный манометр ОИМ-8 состоит из образцового ионизационного манометрического преобразователя ПОИМ-11, установки для питания ионизационных манометрических преобразователей УПИМП и электрометрического усилителя У5—7. Он предназначен для градуировки и поверки в области давлений 10^{-9} — 10^{-3} Па ($\sim 10^{-11}$ — 10^{-5} мм рт. ст.) по азоту, водороду и некоторым инертным газам вакуумметров преобразователями закрытого типа.

Назначение и область применения манометров определяют конструкцию соответствующих преобразователей. Преобразователь ПМИ-39-2 имеет четырехэлектродную систему: накаливаемый катод, цилиндрический анод, осевой коллектор, стержневой модулятор. Конструкция траверс анододержателей обеспечивает повышенную жесткость крепления катода, что способствует стабилизации чувствительности преобразователя. Торцы анода закрыты плоскими сетками-экранами, благодаря чему повышена чувствительность преобразователя. Электродная система закрыта съемным экранирующим цилиндром.

** Такая практика была рекомендована [2] временно ввиду отсутствия специальных образцовых ионизационных манометров.

Для электродов преобразователя МИ-29 выбраны материалы, повышающие стабильность метрологических характеристик прибора. Цилиндрический коллектор выполнен из платины, а анодная сетка — из нихрома. Предусмотрены также торцовые экраны.

Преобразователь ПОИМ-11 содержит осевой коллектор, вынесенный за пределы анодного пространства, и торцовые экраны. Внутренняя поверхность стеклянной колбы преобразователя покрыта слоем двуокиси олова.

В процессе аттестации комплекта манометров была выполнена обширная программа исследований их электрического режима, непосредственно влияющего на метрологические характеристики приборов. Целью этих исследований был выбор оптимальных параметров режима, а также уменьшение погрешностей измерений, обусловленных отклонениями действительных значений параметров от номинальных.

Желательно, чтобы вибрационный режим обеспечивал наивысшую чувствительность преобразователя. Однако при сильной зависимости чувствительности от параметров режима даже незначительное отклонение их от номинальных значений может привести к существенному изменению ионного тока и, следовательно, к большой погрешности измерений. Нецелесообразно также достижение высокой чувствительности за счет чрезмерного повышения рабочих напряжений. Таким образом, требования к электрическому режиму образцовых манометров противоречивы, и в процессе исследований необходимо было найти оптимальные параметры режима, удовлетворяющие в определенной степени всем требованиям. Рассмотрим кратко результаты.

Зависимость ионного тока I_n ионизационного манометра от электронного I_e является важнейшей характеристикой, определяющей его пригодность для выполнения функций образцового средства измерений. Действительно, электронный ток каждого манометра изменяют в зависимости от диапазона давлений: 2—5 мА при самых низких (10^{-6} — 10^{-3} Па) и 0,05—0,1 мА при относительно высоких давлениях (10^{-1} — 10^{-3} Па). Таким образом, необходимо, чтобы чувствительность преобразователя $K = \frac{I_n}{I_{eP}}$ (P — давление газа) была величиной постоянной, независимой от значений I_e .

Для каждого манометра были исследованы функции $I_n = f(I_e)$ при постоянном давлении азота (в области 10^{-3} — 10^{-4} Па) и при тщательном контроле номинальных значений других параметров режима. Исследования проводились в диапазоне 0,02—5,0 мА — для преобразователя ПМИ-39-2; 0,08—5,0 мА — для преобразователя МИ-29 и 0,20—5,0 мА — для преобразователя

ПОИМ-11. Полученные характеристики (рис. 1) оказались весьма близкими к линейной зависимости, а отклонения отношений $\frac{I_n}{I_3}$ от средних значений находились в пределах погрешностей измерений. Другие зависимости были определены по аналогичной методике, т. е. при постоянном давлении азота (в области 10^{-2} — 10^{-4} Па) и постоянстве всех параметров режима, кроме исследуемого. Зависимость ионного тока I_n от напряжения между анодом и катодом $U_{ан}$ исследовалась в интервале напряжений от 90 до 300 В, причем для преобразователя ПМИ-39-2 были получены три кривые при напряжениях на модуляторе относительно катода $U_{мк}$: 180 В, -100 В и $U_{мк} = U_{ан}$. Вид графиков (рис. 2—4) определяется функциями относительной ионизации и распределением потенциалов в межэлектродном пространстве.

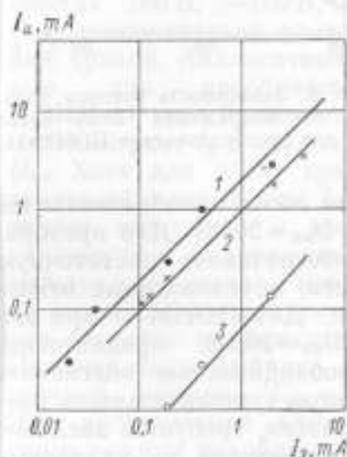


Рис. 1. Зависимость полного тока I_n от электронного тока для образцовых вакуумметров типа: 1—ВЮ-1, 2—ВЮ-2 и 3—ОИМ-8.

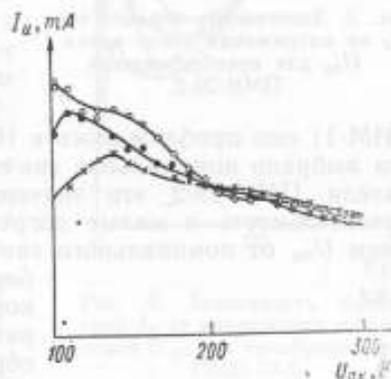


Рис. 2. Зависимость ионного тока I_n от напряжения анод — катод U для преобразователя МИ-29

Для преобразователя МИ-29 зависимость $I_n = f(U_{ан})$ (см. рис. 2) представляет собой монотонно возрастающую кривую (аналогичную кривым для преобразователей с цилиндрическим коллектором — ПМИ-2 и ЛМ-3-2). При увеличении напряжения $U_{ан}$ от 100 до 300 В ионный ток возрастает в два раза. С учетом указанных выше требований было выбрано значение номинального напряжения $U_{ан} = 150$ В.

Кривые $I_n = f(U_{ан})$ для преобразователей ПМИ-39-2 и ПОИМ-11 с осевым коллектором (рис. 3, 4) существенно отли-

чаются от кривой на рис. 2. Для преобразователя ПОИМ-11 (рис. 4) наблюдается более резкий максимум вблизи значения $U_{ан} = 200$ В. Если для преобразователя ПМИ-39-2 отношение максимального ионного тока к минимальному (в исследованном интервале значений $U_{ан}$) составляло 2, то для преобразователя

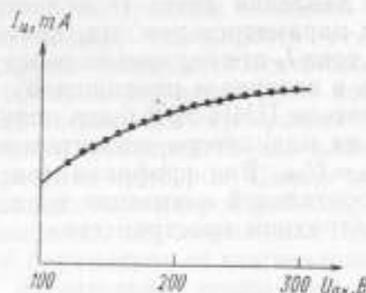


Рис. 3. Зависимость ионного тока $I_{и}$ от напряжения анод—катод $U_{ак}$ для преобразователя ПМИ-39-2.

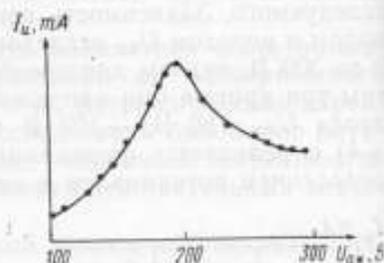


Рис. 4. Зависимость ионного тока $I_{и}$ от напряжения анод—катод $U_{ак}$ для преобразователя ПОИМ-11.

ПОИМ-11 оно приближалось к 10. Для обоих преобразователей было выбрано номинальное значение $U_{ан} = 200$ В. Для преобразователя ПМИ-39-2 это значение обеспечивает достаточную чувствительность и малые погрешности, обусловленные отклонением $U_{ан}$ от номинального значения. Для ПОИМ-11 при выборе $U_{ак} = 200$ В, продиктованном необходимостью обеспечить наивысшую чувствительность преобразователя, требуется введение жестких допусков на указанные отклонения.

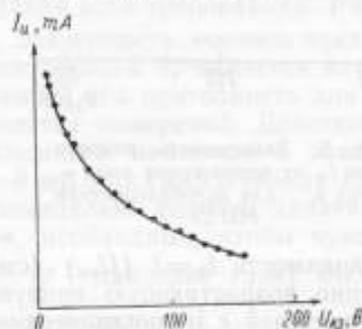


Рис. 5. Зависимость ионного тока $I_{и}$ от напряжения катод—земля $U_{кз}$ для преобразователя МИ-29.

Зависимость ионного тока $I_{и}$ от напряжения катод—земля $U_{кз}$ исследовалась в интервале значений $U_{кз}$, равном 0—150 В, но в ряде опытов с преобразователем ПОИМ-11 напряжение $U_{кз}$ довели до 350 В.

Кривая $I_{и} = f(U_{кз})$ для преобразователя с цилиндрическим коллектором МИ-29 (рис. 5) существенно отличается от соответствующих кривых для преобразователей с осевым коллектором. Монотонное уменьшение ионного

тока преобразователя МИ-29 при увеличении напряжения $U_{кз}$ связано с ограничением области ионизации внутри коллектора и резким спадом $I_{и}$ при изменении $U_{кз}$ от 10 до 150 В. Вблизи выбранного номинального значения $U_{кз}=50$ В функция $I_{и}=f(U_{кз})$ почти линейна.

Кривые $I_{и}=f(U_{кз})$ для преобразователя ПМИ-39-2 (рис. 6) обнаруживают четкий максимум при $U_{кз}=10-20$ В, после чего наблюдается их спад до минимума, а затем рост $I_{и}$. Напряжение на модуляторе $U_{мд}$, составлявшее в опытах 180 В, -100 В, $-U_{кз}$, $U_{мд}$ несущественно влияло на вид кривой. Аналогичные кривые для преобразователя ПОИМ-11 (рис. 7) показывают плавный рост $I_{и}$ с увеличением $U_{кз}$. Хотя для обоих преобразователей ионный ток $I_{и}$ проявляет тенденцию к росту с увеличением напряжения $U_{кз}$, междуэлектродная изоляция не позволяет применять слишком большое напряжение $U_{кз}$. Поэтому было выбрано номинальное значение $U_{кз}=100$ В. При исследовании электрического режима преобразователя

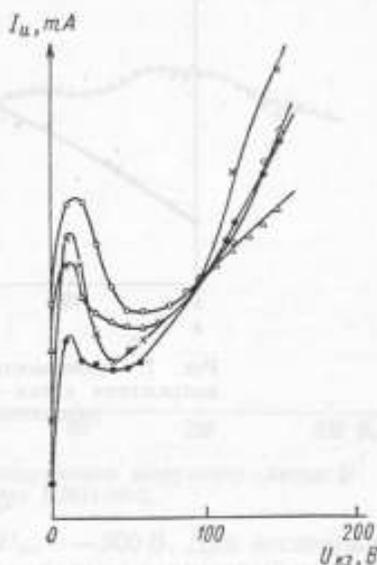


Рис. 6. Зависимость ионного тока $I_{и}$ от напряжения катод-земля $U_{кз}$ для преобразователя ПМИ-39-2.

ПОИМ-11 изучалась зависимость ионного тока $I_{и}$ от напряжения на торцевом экране $U_{эк}$ (относительно катода) $I_{и}=f(U_{эк})$ (рис. 8). Напряжение $U_{эк}$ регулировалось в широком интервале: от -300 до $+300$ В. При этом в интервале от -300 до $+100$ В наблюдается постепенное возрастание тока $I_{и}$, а при 160 В достигается его максимум. При дальнейшем увеличении напряжения $U_{эк}$ наблюдается резкий спад тока $I_{и}$. Так, при $U_{эк}=200$ В ток $I_{и}$ в четыре-пять, а при $U_{эк}=300$ В в 10 раз меньше максимального. Наибольшая чувствительность достигается при напряжении $U_{эк}=160$ В, при условии строгой стабилизации этого параметра.

Основной целью исследования электрического режима преобразователя ПМИ-39-2 было изучение его модуляционной характеристики, т. е. зависимости $I_{и}=f(U_{мд})$. Измерения давления

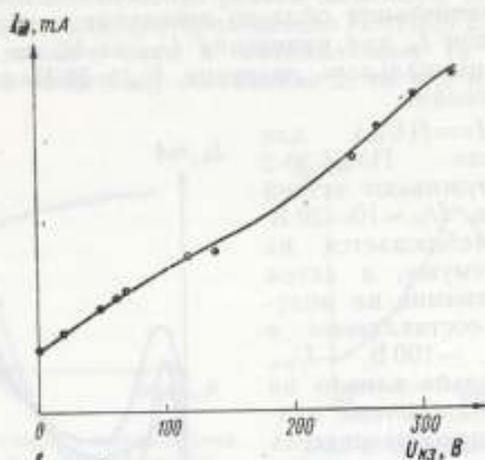


Рис. 7. Зависимость ионного тока $I_{и}$ от напряжения катод—земля $U_{кз}$ для преобразователя ПОИМ-11.

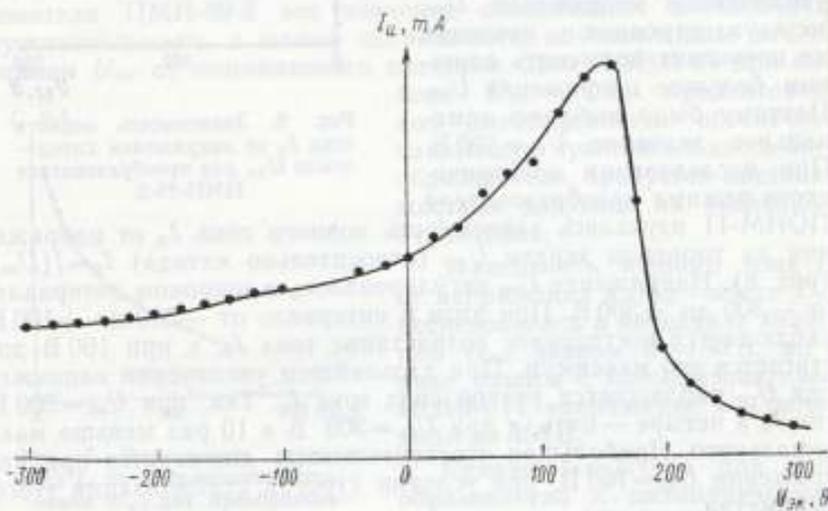


Рис. 8. Зависимость ионного тока от напряжения экран—катод $U_{эк}$ для преобразователя ПОИМ-11.

с помощью модуляции, как известно, включают два отсчета ионного тока при различных потенциалах модулятора. Для выбора оптимального режима модуляции зависимость $I_n = f(U_{мк})$ была снята в диапазоне напряжений $U_{мк}$ от -300 до $+300$ В. Кривая $I_n = f(U_{мк})$ (рис. 9) имеет максимум при $U_{мк} = 100-180$ В, мини-

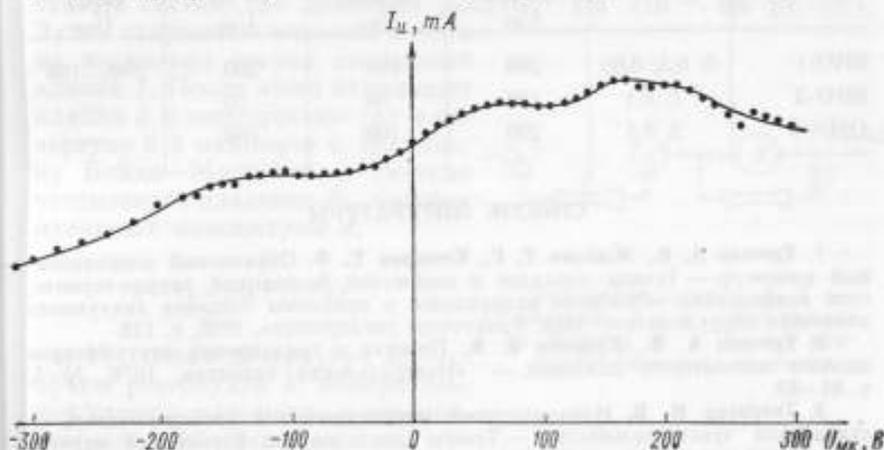


Рис. 9. Зависимость ионного тока от напряжения модулятор—катод U для преобразователя ПМИ-39-2.

мальное значение тока I_n — при $U_{мк} = -300$ В. Для исследованной области напряжений $U_{мк}$ максимально возможный коэффициент модуляции равен

$$m = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max}} = 0,52$$

Обычно при положительной модуляции отсчеты ионного тока производят при поочередной подаче на модулятор напряжений $U'_{мк} = U_{мк}$ и $U''_{мк} = -U_{кз}$. В данном случае для преобразователя ПМИ-39-2 наиболее эффективен режим: $U'_{мк} = 180$ В и $U''_{мк} = -100$ В, при этом $m = 0,26$.

При отрицательной модуляции $U'_{мк} = -U_{кз}$ и $U''_{мк} = -(U_{кз} + 150)$ В. Наибольший коэффициент модуляции $m = 0,35$ получен при $U'_{мк} = -100$ В и $U''_{мк} = -300$ В.

Ввиду того, что для вакуумметра ВЮ-1 был принят режим положительной модуляции, окончательно выбрано $U'_{мк} = 180$ В и $U''_{мк} = -100$ В.

Проведенные исследования позволили выбрать оптимальный электрический режим работы указанных образцовых ионизаци-

онных манометров. Номинальные значения параметров приведены в таблице.

Тип манометра	Электронный ток, мА	Напряжение, В			
		Анод-катод $U_{ак}$	Катод-земля $U_{кз}$	Экран-катод $U_{эк}$	Модулятор-катод $U_{мк}$
ВИО-1	5; 0,5; 0,05	200	100	200	180,—100
ВИО-2	1; 0,1	150	50	— 50	—
ОИМ-8	2; 0,5	200	100	160	—

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ерюхин А. В., Жмакин Г. Г., Комаров Е. Ф. Образцовый ионизационный манометр. — Тезисы докладов и сообщений Всесоюзной научно-технической конференции «Основные направления и проблемы создания вакуумного откачного оборудования». Изд. Казанского университета, 1976, с. 116.
2. Ерюхин А. В., Кузьмин В. В. Проверка и градуировка вакуумметров низкого абсолютного давления. — «Измерительная техника», 1976, № 5, с. 81—83.
3. Творогов И. В. Ионизационный манометрический преобразователь со стабильной чувствительностью. — Тезисы докладов 4-й Всесоюзной научно-технической конференции «Физика и техника высокого вакуума». НТО приборпром, Ленинград, 1974, с. 126—127.

Поступила в редакцию 12/1-1977 г.

УДК 531.788.12

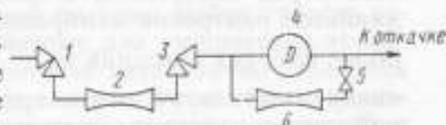
В. А. КУКУШКИН
СКБ АП АН СССР
В. А. РЫЖОВ

ВНИИМ

ПОВЫШЕНИЕ ВЕРХНЕГО ПРЕДЕЛА ИЗМЕРЕНИЯ МЕМБРАННО-ЕМКОСТНОГО МАНОМЕТРА

Мембранно-емкостные манометры с электростатической компенсацией находят все более широкое применение благодаря высокой точности измерения и независимости показаний от состава газа. Верхний предел измерения их определяется величиной пробивного напряжения газового промежутка между упругим элементом — мембраной и компенсационным электродом и обычно не превышает 66 Па (0,5 мм рт. ст.). Мембранно-емкостные манометры могли бы с успехом заменить компрессионные, если бы их диапазон измерений удалось расширить в сторону более высоких давлений. Для этой цели авторами был применен «вакуум-

ный» шунт по аналогии с электрическим, позволяющим значительно расширить диапазон измерения прибора. Принцип действия «вакуумного» шунта поясняет рисунок. Перед измерением давления закрывают клапан 1, открывают клапаны 3 и 5 и откачивают систему до давления $p_0 \leq 10^{-5}$ Па (10^{-7} мм рт. ст.). Затем закрывают клапаны 3 и 5 и на несколько секунд открывают клапан 1. После этого открывают клапан 3 и перепускают газ в резервуар 6 и манометр 4. По закону Бойля—Мариотта в системе установится давление P_M , которое измеряют манометром 4.



$$p = V_1 = p_M (V_1 + V_2).$$

Вакуумный шунт: 1, 3, 5 — клапаны; 2 и 6 — резервуары с объемом V_1 и V_2 ; 4 — мембранно-емкостной манометр.

где V_1 — объем резервуара 2; V_2 — объем резервуара 6, измерительной камеры манометра и соединительных трубопроводов.

Соотношение объемов V_1 и V_2 выбирают в зависимости от заданного верхнего предела измеряемого давления и рассчитывают каждый из них с погрешностью, не превышающей 0,1%.

Относительная дисперсия значения p может быть оценена как

$$\frac{D(p)}{p^2} = \frac{D(V_1)}{V_1^2} + \frac{D(V_2)}{V_2^2} + \frac{D(p_M)}{p_M^2}$$

Средние квадратические погрешности определения объемов V_1 и V_2 составляют 0,1%, а дисперсии $D(V_1)/V_1^2$ и $D(V_2)/V_2^2$ равны $0,01 \cdot 10^{-4}$.

Дисперсия измерений p_M манометра состоит из двух составляющих*

$$\frac{D(p_M)}{p_M^2} = \frac{D(K)}{K^2} + \frac{D(\Delta V)}{V^2}.$$

где $D(K)$ — дисперсия определения постоянной манометра; $D(\Delta V)$ — дисперсия, обусловленная случайными погрешностями измерения напряжения компенсации.

* Рыжов В. А. О верхнем пределе мембранно-емкостного манометра. — «Измерительная техника», 1963, № 11, с. 23—25.

Для мембранно-емкостного манометра при условии измерения напряжения компенсации цифровым вольтметром типа Ш1513 обе составляющие дисперсии $D(p_m)/p_m^2$ оцениваются как $D[K]K^2=0,25 \cdot 10^{-4}$ и $D(\Delta V)/V^2=0,01 \cdot 10^{-4}$. Следовательно, $D(p/p^2) = 0,28 \cdot 10^{-4}$, а относительная средняя квадратическая погрешность измерения давления равна $\sigma_{\text{ср}}=0,5-0,6\%$.

Таким образом, «вакуумный» шунт, увеличивающий объем газа перед измерением в несколько раз, позволяет расширить диапазон измерения мембранно-емкостного манометра в сторону более высоких давлений в $\frac{V_1+V_2}{V_1}$ раз. Следует заметить, что «вакуумный» шунт можно применять во всех манометрах, верхний предел измерения которых превышает 10^{-1} Па (10^{-3} мм рт. ст.), поскольку при меньших давлениях начинают сказываться явления сорбции и десорбции.

Поступила в редакцию 12/1-1977 г.

УДК 531.788.089.62

В. А. КУКУШКИН
СКБ АП АН СССР
В. А. РЫЖОВ

ВНИИМ

ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ УСТАНОВКИ ДЛЯ ГРАДУИРОВКИ МАНОМЕТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В ДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

Для градуировки вакуумметров и манометрических преобразователей в режиме высокого и сверхвысокого вакуума наибольшее распространение получил метод редукции давления [1], основанный на предположении о стационарном течении газа в вакуумной системе.

Анализ динамического метода воспроизведения единицы давления, проведенный в работе [1], показывает, что установившееся течение газа в камере наступает через промежуток времени, равный

$$\Delta t = \frac{V}{S} \ln \frac{\left(\frac{p_0}{p_1} - 1\right)}{[\delta_t]} \quad (1)$$

где V — объем камеры; S — скорость откачки газа из камеры; p_0 — начальное давление в камере $p_1 = \frac{Q}{S}$ — установившееся

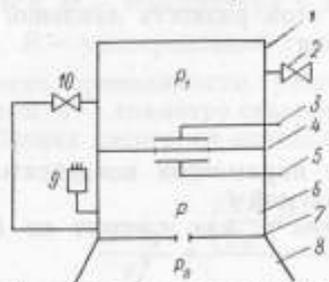
давление в камере; Q — поток газа, поступающий в камеру; δ_1 — поправка на неустановившийся режим течения газа, причем

$$\delta_1 = e^{-\frac{\lambda}{V} \Delta t} \left(\frac{p_0}{P_1} - 1 \right) \quad (2)$$

Из (1) следует, что давление в камере достигает равновесного значения тем быстрее, чем меньше объем камеры V и чем больше скорость откачки газа S .

При конструировании вакуумной системы выбор средств откачки, как правило, ограничен, поэтому для уменьшения времени установления стационарного течения газа обычно стремятся в первую очередь уменьшить объем камеры. В установке, описанной в работе [1], этому в значительной степени препятствует компрессионный манометр, с помощью которого осуществляют контроль исходного давления. Применение компрессионного манометра в установках, основанных на методе редукции давления, нежелательно не только потому, что он не позволяет уменьшить объем камеры исходного давления, но и по другим причинам. Во-первых, компрессионный манометр является прибором с дискретным отсчетом измеряемой величины, во-вторых, он не позволяет автоматизировать процесс градуировки манометрических преобразователей.

На рисунке приведена принципиальная схема динамической градуировочной установки, основанной на методе редукции давления и лишенной перечисленных недостатков.



Принципиальная схема устройства

$$\frac{p_1}{P} = \frac{U + U_1}{U_1} \quad (3)$$

В камере 1 поддерживают постоянное давление при помощи крана-накателя 2 и высоковакуумного насоса 8, откачивающего газ из камеры 1 через диафрагму 7, камеру 6 и диафрагму 4. Градулируемые манометрические преобразователи 9 вакуумно плотно присоединяют к градуировочной камере 5.

Как известно, давления P в камере 6 и P_1 в камере 1 связаны зависимостью при условии, что $U \ll S_0$ и $q \ll Q$, где U_1 и U — проводимости диафрагм 4 и 7 соответственно; S_0 — быстрота откачки насоса 8; q —

газоотделение в камере 6 со стенок; Q — поток газа через кран-напекатель 2.

Выражение (3) можно представить в виде

$$\frac{p_1 - p}{p} = \frac{U}{U_1} \quad (4)$$

Отличительная особенность этой установки состоит в том, что диафрагма 4 представляет собой тонкую мембрану с отверстием в центре. По обе стороны от диафрагмы 4 расположены два изолированных электрода 3 и 5, которые образуют с ней конденсаторы с емкостями C_1 и C_2 соответственно. Конденсатор с емкостью C_2 включают в одно из плеч емкостного моста (на рисунке не показан), балансировку которого производят перед измерениями при равенстве давлений в камерах 1 и 6 при открытом клапане 10. Конденсатор с емкостью C_1 соединяют с регулируемым источником электрического напряжения. При градуировке манометрических преобразователей 9 закрывают клапан 10 и с помощью крана-напекателя 2 устанавливают такое течение газа, при котором достигается необходимая разность давлений $\Delta p = p_1 - p$. Под действием разности давлений $\Delta p = p_1 - p$ диафрагма 4 прогнется и нарушит равновесие емкостного моста.

Диафрагму 4 возвращают в исходное положение с помощью сил электростатического взаимодействия, обусловленных разностью потенциалов V между электродом 3 и диафрагмой 4. Возвращение диафрагмы 4 в исходное положение контролируют по балансу емкостного моста. При этом разность давлений Δp можно рассчитывать [1] из выражения

$$\Delta p = \kappa V^2 \quad (5)$$

где κ — постоянная, зависящая от параметров конденсатора, образованного электродом 3 и диафрагмой 4.

Соответственно, искомое давление p , как следует из (4), составит

$$p = \frac{U_1}{U} \kappa V^2 \quad (6)$$

Относительная дисперсия значения P может быть оценена как

$$\frac{D(P)}{P^2} = \frac{D(\kappa)}{\kappa^2} + \frac{D(\Delta U)}{U^2} + \frac{D(V_1)}{V_1^2} + \frac{D(V_2)}{V_2^2}$$

где $D(K)$ — дисперсия определения постоянной конденсатора, образованного электродом 3 и мембраной 4; $D(\Delta U)$ — дисперсия, обусловленная случайными погрешностями измерения напряжения компенсации.

Для конденсатора с диаметром электрода 4 см и диаметром мембраны 4,5 см при расстоянии между ними 0,01 см величина $\frac{D(K)}{K^2}$ не превышала $0,25 \cdot 10^{-4}$. Для измерения напряжения компенсации может быть применен цифровой вольтметр типа Ш1513, для которого значение $\frac{D(\Delta V)}{V^2}$ не превышает $0,01 \cdot 10^{-4}$. Теоретически рассчитать проводимость V_1 отверстия очень трудно, так как оно обычно имеет очень малые размеры, поэтому величину V_1 определяют экспериментально по экспоненциальному закону временной зависимости давления в известном объеме.

Для проводимости отверстий порядка 10^{-7} м³/с, как указано в работе [2], дисперсия $\frac{D(V_1)}{V_1^2}$ не превышает $2,5 \cdot 10^{-4}$.

Проводимость круглого отверстия V_2 высчитывают по формуле

$$V_2 = \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{RT}{2\pi M}} h d^2$$

где T и M — температура и молекулярная масса протекающего газа; R — универсальная газовая постоянная; $h = \bar{f} \frac{l}{d}$ — коэффициент проводимости, рассчитываемый по измеренным параметрам: d — диаметру отверстия и l — глубине отверстия.

Оценка дисперсии определения V_2 равна

$$\frac{D(V_2)}{V_2^2} = \frac{\left(\frac{\partial h}{\partial d} d^2 + 2dh\right)^2 \sigma d^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial l} d^2\right)^2 \sigma l^2}{(h d^2)^2}$$

где σd и σl — средние квадратические погрешности измерения диаметра и глубины отверстия соответственно.

Для отверстия диаметром $d = 10$ мм и глубиной $l = 0,1$ мм дисперсия $\frac{D(V_2)}{V_2^2} = 2,5 \cdot 10^{-5}$.

Таким образом, $D(p)/p^2 \approx 3 \cdot 10^{-4}$ и относительная средняя квадратическая погрешность воспроизведения единицы давления методом редукции на установке не превышает $\sigma_{op} \approx (1,7-2) \%$.

Конструкция установки позволяет уменьшить объем камеры I до нескольких кубических сантиметров и тем самым свести до минимума время установления стационарного течения газа.

Процесс градуировки преобразователя давления на этой установке может быть автоматизирован.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ерюхин А. В., Кузьмин В. В. Образцовая установка для воспроизведения единицы давления в диапазоне 10^{-3} — 10^{-6} Н/м². — «Измерительная техника», 1969, № 4, с. 22—26.

2. Ерюхин А. В., Кузьмин В. В. Об установлении стационарного режима в динамических вакуумных системах — «Измерительная техника», 1970, № 8, с. 53—54.

3. Рыжов В. А. Образцовый мембранно-емкостный манометр. — «Приборы и техника эксперимента», 1963, № 5.

Поступила в редакцию 12/1-1977 г.

УДК 531.73

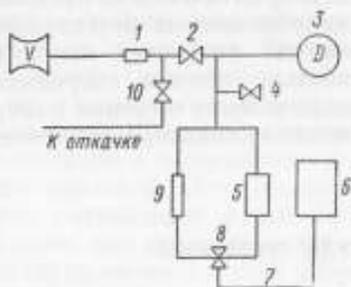
В. А. КУКУШКИН
СКБ АП АН СССР

В. А. РЫЖОВ
ВНИИМ

ИЗМЕРЕНИЕ ОБЪЕМОВ РЕЗЕРВУАРОВ СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

В вакуумной технике от точности определения объемов в значительной мере зависят точность измерения низких абсолютных давлений. Так, например, точность показаний компрессионных манометров или установок с калиброванными объемами находится в прямой зависимости от точности определения объемов измерительных резервуаров. Обычно объем измерительного резервуара компрессионного манометра определяют весовым методом как наиболее точным. Однако, в тех случаях, когда резервуар не может быть заполнен жидкостью, применяют метод основанный на принципе напуска газа. Объем резервуаров определяется или по изменению давления газа при его расширении из известного объема, или по количеству газа, введенного в исследуемый резервуар при постоянном давлении. В первом случае необходимо точно измерять давление, что само по себе представляет определенную трудность. К тому же при понижении давления в несколько раз, во столько же раз возрастает погрешность измерения и, следовательно, определить объем с погрешностью менее 0,5% практически невозможно. Во втором случае

(см. рисунок) определение объемов резервуаров производится методом вытеснения известного количества газа в исследуемый резервуар. Резервуар, объем которого необходимо определить, вакуумно-плотно присоединяют к патрубку 1, соединенному с измерительным устройством через клапан 2 и с откачной системой через клапан 10. Измерительное устройство состоит из индикатора давления 3, атмосферного клапана 4, калиброванных резервуаров 5 и сосуда 6, заполненного жидкостью с низкой упругостью паров. Сосуд 6 посредством гибкого шланга 7 и клапана 8 подсоединен к измерительным резервуарам 5 и капилляру 9.



Принципиальная схема устройства

Перед измерением исследуемый резервуар откачивают до нескольких сотых долей миллиметра ртутного столба. При этом клапаны 2 и 10 закрыты, а клапан 4 открывают на атмосферу. Давление в обеих камерах индикатора давления 3 равно атмосферному. Затем закрывают клапан 4, а клапан 2 открывают. Давление в системе изменится, на что укажет индикатор давления.

Индикатор давления состоит из двух камер, разделенных упругой мембраной, параллельно которой расположен изолированный от корпуса электрод, образующий с мембраной конденсатор. Конденсатор включен в чувствительную мостовую схему, которую балансируют при равенстве давлений в камерах. Можно применять также манометр, регистрирующий изменение атмосферного давления с погрешностью не более 0,01%.

Открывая клапан 8, измерительные резервуары 5 заполняют жидкостью, при этом из них вытесняется газ и давление в системе начинает повышаться. Следя за показанием индикатора, давление плавно доводят до исходного путем заполнения жидкостью калиброванного капилляра.

Искомый объем определяют по сумме объемов газа, вытесненного из калиброванных резервуаров и капилляра. Для измерения резервуара емкостью 125 см³, объем которого был определен ранее весовым методом, авторами применялся шлифованный капилляр диаметром 1 мм. Таким же капилляром соединялись между собой четыре шарообразных резервуара, объемы которых были определены также весовым методом с погрешностью, не превышающей 0,1%. Чувствительность индикатора давления

составила 10^5 дел/мм рт. ст. благодаря применению дифференциального мембранно-емкостного манометра. Десятикратное измерение объема показало, что погрешность измерения этим методом практически не превышает погрешности определения объема калиброванных резервуаров. Таким образом, применение этого метода позволяет измерить объем резервуара с высокой точностью, причем погрешность измерения зависит от точности определения объемов измерительных резервуаров и чувствительности индикатора давления.

Поступила в редакцию 12/1-1977 г.

УДК 531.788.089.6

В. В. КУЗЬМИН
ВНИИМ

РЕДУКЦИОННО-ХРОНОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ГРАДУИРОВКИ ВАКУУММЕТРОВ

Градуировку вакуумметров при давлениях ниже 10^{-2} — 10^{-3} Па ($\sim 10^{-4}$ — 10^{-5} мм рт. ст.) производят на образцовых редуционных установках, осуществляя рассчитанное понижение исходных достаточно высоких давлений до высокого и сверхвысокого вакуума [1—3]. Нижний предел рабочей области этих установок ограничен в основном точностью измерения исходного давления образцовыми манометрами.

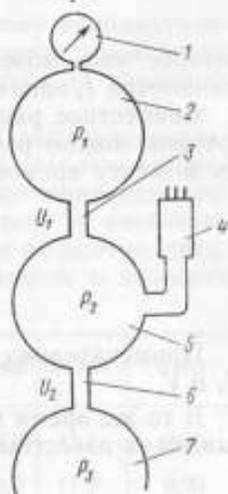
Однако компрессионные манометры, применяемые обычно в качестве образцовых средств, обеспечивают надежные измерения с высокой точностью только при давлениях выше 1 Па [4]. Это затрудняет расширение области градуировки в сторону сверхвысокого вакуума. Другим недостатком метода редукиции давления является трудоемкость процесса градуировки, связанная с необходимостью ручного регулирования поступающего в установку потока газа и непосредственного отсчета по образцовому манометру в каждой градуировочной точке.

Значительно проще известный хронометрический метод градуировки вакуумметров, основанный на зависимости давления в камере известного объема от времени при подаче в нее газа через элемент рассчитанной (или измеренной) проводимости [5, 6]. Однако применение этого метода в области высокого и сверхвысокого вакуума наталкивается на серьезные трудности, и прежде всего на трудноучитываемые эффекты сорбции и десорбции газа на стенках камеры и в объеме манометрических преобразователей градулируемых вакуумметров. В то же время

использование этого метода при низком и среднем вакууме, т. е. при давлениях выше $10^{-2} - 10^{-3}$ Па не вызывает затруднений.

Предложенные ранее способы градуировки [7, 8], представляющие комбинации обоих упомянутых методов, внесли существенные усовершенствования в методику градуировки вакуумметров как в отношении точности, так и ее упрощения. Однако при этом некоторые недостатки и погрешности градуировки остались неустранимыми. Еще в работе [9] указывалось, что натекаТЕЛЬ — непременный элемент системы динамической градуировки вакуумметров — становится препятствием в повышении стабильности и точности воспроизведения давлений. Это объясняется тем, что вакуумную проводимость натекателей в действительности нельзя считать неизменной даже при отсутствии регулирования. Кроме того, резервуар с градуировочным газом (или атмосфера), который присоединяется к натекателю, практически не обеспечивает постоянство давлений газа в процессе градуировки. Систематические или случайные отклонения этих давлений приводят к погрешностям в определении давления в градуировочной камере и, следовательно, в оценке метрологических характеристик вакуумметров. Таким образом, встала задача исключить натекаТЕЛЬ из редукционной системы градуировки или, по крайней мере, изолировать его от нее во время градуировки. Эта задача решена описанным ниже редукционно-хронометрическим методом градуировки.

Вакуумная система (см. рисунок), необходимая для осуществления данного метода, сходна с обычной редукционной системой. Образцовый манометр 1 и градуируемый вакуумметр (или манометрический преобразователь) 4 присоединены к камере исходного давления 2 и градуировочной камере 5 соответственно. Обе камеры отделены друг от друга диафрагмой 3 проводимости U_1 (в молекулярном режиме течения). Необходимый перепад между давлениями p_1 в камере 2 и p_2 — в камере 5 обеспечивается непрерывным течением газа из камеры 2 в камеру 5 и далее через диафрагму 6 проводимости U_2 (в молекулярном режиме течения) в камеру низкого давления 7. Камера 7 примыкает непосредственно к высоковакуумному (сверхвысоковакуумному)



Вакуумная система для редукционно-хронометрической градуировки вакуумметров

насосу (агрегату). Давления в камерах 2, 5 и 7 соответственно связаны соотношением $p_1 \gg p_2 \gg p_3$.

После предварительной откачки системы в камере исходного давления 2 устанавливают сравнительно высокое давление $p_{1,0}$ градуировочного газа и в момент времени t_0 измеряют его образцовым манометром 1. При непрерывной откачке системы в момент времени t_1 вновь измеряют давление $p_{1,1}$, причем $p_{1,1} < p_{1,0}$, по уравнению:

$$p_{1,1} = p_{1,0} e^{-\frac{U_1}{V}(t_1 - t_0)} \quad (1)$$

Продолжая непрерывно откачивать систему, отсчитывают сигналы градуируемого вакуумметра 4 во времени. При этом давление p_1 в камере 2 понижается и в произвольный момент времени t достигает значения

$$p_1 = p_{1,0} e^{-\frac{U_1}{V}(t - t_0)} \quad (2)$$

которое уже может быть ниже рабочей области образцового манометра 1, например, ниже 1 Па.

Совместное решение уравнения (1) и (2) дает формулу, по которой можно рассчитать давление p_2 , соответствующее любому моменту времени t , исходя из известных значений $p_{1,0}$ и $p_{1,1}$:

$$p_2 = \frac{p_{1,1} \frac{t - t_0}{t_1 - t_0}}{p_{1,0} \frac{t - t_1}{t_1 - t_0}} \quad (3)$$

Примечательно, что в это уравнение не входят величины U_1 и V .

В то же время между давлениями p_1 и p_2 имеется связь, описываемая известным уравнением редукции давления [10]:

$$p_2 = \frac{U_1}{U_2} p_1 (1 + \delta), \quad (4)$$

где δ — суммарная поправка, учитывающая ряд побочных процессов.

Подставляя выражение (3) в уравнение (4), получим зависимость давления p_2 в градуировочной камере 5 от времени t :

$$p_2 = \frac{U_1}{U_2} \frac{p_{1,1} \frac{t-t_0}{t_1-t_0}}{p_{1,0} \frac{t-t_0}{t_1-t_0}} (1+\delta) \quad (5)$$

Градуировка вакуумметров сводится, таким образом, к сопоставлению рассчитанных по формуле (5) значений давления p_2 с соответствующими зафиксированным моментам времени t сигналами этих вакуумметров.

Измерив в начале градуировки два сравнительно высоких значения давления $p_{1,0}$ и $p_{1,1}$, можно по формуле (5) рассчитать воспроизведенные после этого весьма низкие давления p_2 . Например, при типичных для редуцированных установок значениях $U_1 \approx 10^{-3}$ л/с и $V \approx 1$ л для измерения давлений $p_{1,0}$ и $p_{1,1} \approx 0,5$ $p_{1,0}$ требуется интервал времени $t_1-t_0 \approx 10$ мин. Затем в течение промежутка времени $t-t_1 \approx 1,5-2$ ч давления в камерах понижаются согласно уравнениям (3) и (5) на 2-3 порядка величины. Единственным условием правильности расчетов является постоянство температуры газа в пределах вакуумной системы в процессе измерений.

Градуировку вакуумметра 4 по определенному индивидуальному газу можно обеспечить промывкой системы этим газом перед откачкой, т. е. наполнением системы газом до давлений, намного превышающих давления p_1 .

На установке ОРУ-3 [11] была выполнена экспериментальная проверка описанного метода градуировки, заключающаяся в сопоставлении значений давлений p_1 , одновременно измерявшихся образцовым компрессионным манометром и рассчитывавшихся по уравнению (3). Результаты одного из опытов, представленные в таблице, показывают эффективность и точность метода.

Время t , с	0	2560	3750	5480	8120	9780
Давление p_1 , рассчитанное по уравнению (3), Па	-	-	16,4	14,0	11,1	9,85
Давление, измеренное компрессионным манометром, Па	22,9	18,4	16,4	14,2	11,3	9,90

Устранение необходимости регулировать и измерять давление в каждой градуировочной точке значительно упрощает процесс градуировки и сводит его к наблюдению временной зависимости сигналов градуируемого вакуумметра и лишь двукратному измерению непрерывно понижающегося давления образцовым

манометром. Более того, отпадает необходимость в образцовом абсолютном манометре для большей части рабочего диапазона исходных давлений, например, от 10^{-3} до 1 Па. При таких давлениях эффекты сорбции и десорбции газа на стенках камеры еще не искажают результаты измерений.

Изложенный метод максимально упрощает также и конструкцию вакуумной системы ввиду отсутствия натекаателя и резервуара с газом, а также связанной с ними контрольной аппаратуры. Исключение вызываемых этими элементами погрешностей способствует повышению точности градуировки вакуумметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Davis W. D. Ultra high vacuum gauge calibration. — «Journal of vacuum science and technology». 1968, v. 5, № 1, pp. 23—33.
2. Mittelstadt H. et al. Ermittlung der messtechnischen Parameter und Erprobung einer nach dem dynamischen Expansionsverfahren arbeitenden Anlage zum Einmessen von Vakuummetern im Druckbereich von 10^{-8} bis 10^{-4} torr. — «Experimentelle Technik der Physik». 1973, H. 21, № 5, S. 449—459.
3. Кузьмин В. В., Набиуллин В. Х. Установка для градуировки вакуумметров. — «Приборы и техника эксперимента», 1975, № 5, с. 172—173.
4. Творогов И. В., Хавкин Л. П. Устранение погрешности компрессионного манометра, связанной с откачивающим действием струи ртутного пара. — «Приборы и техника эксперимента», 1972, № 3, с. 164—166.
5. Alpert D., Buritz R. S. Ultra-high vacuum. II. Limiting factors on the attainment of very low pressures. — «Journal of applied physics». 1954, v. 25, № 2, pp. 202—210.
6. Lange W. J., Eriksen D. P. An improved gauge calibration technique. — «Vacuum». — 1967, v. 17, № 3, p. 164.
7. Кузьмин В. В. Способ динамической градуировки манометров низкого давления. Авторское свидетельство № 436253. «Бюллетень изобретений». 1974, № 26, с. 108.
8. Кузьмин В. В. Расширение области измерений редуцированных установок для градуировки вакуумметров. — В сб. «Исследования в области механических измерений». «Труды метрологических институтов СССР», вып. 156 (216), 1974, с. 13—22.
9. Davis W. D. Gauge calibration in the ultra-high vacuum range. — «Transactions of the 10-th National Vacuum Symposium of AVS», Mc. Millan Ltd. New York, 1963, pp. 253—256.
10. Ерохин А. В., Кузьмин В. В. Точность воспроизведения единицы давления в области высокого и сверхвысокого вакуума абсолютным методом редукиции давления. — «Измерительная техника». 1970, № 5, с. 41—44.
11. Кузьмин В. В., Рыжов В. А. Образцовая манометрическая установка с областью измерений 10^{-4} — 10^2 мм рт. ст. «Уникальные приборы», 1973, № 13, с. 59—64.

Поступила в редакцию 12/1.1977 г.

КОМБИНАЦИОННАЯ МЕТОДИКА ГРАДУИРОВКИ МАНОМЕТРОВ В ОБЛАСТИ ВЫСОКОГО И СВЕРХВЫСОКОГО ВАКУУМА

Развитие электровакуумного приборостроения и расширение объема физических исследований предопределили рост требований к точности оценки вакуума (низких абсолютных давлений) в откачиваемых приборах и установках. Необходимый уровень точности измерений давления остаточных газов обеспечивается градуировкой вакуумметров по соответствующей аппаратуре.

Существующие образцовые и эталонные деформационные и жидкостные манометры имеют высокую точность (погрешности менее 1%) только при давлениях выше 1 Па ($\sim 10^{-2}$ мм рт. ст.). В области же высокого и сверхвысокого вакуума — от 10^{-3} до 10^{-8} Па ($\sim 10^{-5}$ — 10^{-10} мм рт. ст.) в качестве исходных образцовых средств измерений почти повсеместно используются динамические установки, реализующие в различных формах метод редукиции давления [1—5]. Метрологической функцией этих установок является передача размера единицы давления, воспроизведенного указанными выше абсолютными манометрами, в область высокого и сверхвысокого вакуума.

Градуировка вакуумметров при давлениях ниже 10^{-5} Па сталкивается с рядом серьезных затруднений, причем одно из них связано с недостаточной точностью измерений исходных давлений в промежуточном диапазоне от 10^{-3} до 1 Па ($\sim 10^{-3}$ — 10^{-2} мм рт. ст.). Поиски решения этой проблемы идут как по пути усовершенствования деформационных и жидкостных манометров, так и в направлении разработки специальных методов передачи размера единицы давления в указанный диапазон из области более высоких давлений без ущерба для точности. В связи с этим вновь привлекли внимание два известных метода градуировки вакуумметров; метод статического расширения газа из малого объема в большой (экспансионный метод) и метод, основанный на расчетной зависимости давления в известном объеме от времени при напуске газа в него или откачке из него (хронометрический метод). Применение этих методов ограничено отсутствием поглощения или выделения газа на стенках камер и в присоединенных к ним манометрических преобразователях. Иными словами, оба метода пригодны в условиях низкого и среднего вакуума, т. е. при давлениях не ниже 10^{-2} — 10^{-3} Па, и при отключении ионизационных манометров. В реду-

ционных установках этим требованиям удовлетворяет зона исходного давления.

Комбинационная методика (сочетание методов) градуировки вакуумметров предполагает следующую схему передачи размера единицы давления: от исходного (эталонного или образцового) жидкостного или деформационного манометра размер единицы давления, воспроизведенный в области $1-10^{-6}$ Па, передается экспансионным или хронометрическим методом в область давлений $10^{-3}-1$ Па и затем вторично передается методом редукции давления в область высокого и сверхвысокого вакуума. Очевидное усложнение цепи передачи размера единицы давления оправдано возможностью расширения диапазона градуировки, а также — в значительной части его — и повышением точности. Кроме того, комбинационная методика имеет, как показано ниже, ряд существенных дополнительных преимуществ.

Согласно схеме редукции давления (рис. 1), образцовый манометр 2 и градуируемый рабочий вакуумметр 4 присоединены к

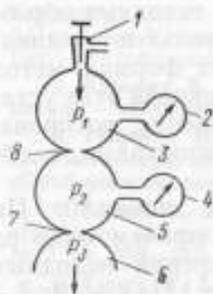


Рис. 1. Вакуумная система для градуировки вакуумметров по методу редукции давления

разным камерам: в камере 3 и градуировочной камере 5 соответственно. Необходимый перепад давлений p_1 в камере 3 и p_2 в камере 5 обеспечивается непрерывным течением газа, поступающего через натекаТЕЛЬ 1 в камеру 3 и из нее через диафрагму 8 малой проводимости U_1 (в молекулярном режиме течения) — в камеру 5. Из камеры 5 газ через диафрагму 7 проводимости U_2 (также в молекулярном режиме) и камеру 6 низкого давления (p_3) откачивается высоковакуумным (сверхвысоковакуумным) насосом (агрегатом).

После предварительной откачки камер системы до остаточных давлений, пренебрежимо малых по сравнению с рабочими, открывают натекаТЕЛЬ 1 и напускают градуировочный газ так, чтобы в камере 3 установилось давление p_1 , которое можно измерить образцовым манометром 2. Соответствующее давление p_2 в градуировочной камере 5 можно рассчитать (при условии равенства температур газа в камерах):

$$p_2 = \frac{U_1}{U_2} p_1 (1 + \delta), \quad (1)$$

где δ — суммарная поправка, учитывающая ряд побочных процессов [6].

Рассчитанные значения давления p_2 сопоставляют с сигналом градуируемого вакуумметра 4.

Для расширения рабочей области редукционной системы необходимо уменьшать значения U_1 и p_1 и увеличивать значение U_2 . Возможности увеличения проводимости U_2 ограничены условием $p_3 \ll p_2$, в противном случае возрастает влияние поправки δ . При уменьшении проводимости U_1 растут трудности ее точного измерения, что также сказывается на точности расчета давления p_2 . Возможности понижения давления p_1 обусловлены пределом измерений образцовых манометров, указанным выше. Все это предопределило необходимость поиска решения задачи посредством сочетания разных методов градуировки.

Рассмотрим баланс газа в камере исходного давления 3:

$$V_1 \frac{dp_1}{dt} + (U_1 + s)p_1 - U_1 p_2 - q - Q = 0, \quad (2)$$

где V_1 — объем камеры 3, q — поток газоотделения поверхности камеры 3, s — скорость откачки (или газоотделения) манометрического преобразователя, присоединенного к камере 3; Q — поток газа, напускаемый в камеру 3 натекателем 6; t — время.

Анализ уравнения (2) вскрывает возможности расширения области давлений p_1 . Очевидно, функция $p_1 = f(p_2)$ не может быть здесь полезна, так как $p_2 \ll p_1$. Также непригодны для решения данной задачи зависимости $p_1 = f(s)$ и $p_1 = f(q)$.

Функции $p_1 = f(Q)$ и $p_1 = f(U_1)$ в принципе могут служить для расчета давлений p_1 , но недостаточная точность, с которой в настоящее время производятся измерения величин Q и U_1 , ограничивает перспективность использования этих функций.

Зависимости $p_1 = f(V_1)$ и $p_1 = f(t)$ связывают искомое давление p_1 с величинами, которые можно измерить с весьма малыми погрешностями. Поэтому данные зависимости легли в основу наиболее эффективных комбинационных методов градуировки: экспансионно-редукционного и редукционно-хронометрического [7, 8].

В экспансионно-редукционном методе градуировки вакуумметров используется сочетание редукции давления с циклическим изменением объема камеры исходного давления. Если начальное и конечное значения этого объема известны, то понизившееся в результате расширения газа давление может быть точно рассчитано. В [9] предложен способ практического осуществления такого сочетания.

Вакуумная система (рис. 2), применяемая для этого способа, включает помимо обычных элементов редукционной установки

также дополнительную камеру 12 (известного объема V), присоединенную с одной стороны к камере исходного давления 3 через клапан 11, а с другой стороны через клапан 9— к дополнительному насосу 7.

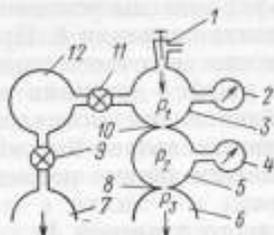


Рис. 2. Вакуумная система для градуировки вакуумметров экспансионно-редукционным методом (с дополнительной камерой):

1 — натекатель; 2 — образцовый манометр; 3 — камера исходного давления; 4 — градуируемый рабочий вакуумметр; 5 — градуировочная камера; 6 — камера низкого давления; 7 — дополнительный насос; 8 — диафрагма проводимости U_2 ; 9, 11 — клапаны; 10 — диафрагма малой проводимости U_1 ; 12 — дополнительная камера

При закрытом клапане 11 градуировку вакуумметров 4 выполняют по описанной выше стандартной методике редукции давления. Нижний предел рабочего диапазона градуировки ограничен соответствующим нижним пределом измерений образцового манометра 2, согласно формуле (1). После того, как исчерпаны возможности стандартной методики, т. е. при более низких давлениях, градуировку производят следующим образом.

После предварительной откачки камеры 12 насосом 7 до остаточного давления p закрывают клапан 9 и открывают клапан 11. Если перед этим в камере 3 было давление p_1 , то после открытия клапана 11 в общем объеме $V_1 + V$ камер 3 и 12 устанавливается давление p'_1 :

$$p'_1 = \frac{V_1}{V_1 + V} p_1 \left(1 + \frac{V}{V_1} \frac{p}{p_1} \right)^* \quad (3)$$

причем давление p'_1 уже не может быть достаточно точно измерено непосредственно образцовым манометром 2.

Соответствующее давление p'_2 в градуировочной камере 5 рассчитывается как:

$$p'_2 = \frac{U_1}{U_2} p'_1 (1 + \delta) = \frac{U_1}{U_2} \frac{V_1}{V_1 + V} p_1 \left(1 + \frac{V}{V_1} \frac{p}{p_1} \right) (1 + \delta) \quad (4)$$

* Более строгий анализ процесса расширения газа из одной камеры в другую вскрывает необходимость введения в уравнение (3) ряда поправок [10].

При $p \ll p_1$

$$p_2' = \frac{U_1}{U_2} \frac{V_1}{V_1 + V_2} p_1 (1 + \delta) \quad (4a)$$

Затем вновь закрывают клапан 11 и открывают клапан 9. После вторичного открытия клапана 11 (при закрытом клапане 9) в камерах 3 и 12 установится давление p''_1 :

$$p''_1 = \left(\frac{V_1}{V_1 + V} \right)^2 p_1 \left(1 + \frac{V}{V_1} \frac{P}{p_1} \right) \left(1 + \frac{V}{V_1} \frac{P}{p_1} \right) \quad (5)$$

и в градуировочной камере 5 — давление p''_2 :

$$p''_2 = \frac{U_1}{U_2} \left(\frac{V_1}{V_1 + V} \right)^2 p_1 \left(1 + \frac{V}{V_1} \frac{P}{p_1} \right) \left(1 + \frac{V}{V_1} \frac{P}{p_1} \right) (1 + \delta) \quad (6)$$

Повторив описанные операции n раз, можно воспроизвести и рассчитать достаточно низкие давления: в камере 3

$$p_1^{(n)} = \left(\frac{V_1}{V_1 + V} \right)^n p_1 \left(1 + \frac{V}{V_1} \frac{P}{p_1} \right) \left(1 + \frac{V}{V_1} \frac{P}{p_1} \right) \left(1 + \frac{V}{V_1} \frac{P}{p_1} \right) \dots \left(1 + \frac{V}{V_1} \frac{P}{p_1^{(n-1)}} \right) \quad (7)$$

и камере 5

$$p_2^{(n)} = \frac{U_1}{U_2} \left(\frac{V_1}{V_1 + V} \right)^n p_1 \left(1 + \frac{V}{V_1} \frac{P}{p_1} \right) \left(1 + \frac{V}{V_1} \frac{P}{p_1} \right) \left(1 + \frac{V}{V_1} \frac{P}{p_1} \right) \dots \left(1 + \frac{V}{V_1} \frac{P}{p_1^{(n-1)}} \right) (1 + \delta) \quad (8)$$

$p \ll p_1, p_1, \dots, p_1, p_2^{n-1}$

$$p_1^{(n)} = \left(\frac{V_1}{V_1 + V} \right)^n p_1 \quad (7a)$$

и
$$p_2^{(n)} = \frac{U_1}{U_2} p_1 \left(\frac{V_1}{V_1 + V} \right)^n (1 + \delta) \quad (8a)$$

Расчетные значения давлений $p'_2, p''_2, \dots, p^{n_2}$ сопоставляют с соответствующими сигналами градуируемого вакуумметра 4.

Таким образом, измерив первоначально сравнительно высокое давление p_1 , можно при определенном числе n описанных циклов расширения получить и рассчитать давления $p^{n_2} \ll p_2$. Например, при $V_1 \approx V$ $p^{n_2} = \frac{1}{2^n} p_2$ и после $n=7$ циклов расширения давления в камерах 3 и 5 будут более, чем в 100 раз, ниже первоначальных. Так, если нижний предел измерений по образцовому компрессионному манометру составляет 1 Па, то с помощью циклического расширения газа можно сдвинуть эту границу по крайней мере, до 10^{-2} Па. Соответственно на два порядка величины сместится и нижний предел рабочей области давлений p_2 в градуировочной камере.

Длительность проведения градуировки Δt по описанной методике ограничена условием $\Delta t \ll \frac{V_1}{U_1}$ (в противном случае в расчетные уравнения (7) и (8) нужно вводить дополнительные поправки).

Для типичных значений $V_1 \approx 1-10$ л и $U_1 \approx 10^{-4}-10^{-5}$ л/с должно быть $\Delta t \gg 3-300$ ч, что вполне приемлемо.

Другая форма экспансионно-редукционного метода градуировки вакуумметров предложена в [11]. Конструкция установки более проста: здесь не требуется ни дополнительной камеры и насоса, ни аппаратуры для контроля давлений в них. Циклическое расширение газа происходит внутри самой редукционной системы.

Вакуумная система данного способа градуировки (рис. 3) также содержит два дополнительных клапана: клапан 10, помещенный в камере исходного давления 3 и расположенный параллельно диафрагме 4 с отверстием малой проводимости U_1 , может

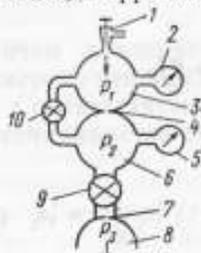


Рис. 3. Вакуумная система для градуировки вакуумметров экспансионно-редукционным методом (без дополнительной камеры):

1 — датчик; 2 — образцовый манометр; 3 — камера исходного давления; 4 — диафрагма малой проводимости U_1 ; 5 — градуируемый рабочий вакуумметр; 6 — градуировочная камера; 7 — диафрагма проводимости U_2 ; 8 — камера низкого давления; 9, 10 — клапаны.

при открытии соединять камеры 3 и 6 известных объемов V_1 и V_2 соответственно, а клапан 9, находящийся в камере низкого давления 8, может закрывать диафрагму 7 проводимости U_2 и изолировать, таким образом, камеру 6 от откачки.

После предварительной откачки системы в камере 3 устанавливают минимальное давление p_1 , измеряемое образцовым манометром 2. При этом клапан 10 закрыт, а клапан 9 открыт. Давление p_2 в градуировочной камере 6 рассчитывают по формуле (1). Затем закрывают клапан 9 и открывают клапан 10. Давление p'_1 , устанавливающееся в общем объеме $V_1 + V_2$ камер 3 и 6, вычисляется аналогично формуле (3)

$$p'_1 = \frac{V_1}{V_1 + V_2} p_1 + \frac{V_2}{V_1 + V_2} p_2. \quad (9)$$

После этого вновь закрывают клапан 10 и открывают клапан 9. Через некоторое время в камере 6 устанавливается давление p'_2 :

$$p'_2 = \frac{U_1}{U_2} \left(\frac{V_1}{V_1 + V_2} p_1 + \frac{V_2}{V_1 + V_2} p_2 \right) (1 + \delta). \quad (10)$$

При $p_2 \ll p_1$

$$p'_2 = \frac{U_1}{U_2} \frac{V_1}{V_1 + V_2} p_1 (1 + \delta). \quad (10a)$$

После вторичного открытия клапана 10 (при закрытом клапане 9) в камерах 3 и 6 установится давление p''_1 :

$$p''_1 = \left(\frac{V_1}{V_1 + V_2} \right)^2 p_1 + \frac{V_2}{V_1 + V_2} \left(p'_2 + \frac{V_1}{V_1 + V_2} p_2 \right). \quad (11)$$

И, наконец, после вторичного открытия клапана 9 (при закрытом клапане 10) в камере 6 устанавливается давление p''_2 :

$$p''_2 = \frac{U_1}{U_2} \left[\left(\frac{V_1}{V_1 + V_2} \right)^2 p_1 + \frac{V_2}{V_1 + V_2} \left(p'_2 + \frac{V_1}{V_1 + V_2} p_2 \right) \right] (1 + \delta). \quad (12)$$

Повторив описанные операции n раз, можно воспроизвести и рассчитать достаточно низкие давления:
в камере 3

$$p_1^{(n)} = \left(\frac{V_1}{V_1 + V_2} \right)^n p_1 + \frac{V_2}{V_1 + V_2} \sum_{i=0}^{n-1} \left(\frac{V_1}{V_1 + V_2} \right)^{n-1-i} p_2^{(i)} \quad (13)$$

и в камере 6

$$p_2^{(n)} = \frac{U_2}{U_2} \left[\left(\frac{V_1}{V_1 + V_2} \right)^n p_1 + \frac{V_2}{V_1 + V_2} \sum_{i=0}^{n-1} \left(\frac{V_1}{V_1 + V_2} \right)^{n-i+1} p_2^{(i)} \right] (1 + \delta) \quad (14)$$

При $p_2^{n_2} \ll p_1$ уравнения (13) и (14) приходят к виду, аналогичному (7 а) и (8 а),

$$p_1^{(n)} = \left(\frac{V_1}{V_1 + V_2} \right)^n p_1 \quad (13a)$$

$$p_2^{(n)} = \frac{U_1}{U_2} \left(\frac{V_1}{V_1 + V_2} \right)^n p_1 (1 + \delta) \quad (14a)$$

Расчетные значения давлений p_1' , p_2' , ..., p_{n_2}' сопоставляют с соответствующими сигналами градуируемого вакуумметра.

Длительность проведения градуировки Δt по описанной методике должна удовлетворять условию:

$$n \frac{V_2}{U_2} \ll \Delta t \ll \frac{V_1}{U_1}$$

(в противном случае в расчетные уравнения (13) и (14) требуется ввести дополнительные поправки).

Для типичных значений $V_1 \approx V_2 \approx 5-10$ л, $U_1 \approx 10^{-4}-10^{-5}$ л/с, $U_2 \approx 5-10$ л/с должно быть $n \ll \Delta t \ll 10^6-10^6$ с, что приемлемо.

Экспансионно-редукционная градуировка вакуумметров (последняя разновидность) была экспериментально исследована на образцовой аппаратуре ВНИИМ [12]. Цель экспериментов состояла в оценке эффективности описанной методики посредством проверки справедливости расчетных формул (13) и (14). Возможность такой проверки обеспечивалась выполнением экспериментов в такой области давлений p_1 , которые можно было одновременно и рассчитать, и измерить образцовым манометром (в качестве которого служил прецизионный электронно-механический манометр [13]).

После каждого цикла расширения сопоставлялись значения давлений p_2 в градуировочной камере, вычисленные:

по уравнению измерения метода редукции давления:

$$p_2^{(n)} = \frac{U_1}{U_2} p_1^{(n)} (1 + \delta) \quad (1a)$$

и по уравнению измерения экспансионно-редукционного метода — (14 а).

При проведении экспериментов параметры установки [12] были следующими:

$$U_1 = 3,64 \cdot 10^{-5}, \quad U_2 = 8,75 \text{ л/с.}$$

$$V_1 = 8,11 \text{ л.}, \quad V_2 = 15,7 \text{ л.}$$

После подстановки этих данных в уравнения (1 а) и (14 а) получаем:

$$p_2^{(n)} = 4,16 \cdot 10^{-5} p_1^{(n)} (1 + \delta) \quad (1а)$$

$$p_2^{(n)} = 4,16 \cdot 10^{-5} (0,346)^n p_1 (1 + \delta) \quad (14)$$

В таблице приведены результаты одного из опытов.

Начальные давления, Па		Давления после расширения, Па									
по показаниям образцового манометра	$10^{-3} p_2$ по формуле (1)	p_1'		$10^{-3} p_2'$		p_1''		$10^{-3} p_2''$		$\frac{p_2'(16)}{p_2'(14б)}$	$\frac{p_2''(16)}{p_2''(14б)}$
		по показаниям образцового манометра	по ф-ле (9)	по ф-ле (16)	по ф-ле (14б)	по показаниям образцового манометра	по ф-ле (11)	по ф-ле (16)	по ф-ле (14б)		
82,6	4,44	27,9	28,6	1,85	1,91	—	—	—	—	0,97	—
100	5,63	34,0	34,7	2,45	2,51	11,6	12,0	1,19	1,22	0,98	0,98
90,0	4,81	31,5	31,1	2,04	2,01	—	—	—	—	1,02	—
100	4,96	37,3	34,7	2,09	1,95	12,8	12,0	1,01	0,95	1,07	1,06

Данные экспериментов позволили сделать вывод о сходстве значений отношений $\frac{p_1'}{p_1}$ и $\frac{p_1''}{p_1}$, $\frac{p_2'}{p_2}$ и $\frac{p_2''}{p_2}$, вычисленных обоими способами. Средние отношения давления $p_2^{(n)}$, рассчитанных двумя методами, т. е. по уравнениям (1 б) и (14 б), равны 1,01 для первого цикла расширения и 1,02— для второго цикла расшире-

ния. Расхождения (1—2%) между обоими методами находятся в пределах допускаемых погрешностей образцовых редуционных установок. При этом уже после двух циклов расширения давление p''_2 в градуировочной камере становится ниже первоначального давления p_2 в 4—5 раз. Таким образом, для уменьшения нижнего предела рабочих давлений редуционной установки на порядок величины достаточно трех циклов расширения. Это характеризует эффективность экспансионно-редуционного метода и правильность выполненных расчетов.

В обеих формах экспансионно-редуционной градуировки отсутствует непосредственное измерение весьма низких давлений p_1 . В обоих случаях используется сочетание расчета понижающегося исходного давления p''_1 и редукции этого давления для градуировки в области высокого и сверхвысокого вакуума. Статическое расширение выполняется здесь в таком диапазоне давлений, где непосредственное измерение давлений уже затруднено, а эффекты сорбции и десорбции газа на стенках камеры еще пренебрежимы. Таким образом, обеспечивается расширение диапазона градуировки в сторону низких давлений.

«Коэффициент расширения» $\frac{V_1}{V_1+V}$ (или $\frac{V_1}{V_1+V_2}$) можно вычислить очень точно, так как измерения объемов выполняются в принципе с весьма малыми погрешностями. Благодаря этому расширение рабочей области редуционных установок достигается при сохранении высокой точности, а у верхнего предела этой области следует ожидать и повышения точности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенное позволяет заключить, что экспансионно-редуционный метод градуировки представляет оптимальную комбинацию обоих фундаментальных методов градуировки вакуумметров (статического расширения и динамической редукции давления) и дает наиболее простое и удобное решение задачи расширения диапазона градуировки в область сверхвысокого вакуума. Метод сочетания редукции давления с расчетом полученных в результате циклического расширения низких исходных давлений прошел экспериментальную проверку и оказался весьма эффективным. Испытание его показало согласие действительной картины распределения давлений в камерах редуционной установки с расчетными формулами. Обе формы экспансионно-редуционной градуировки методически просты и не требуют для реализации сложной оснастки вакуумной системы.

Устранение операций регулирования натекателя и измерения давления в каждой градуировочной точке значительно упростило процесс градуировки, сведя его к управлению клапанами и однократному измерению давления образцовым манометром.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузьмин В. В. Принцип цепной передачи в вакуумной метрологии. — «Научные приборы», 1975, № 7, с. 7—21.
2. Calcatelli A. et al. Standards systems in vacuum and development trends. — «Proceedings of the 6-th International vacuum Congress, Kyoto, 1974», Tokyo, 1974, pp. 131—134.
3. Jeager P. R. et al. Absolute calibration of Apollo lunar orbital mass spectrometer. — «Journal of vacuum science and technology», 1973, v. 10, № 2, pp. 348—354.
4. Mittelstädt H. et al. Ermittlung der messtechnischen Parameter und Erprobung einer nach dem dynamischen Expansionsverfahren arbeitenden Anlage zum Einmessen von Vakuummetern im Druckbereich von 10^{-3} bis 10^{-4} torr. — «Experimentelle Technik der Physik», 1973, H. 21, № 5, s. 449—459.
5. Кузьмин В. В., Набуллин В. Х. Установка для градуировки вакуумметров. — «Приборы и техника эксперимента», 1975, № 5, с. 172—173.
6. Ерюхин А. В., Кузьмин В. В. Точность воспроизведения единицы давления в области высокого и сверхвысокого вакуума абсолютным методом редукиции давления. — «Измерительная техника», 1970, № 5, с. 41—44.
7. Кузьмин В. В. Способ динамической градуировки манометров низкого давления. Авторское свидетельство № 436253. — «Бюллетень изобретений», 1974, № 26, с. 108.
8. Кузьмин В. В. Расширение области измерений редукиционных установок для градуировки вакуумметров. — В сб. «Исследования в области механических измерений. Труды метрологических институтов СССР». Издательство стандартов, вып. 156(216), 1974, с. 13—22.
9. Кузьмин В. В. Устройство для динамической градуировки манометров низкого давления. Авторское свидетельство № 410272. — «Бюллетень изобретений», 1974, № 1, с. 133.
10. Гуляев М. А., Ерюхин А. В., Кузьмин В. В., Ломасов В. Н. Об измерении давлений в динамических вакуумных системах. — «Метрология» 1972, № 11, с. 3—13.
11. Кузьмин В. В. Устройство для динамической градуировки манометров низкого давления. Авторское свидетельство № 469071. — «Бюллетень изобретений», 1975, № 16, с. 93.
12. Кузьмин В. В., Рыжов В. А. Образцовая манометрическая установка с областью измерений 10^{-4} — 10^{-7} мм рт. ст. — «Уникальные приборы», 1973, № 13, с. 59—64.
13. Авсрянов П. Н., Ерюхин А. В., Рамзаева Н. А. Новый электронномеханический манометр для давлений 1—500 Па ($7,5 \cdot 10^{-2}$ —3,8 мм рт. ст.). — «Научные приборы», 1973, № 1 (15), с. 49—53.

Поступила в редакцию 12/1-1977 г.

ГРАДУИРОВКА ВОЛНОВОДНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НА УДАРНОЙ ТРУБЕ

Применение ударной трубы для измерения импульсных давлений позволяет решать две задачи — воспроизводить в динамическом режиме единицу давления и определять динамические характеристики измерительных преобразователей (ИП) давления. Наиболее широко ударные трубы применяются в физико-химических исследованиях. Обычно такие трубы имеют сложную конструкцию и большие габариты (длина от 5 до 25 м и более). Для проверки могут применяться более простые конструкции, одна из которых описывается ниже.

Предлагаемая конструкция (рис. 1) позволяет получать избыточное давление в падающей ударной волне около $(1-3) \cdot 10^3$ Па при длительности $(1-3) \cdot 10^{-3}$ с. Труба изготовлена из

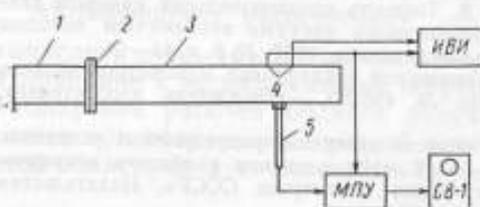


Рис. 1. Принципиальная схема установки: 1 — камера высокого давления; 2 — узел крепления диафрагмы; 3 — канал низкого давления; 4 — пьезоэлементы, регистрирующие время прихода ударной волны; 5 — волноводный ИП давления; ИВИ — измеритель временных интервалов; МПУ — малогабаритный пульт управления; С8-1 — запоминающий осциллограф.

трубы с газом емкостью 40 л и давлением 15 МПа. Для получения необходимых давлений применен редуктор. Разрушение диафрагмы производится давлением без специального разрушающего устройства. КВД была испытана на максимальное давление 2 МПа и применялась при рабочем давлении не более 1 МПа. В качестве диафрагмы применялась пленка из целлофана толщиной 0,02—0,05 мм.

Уравнение для разности давлений на фронте ударной волны $(p_2 - p_1)$ имеет вид:

$$p_2 - p_1 = \frac{2\gamma}{\gamma + 1} \left(\frac{s^2}{\tau^2 a^2} - 1 \right) p_1 \quad (1)$$

где $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ — отношение удельных теплоемкостей);

$$a = 344,5 \sqrt{\frac{273 + T}{298}}$$

скорость звука в воздухе; T — абсолютное значение температуры воздуха в КНД.

Для измерения атмосферного давления p_1 применялся барограф М-22. Температура газа в КНД измерялась ртутным термометром. Скорость ударной волны определялась по времени τ , за которое она проходила базовое расстояние между двумя пьезоэлектрическими чувствительными элементами.

С помощью сульфатлитиевых ИП давления обтекаемой конструкции [2], размещенных параллельно оси ударной трубы на расстоянии 2 м от диафрагмы, определялась длительность плоской вершины ударной волны. Она составила 2,5 мс при заполнении КВД азотом и 0,8 мс — при заполнении гелием. Диапазон воспроизводимой разности давлений на фронте лежит в пределах (0,05—0,4) МПа.

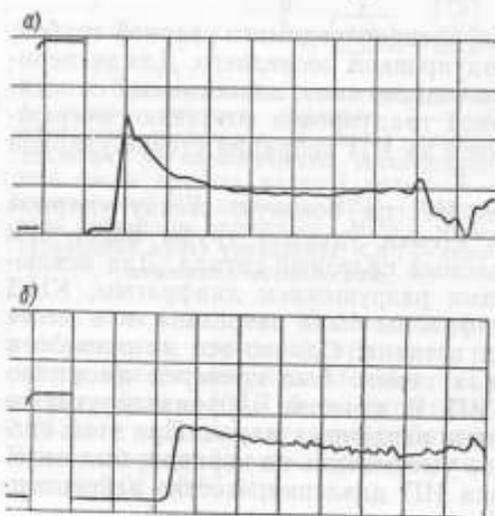
Размер единицы давления, воспроизводимого ударной трубой, передается ИП давления градуировкой последнего. Для экспериментов применялся ИП волноводного типа, аналогичный описанному в [3]. Обычно при такой градуировке возникают погрешности, обусловленные влиянием на ИП вибраций стенок ударной трубы.

При жестком креплении ИП на боковую стенку ударной трубы сигнал от вибраций стенки ударной трубы более чем на порядок превышал ожидаемый полезный сигнал. Для исключения возмущений, вызванных разрушением диафрагмы, КНД на расстоянии 10 см от диафрагмы была разрезана, и в месте разреза установлена мягкая вставка. Однако это не привело к заметному снижению сигнала помех. Был проверен амортизированный узел крепления ИП. В качестве виброизолирующего слоя применялся воск и резина различных марок. При этом сигнал от вибраций, несмотря на уменьшение на порядок, был недопустимо велик и градуировка ИП давления, жестко закрепленного на стенке ударной трубы, оказалась невозможной.

Если ограничиться градуировкой ИП (без определения его переходной характеристики), то достаточно регистрировать сигнал только вблизи фронта ударной волны. В этом случае ИП давления можно крепить на основании, не связанном с ударной трубой, а волновод ИП вводить в ударную трубу через отверстие в стенке с воздушным зазором, через который газ частично выходит в процессе измерения. Однако за время обтекания волновода фронтом ударной волны эту утечку можно уменьшить до пренебрежимой либо учесть в виде поправки. Определение коэффициента преобразования ИП по заряду производилось по методике [4] с градуировкой усилительной и регистрирующей аппаратуры в процессе измерения с помощью малогабаритного пульта управления, включающего в себя высокоомный предусилитель, генератор калибровочных импульсов и схему запуска. В качестве регистратора использовался запоминающий осциллограф С8-1. Формула для коэффициента преобразования ИП давления по заряду имеет вид:

$$\kappa = \frac{C_{\kappa} U_{\kappa}}{p_2 - p_1} \frac{l_p}{l_{\kappa}} \quad (2)$$

где C_{κ} — калибровочная емкость; U_{κ} — напряжение импульса калибровки; p — разность давлений на фронте ударной волны; l_p и l_{κ} — отклонения луча осциллографа, обусловленные давлением и калибровочным импульсом.



С целью исследования влияния утечки газа через зазор на результаты градуировки производилась осциллографическая регистрация сигнала ИП при различной величине зазора (рис. 2). При большой величине зазора амплитуду импульсного напряжения на фронте необходимо экстраполировать к началу процесса и вводить поправки, что приводит к значительному увеличению погрешности градуировки. При величине зазора 0,05 мм установка ИП в центре

отверстия крайне усложняется и на полезный сигнал накладывается сигнал от вибраций стенок ударной трубы. Оптимальным следует считать зазор 0,15 мм. При этом поправка от экстраполяции не превышает 5%.

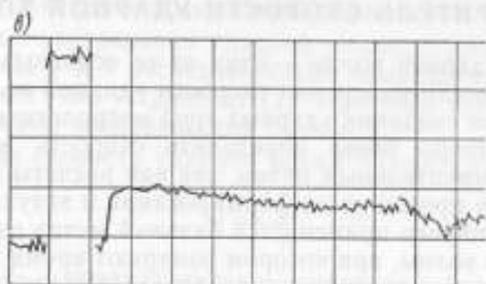


Рис. 2. Осциллограммы ударных волн с калибровочным импульсом 25 мкс/дел и 0,01 В/дел для зазоров: а—2, б—0,15 и в—0,05 мм.

При давлениях $p_2 - p_1$ от 0,1 до 0,3 МПа, по результатам десяти измерений, среднее значение коэффициента преобразования ИП составило 95 пКл/МПа, а среднее квадратическое отклонение — 4%.

Полученное значение совпадает с результатом квазистатической градуировки (99 пКл/МПа) в пределах погрешности измерений, что свидетельствует о правильности принятого динамического способа градуировки измерительного преобразователя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гейдон А., Герл И. Ударная труба в химической физике высоких температур. М., «Мир», 1966, 428 с.
2. Плотников И. В. Особенности применения кристалла сульфата лития моногидрата в пьезоэлектрических измерительных преобразователях. — «Труды метрологических институтов СССР», вып. 156 (216), 1974, М., Изд-во стандартов, с. 57—71.
3. Наугольных К. А., Рой Н. А. Электрические разряды в воде М., «Наука», 1971, 150 с.
4. Плотников И. В., Мочалов В. В., Смирнова Г. И. Квазистатический метод градуировки преобразователей давлений. — «Труды метрологических институтов СССР», вып. 156 (216), 1974, М., Изд-во стандартов, с. 62—65.

Поступила в редакцию 12/1-1977 г.

ИЗМЕРИТЕЛЬ СКОРОСТИ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

Скорость ударной волны — один из ее основных параметров. Проблема точности измерения скорости ударной волны особенно остро стоит при создании ударных труб метрологического назначения. Достаточно точно определить скорость волны можно только экспериментальным путем, так как расчеты не позволяют учесть влияние процессов ее формирования и затухания [1].

Наиболее широко применяется базовый метод измерения скорости ударной волны, при котором измеряют время прохождения ударной волны между двумя (или более) фиксированными точками в трубе. При этом среднюю скорость ударной волны на участке между двумя пьезоэлементами определяют как частное от деления длины измерительной базы на время. Для обнаружения ударного фронта применяются различные чувствительные элементы, однако пьезоэлектрические элементы обладают наименьшей инерционностью и поэтому наиболее пригодны при точных измерениях. При этом погрешность измерения скорости зависит от стабильности базы и погрешности измерения ее длины. При точных измерениях мгновенной скорости ударной волны из-за ее отличия от средней длина базы должна быть достаточно малой. Точное измерение базы внутри ударной трубы затруднительно. Кроме того, пьезоэлементы подвержены воздействию вибраций стенки ударной трубы и поэтому их крепят к стенке через мягкий виброизолирующий слой. При этом измерительная база жестко не фиксирована и может изменяться от изменения температуры, воздействия давления и вибраций, что снижает точность измерения базы, а, следовательно, и скорости ударной волны.

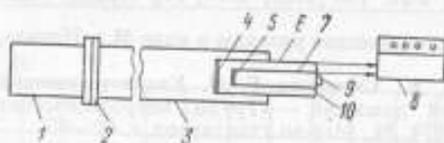


Схема измерителя скорости ударной волны

На рисунке приведена схема устройства, в котором база жестко фиксирована и может быть измерена с высокой точностью до установки на ударную трубу.

Устройство установлено соосно с каналом ударной трубы, включающей в себя камеру высокого давления 1, диафрагму 2 и канал низкого давления 3. Устройство состоит из двух пьезоэлементов 4 и 5, жестко закрепленных на передних

торцах коаксиально расположенных труб 6 и 7 длиной l_1 и l_2 соответственно. Трубы жестко соединены между собой на основании 10, имеющем гнездо для крепления градуируемого преобразователя импульсного давления 9. Пьезоэлементы соединены с измерителем временных интервалов 8.

При распространении ударной волны по каналу низкого давления трубы 6 и 7 последовательно «вырезают» ее центральную часть аналогично устройству [2]. При этом пьезоэлементы 4 и 5 вырабатывают электрический сигнал.

Средняя скорость ударной волны v определяется по формуле

$$v = \frac{l}{\tau}, \quad (1)$$

где $l = l_1 - l_2$ — предварительно измеренная база; τ — время, измеряемое измерителем временных интервалов.

Для исключения ложного сигнала от чувствительного элемента 5 длина труб 6 и 7 выбирается из условия

$$\tau < \frac{l_1 + l_2}{v_{зв}}, \quad (2)$$

где $v_{зв}$ — скорость распространения звуковых колебаний в материале труб 6 и 7.

Был изготовлен макет предлагаемого устройства. В качестве труб 6 и 7 применялись прямоугольные СВЧ-волноводы с внутренними сечениями $19 \times 9,5$ и $11 \times 5,5$ мм², длиной 500 и 400 мм соответственно, с толщиной стенки 0,5 мм.

Чувствительные элементы были изготовлены из пластинок пьезокерамики ЦТС-19 толщиной 0,5 мм и припаяны к торцам волноводных труб. В качестве измерителя временных интервалов использовался частотомер ЧЗ-35.

Устройство было испытано на установке с ударной трубой при числах Маха $\sim 1,4$ и показало высокую стабильность и надежность при эксплуатации в течение года.

В соответствии с (1) погрешность измерения скорости зависит от погрешностей измерения l и τ .

Длина базы $l = 100$ мм была измерена с погрешностью 0,2 мм (0,2%). Погрешность измерения времени $\tau = 200$ мкс частотомером составляет 0,1 мкс. Кроме того, следует учитывать конечное время нарастания сигнала в пьезоэлементе. При толщине пьезо-

элемента 0,5 мм оно составляет 0,1 мкс для каждого пьезоэлемента. Следовательно, общая погрешность измерения интервала времени составляет 0,3—0,4 мкс, или не более 0,2%, а погрешность измерения скорости 0,3—0,4%.

Устройство может найти применение в качестве образцового средства при аттестации ударных труб, служащих для воспроизведения импульсного давления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ударные трубы. Под ред. Х. А. Рахматулина, М., Изд-во иностр. лит., 1962, 699 с.
2. Солоухин Р. И. Ударные трубки для физико-химических исследований. Изд-во СО АН СССР, Новосибирск, 1966, 20 с.

Поступила в редакцию 12/1-1977 г.

УДК 533.6.071.8:531.787

В. А. ЕФИМОВ

ВНИИМ

РЕЖИМ РАБОТЫ УДАРНОЙ ТРУБЫ ПРИ ПОВЕРКЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДАВЛЕНИЯ

Ударная труба широко применяется как лабораторное средство при проверке измерительных преобразователей давления в динамическом режиме. Абсолютность метода измерения скачка давления на фронте ударной волны позволяет применять ударную трубу как метрологическую установку высшей точности. Уравнения для разности давлений на фронте падающей и отраженной ударных волн в приближении теории идеального газа имеют вид [1]:

$$p_2 - p_1 = 2\gamma p_1 \frac{M^2 - 1}{\gamma + 1} \quad (1)$$

$$p_3 - p_1 = \frac{2\gamma p_1}{\gamma + 1} \frac{(3\gamma - 1)M^2 - 4(\gamma - 1)M^2 - (3 - \gamma)}{(\gamma - 1)M^2 + 2} \quad (2)$$

где p_1 — начальное давление в канале ударной трубы; p_2 и p_3 — давление на фронте падающей и отраженной ударной волны соответственно; $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ — отношение удельных теплоемкостей рабочего газа; $M = \frac{D}{a}$ — число Маха падающей ударной волны; D — скорость ее распространения; a — скорость звука.

Найдем частные относительные погрешности определения разности давлений на фронте $\delta(p_2 - p_1)$ и $\delta(p_3 - p_1)$, обусловленные погрешностью определения числа Маха M :

$$\delta(p_2 - p_1) = \frac{2M^2}{M^2 - 1} \delta M \quad (3)$$

$$\delta(p_3 - p_1) =$$

$$= \frac{2M^2 [(3\gamma - 1)(\gamma^2 - 1)M^4 + 4(3\gamma - 1)(\gamma + 1)M^2 - (5 + \gamma)(\gamma^2 - 1)] \delta M}{[(3\gamma - 1)M^4 - 4(\gamma - 1)M^2 - (3 - \gamma)][(\gamma^2 - 1)M^2 + 2(\gamma + 1)]} \quad (4)$$

Зависимость (3) величины $\frac{\delta(p_2 - p_1)}{\delta M}$ от числа Маха [2]

в виде кривой изображена на рис. 1, где приведена также аналогичная кривая для отраженной ударной волны в воздухе, рассчитанная по формуле (4). Из сравнения этих кривых видно, что при прочих равных условиях режим падающей ударной волны обеспечивает более высокую точность определения разности давлений на фронте, а потому предпочтителен для поверочных установок высшей точности. Режим отраженной ударной волны применяется для получения более высоких давлений и нагружения преобразователей давления за время менее 10^{-6} с, что затруднительно в режиме падающей ударной волны.

Ударные трубы применяют для получения ударных волн с числами Маха 1—100 и более. Повероч-

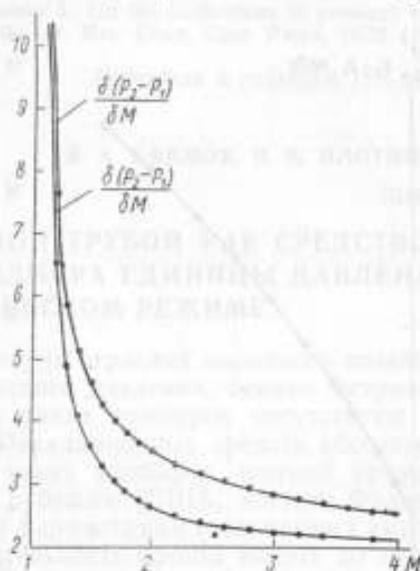


Рис. 1. Отношение погрешности определения разности давлений на фронте ударной волны к погрешности числа Маха в зависимости от числа Маха.

ную ударную трубу целесообразно применять при числах Маха от 1,4 до 4 в режиме падающей ударной волны и от 1,7 до 4 в режиме отраженной ударной волны. Нижний предел чисел Маха ограничен тем, что относительная погрешность определения разности давлений на фронте, как следует из рис. 1, в четыре раза превосходит относительную погрешность определения числа Маха на указанных пределах и резко возрастает при его уменьшении. С увеличением числа Маха относительная погрешность определения разности давления на фронте, обусловленная величиной M , монотонно убывает, однако при больших числах Маха начинают проявляться эффекты, связанные с неидеальностью реального газа, что приводит к существенным погрешностям расчета разности давлений на фронте ударной волны.

Как правило, для физико-химических исследований ударные трубы применяют при начальном давлении в канале, равном либо меньшем атмосферного. Следует указать на целесообразность применения поперечных ударных труб в режиме с начальным давлением в канале, большим атмосферного, с целью полу-

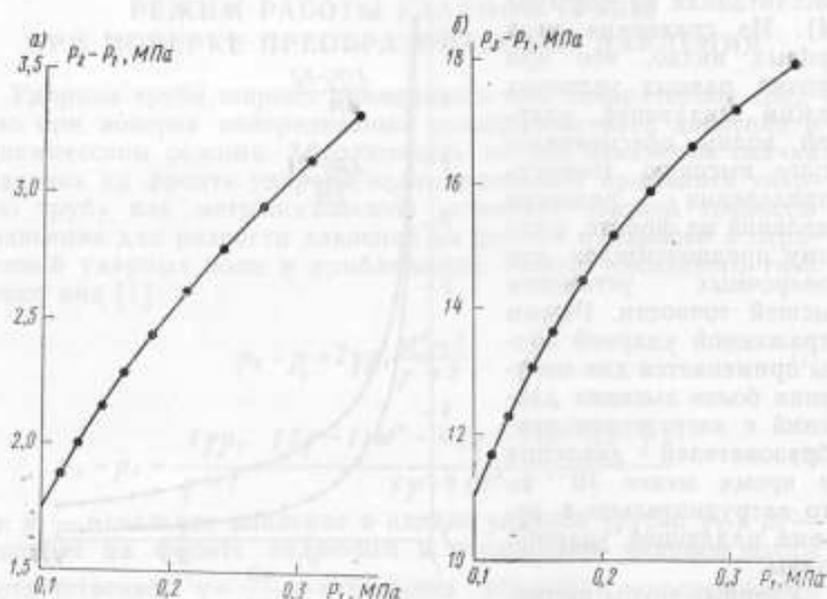


Рис. 2. Зависимость разности давлений на фронте ударной волны от давления в канале ударной трубы для газов «гелий-воздух» при давлении в камере 14,5 МПа: а — для падающей и б — для отраженной ударной волны.

чения большей разности давлений на фронте ударной волны при заданном максимальном давлении в камере высокого давления. Если давление в камере фиксировано и достаточно велико по сравнению с давлением в канале ударной трубы, то с увеличением давления в канале при фиксированном давлении в камере число Маха и отношение давлений на фронте ударной волны уменьшаются, а абсолютное значение разности давлений возрастает. На рис. 2 приведена зависимость разности давлений на фронте падающей и отраженной ударных волн от давления в канале для газов гелий—воздух при давлении в камере 14,5 МПа. Таким образом, в результате проведенной работы были установлены особенности режима работы ударной трубы при проверке преобразователей давления, которые необходимо учитывать при ее проектировании и эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гейдон А., Гера И. Ударная труба в химической физике высоких температур. М., «Мир», 1965, 428 с.
2. Goodchild R. O. and Bernstein L. On the calibration of pressure transducers for use in shock-tunnels. — «Aer. Res. Coun. Curr. Pap.», 1972 (1973), № 1240, 44 p.

Поступила в редакцию 12/1-1977 г.

УДК 689.7.018.1:531.787.089.98

В. А. ЕФИМОВ, И. В. ПЛОТНИКОВ

ВНИИМ

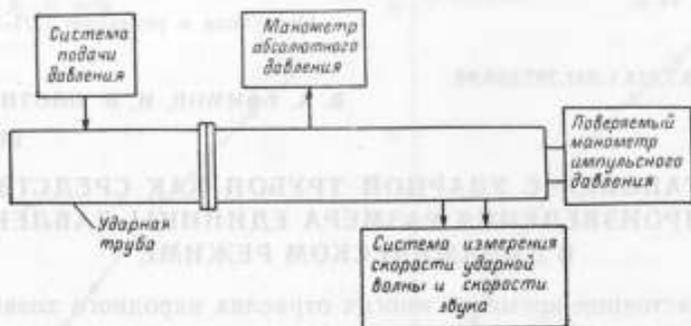
УСТАНОВКА С УДАРНОЙ ТРУБОЙ КАК СРЕДСТВО ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ РАЗМЕРА ЕДИНИЦЫ ДАВЛЕНИЯ В ДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

В настоящее время во многих отраслях народного хозяйства применяют приборы импульсного давления, однако метрологические средства аттестации таких приборов отсутствуют [1]. Ударная труба, как одно из традиционных средств абсолютной динамической градуировки таких приборов, широко применяется как в СССР, так и за рубежом (США, Англия, Франция, Япония [2—12]). Типичными параметрами создаваемых импульсов давления являются: длительность фронта вплоть до 10^{-9} с, длительность импульса — несколько миллисекунд. Разность давления на фронте от 0,01 до нескольких единиц мегапаскалей. По ударным трубам для физико-химических исследований имеется ряд обобщающих публикаций. Материал по градуировочным ударным трубам разобщен, а их некоторые специфические особенности вообще не освещены в литературе.

В статье рассматривается схема установки, уравнение измерения, описываются элементы конструкции, приводятся обоснование оптимальных режимов работы ударной трубы и оценка погрешностей измерения импульсного давления.

Схема установки. Ударная труба состоит из камеры высокого давления (КВД) и канала низкого давления (КНД), разделенных между собой разрушающейся диафрагмой. В исходном состоянии газ в КВД находится под избыточным давлением и после разрушения диафрагмы, устремляясь в КНД, начинает сжимать газ, находящийся под более низким давлением. На расстоянии 10—20 эффективных диаметров от диафрагмы [13] в газе КНД формируется плоская ударная волна, распространяющаяся со сверхзвуковой скоростью.

Установка с ударной трубой включает в себя систему подачи давления, систему измерения начального давления, систему измерения скорости звука в газе КНД, систему измерения скорости ударной волны и электронную систему, позволяющую регистрировать сигнал измерительного преобразователя давления (см. рисунок).



Принципиальная схема установки с ударной трубой

Уравнение измерения. Теория ударной трубы достаточно хорошо разработана и изложена в работах [14, 15]. Рассматривая поток газа через фронт ударной волны, на основании законов сохранения массы и импульса можно получить

$$p_2 - p_1 = \rho_1 D v_2 ; \quad (1)$$

$$p_2 - p_1 = \rho_1 D \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2} \right) . \quad (2)$$

где p_1 — начальное давление в КНД; p_2 — давление на фронте ударной волны; ρ_1 — плотность газа в КНД; ρ_2 — плотность газа за фронтом ударной волны; D — скорость распространения фронта ударной волны; v_2 — скорость газа за фронтом ударной волны.

Из соотношений (1), (2) следует, что разность давлений на фронте ударной волны может быть определена путем измерения плотности покоящегося газа, скорости распространения фронта ударной волны и скорости газа за фронтом (или плотности). Однако в настоящее время погрешности определения как v_2 , так и ρ_2 велики, и поэтому для точного определения разности давлений на фронте ударной волны соотношения (1), (2) не применяются.

Если воспользоваться уравнением сохранения энергии и уравнением состояния идеального газа, справедливым с определенной погрешностью в некотором диапазоне давлений и температур, то, исключив v_2 из (1) или ρ_2 из (2), получим

$$p_2 - p_1 = 2\gamma p_1 \frac{M^2 - 1}{\gamma + 1}, \quad (3)$$

где $M = \frac{D}{a_1}$ — число Маха ударной волны; a_1 — скорость звука в газе КНД; $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ — показатель адиабаты, отношение удельных теплоемкостей исследуемого газа при постоянном давлении C_p и объеме C_v .

Уравнение измерения для разности давлений на фронте ударной волны, отраженной от закрытого торца КНД, имеет вид

$$p_3 - p_1 = 2\gamma p_1 \frac{(3\gamma - 1)M^2 - 4(\gamma - 1)M^2 - 3 + \gamma}{(\gamma^2 - 1)M^2 + 2(\gamma + 1)}. \quad (4)$$

В правые части уравнений (3), (4) входят показатель адиабаты γ , определяемый из таблиц, непосредственно измеряемая величина p_1 и скорости D и a_1 , определяемые косвенными абсолютными измерениями.

Выбор элементов конструкции. В работе [16] указывается на целесообразность применения волноводов сверхвысоких частот для изготовления ударных труб. Наша промышленность выпускает цельнотянутые трубы длиной 5 м, толщиной стенки 5 мм и внутренним сечением 48×24 мм² (ГОСТ 20900—74). Они весьма удобны при изготовлении градуировочных ударных труб, так как имеют высокий класс частоты внутренней

поверхности. При необходимости можно увеличить прочность канала применением стальной «рубашки».

Большинство измерительных преобразователей подвержено воздействиям механических вибраций. Чтобы снизить уровень вибраций стенки ударной трубы необходимо применять толстостенные жесткие трубы. Так, ударная труба NBS США имеет толщину стенки порядка 2 см [8].

Вопросы выбора материала диафрагмы, расчета ее толщины и методы ее разрыва подробно освещены в работе [15]. Остановимся кратко на возможности замены диафрагмы быстродействующим клапаном. В литературе имеются сообщения о клапанах для ударных труб [17—19], однако по времени раскрытия они существенно уступают диафрагмам; это приводит к снижению интенсивности ударной волны и увеличению расстояния, на котором она формируется. Разработка стабильного, достаточно быстродействующего клапана позволила бы после предварительной градуировки определять давление на фронте ударной волны без измерения ее скорости по начальному давлению в КВД, что существенно упростило бы конструкцию ударной трубы.

Обычно для измерения скорости ударной волны применяют два индикатора времени прихода ударной волны, расположенные на известном расстоянии друг от друга. Скорость ударной волны по завершении процесса ее формирования снижается, при этом средняя скорость, которую определяют базовым методом, вообще говоря, не равна скорости ударной волны в момент прохождения измерительного преобразователя. Поэтому при заданной точности измерения средней скорости ударной волны следует выбирать минимально возможную длину базы, а градуируемый преобразователь давления располагать в ее центре. Для снижения погрешности измерения скорости целесообразно применять специальное устройство, разработанное для ударных труб метрологического назначения*.

Режимы работы установки. Расчет длины КВД и КНД и местоположения точки оптимального наблюдения, где фронт отраженной от торца КВД волны разряда догонит контактную поверхность, ведется по методике, изложенной в работе [15]. Для градуировочных ударных труб такие расчеты, по-видимому, не целесообразны, так как давление за фронтом ударной волны в «пробке» (газ до контактной поверхности) равно давлению в области за контактной поверхностью вплоть

* См. статью В. А. Ефимова, И. В. Плотникова «Измеритель скорости ударной волны» в настоящем сборнике, стр. 64.

до момента прихода головы волны разряжения. При этом соотношение длин КВД и КНД меняется, а импульсы большой длительности могут быть получены на трубах меньших размеров.

Если в качестве толкающего газа применять водород, то разность давления на фронте ударной волны при заданном давлении в КВД будет максимальной. Однако ввиду его взрывоопасности в градуировочных ударных трубах в качестве толкающего газа целесообразнее применять гелий или азот. Последний создает меньшее давление на фронте ударной волны. КНД обычно заполняется воздухом либо азотом; если КВД заполняют иным газом, то состав газа в КНД может меняться (от опыта к опыту), что приводит к погрешности в определении γ , a_1 . Поэтому в установках высшей точности целесообразна откачка КНД и заполнение ее газом точно известного состава.

С целью снижения погрешности градуировки ударную трубу рекомендуется применять при числах Маха от 1,4 до 4*.

Крепление преобразователя давления на боковой стенке ударной трубы рекомендуется в следующих случаях [10]:

1) если это является способом крепления преобразователя при его применении;

2) если требуется максимальная точность при определении разности давлений на фронте;

3) когда необходимо более плавное нагружение преобразователя для уменьшения его «звона».

Крепление преобразователя на торце КНД рекомендуется:

1) для определения резонансных частот преобразователей давления;

2) если это является способом крепления преобразователя при его применении;

3) если в процессе градуировки необходима максимально возможная разность давлений;

4) если требуется максимальная продолжительность импульса давления за ударной волной. Это справедливо лишь в случае применения ударной трубы в режиме со «сшитой» контактной поверхностью, и если относительные измерения в турбулентной области за контактной поверхностью не ведутся (при креплении преобразователя давления на боковой стенке).

Погрешность воспроизведения размера единицы давления. Погрешность воспроизведения давления определяется допущениями, принятыми при выводе уравнения измерения, погрешностями измерения величин D , ρ_1 и a_1 , а также погрешностью определения постоянной γ .

* См. статью В. А. Ефимова «Режим работы ударной трубы при проверке преобразователей давления» в настоящем сборнике, стр. 66.

Принятое допущение об идеальности газа имеет ограниченную применимость. Реальные газы в КИД — азот и воздух — в падающей волне нагреваются до 1200 К, а в отраженной — до 2300 К при $M=4$. С ростом температуры их теплоемкость изменяется, а показатель γ несколько уменьшается (от 1,40 до 1,37 для азота). Поправка на неидеальность реального газа для указанных условий работы может быть получена из таблиц термодинамического состояния для воздуха и азота [20, 21]. Так, для азота при давлении в ударной волне 0,94 МПа поправка составит 0,64%, при 1,75 МПа — 1,14%, а при 11,7 МПа — 3,6%.

Скорость звука в воздухе и азоте может быть достаточно точно измерена или определена на основании литературных данных [22]. Более точные результаты получены при непосредственном измерении скорости звука для газа, находящегося в КИД. При этом исключается необходимость введения поправок на температуру, состав и влажность газа. На основании имеющихся данных и сопоставления их с прямыми измерениями можно считать, что скорость звука может быть определена с погрешностью не более 0,2%.

Измерение скорости ударной волны D возможно с погрешностью 0,2—0,3%. Как уже было отмечено, измеряемая скорость является средней на базе, и поэтому может отличаться от истинной в точке размещения преобразователя давления. Это должно быть исследовано экспериментально.

Погрешность измерения начального давления газа p_1 зависит от выбранного прибора. Так, для барометра МД-49-2 погрешность составляет 0,1%.

Таким образом, для режима падающей волны в диапазоне импульсных давлений $(1,1—17,5) \cdot 10^5$ Па, которые соответствуют скорости ударной волны $D = (1,4—4) a_1$, можно привести следующие оценки.

Без введения поправок на неидеальность реального газа неисключенная систематическая погрешность составит 1,1%. При квадратическом суммировании остальных погрешностей, рассматриваемых как случайные с одинаковой доверительной вероятностью, суммарная случайная средняя квадратическая погрешность будет 0,4%.

Как показывают расчеты, погрешность определения скачка давления для отраженной ударной волны больше, чем для падающей при одинаковых давлениях. Следовательно, для уменьшения погрешности воспроизведения давления предпочтительнее режим падающей ударной волны.

Изложенное выше показывает возможность и целесообразность создания установки с ударной трубой, реализующей метод

абсолютного измерения импульсного давления в газе в достаточно широком диапазоне. Удобная ступенчатая форма кривой давление — время позволяет рекомендовать ударную трубу как образцовое средство для прямого определения переходных характеристик преобразователей давления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Плотников И. В., Полухин Г. И., Шумилин В. П.** Состояние и задачи метрологического обеспечения измерений переменных давлений. — «Метрология», 1976, № 4, с. 19—26.
2. **Нестерихин Ю. Е., Солоухин Р. И.** Методы скоростных измерений в газодинамике и физике плазмы. М., «Наука», 1967, 172 с. с ил.
3. **Кузьмичев Л. А., Муромцев Ф. В.** Ударная труба как образцовый источник скачков давления. 1-я Всесоюзная научно-техническая конференция по метрологии и технике точных измерений, СФ ВНИИМ, Свердловск, Тезисы докладов, 1968, ч. I, с. 60.
4. **Сунцов Г. Н.** Ударная труба для исследования динамических характеристик и калибровки датчиков давления. Авт. свид. № 417704, — «Бюлл. изобр.», 1974, № 8.
5. **Лаврова А. Т.** Методика и аппаратура для определения динамических характеристик преобразователей пульсирующих давлений. Тезисы первого всесоюзного симпозиума «Динамические измерения», Изд. ВНИИМ, Ленинград, 11—12 февраля, 1975, с. 13—14.
6. **Бриган А. Б., Мазманияц А. П.** Использование ударной трубы для воспроизведения импульсного давления. Тезисы первого всесоюзного симпозиума «Динамические измерения», Изд. ВНИИМ, Ленинград, 11—12 февраля, 1975, с. 14.
7. **Бошенятов Б. В.** Тарировка датчиков давления импульсным методом. В сб.: «Аэрогазодинамика», Новосибирск, «Наука», 1973, с. 274—278.
8. **Scheppe J. L.** Methods for the dynamic calibration of pressure transducers, NBS, Monograph 67, 1963, pp. 104.
9. **ANSI B-88 1—1972.** A guide for the dynamic calibration of pressure transducers.
10. **Goodchild R. O., Bernstein L.** On the calibration of pressure transducers for use shock tunnels. — «Aer. Res. Curr. Pap.», 1972 (1973), № 1240, 44 p.
11. **Stevens D. R.** The evaluation of some commercial and development pressure gauges in a view to their suitability for use in shock tunnels. — «Aer. Res. Coun. Curr. Pap.», 1964, № 677, 48 pp.
12. **Liénard P., Hay J.** Etalonnage dynamique des capteurs de pression par la méthode du tube à choc et dépouillement automatique des courbes de réponse. — «Rech. Aérospatiale», 1967, 94, pp. 27—37.
13. **Joseph Dr., Scheppe.** Calibration of pressure transducers with aperiodic inputfunction Generators. — «ISA Transactions», 1964, 3, № 1, pp. 72—79.
14. **Ударные трубы.** Сборник под ред. Х. А. Рахматулина, М., Изд. иностр. лит., 1962, 699 с.
15. **Гейдон А., Гера И.** Ударная труба в химической физике высоких температур. М., Изд. иностр. лит., 1966, 428 с.
16. **Солоухин Р. И.** Ударные трубы для физико-химических исследований. Новосибирск, «Наука», 1968, 20 с.
17. **Hakuro Oguchi, Katsushi Tunabiki and Shunitsu Sato,** An Experiment on the Shock Tube with a Mechanical Shock Valve. — «Bulletin of the Institute of Space and Aeronautical Science Univ. Tokyo», 1974, 10, № 46, pp. 779—786.

18. Muirhead J. C. and Jones W. A. Shock Wave Valves. — «Rev. of Sci. Inst.», 1969, v. 35, p. 119.

19. Distefano E. and Fraidenna N. An. Electromagnetic Diaphragm for Use in Shock Tubes. — «Rev. of Sci. Inst.», 1970, v. 41, p. 886.

20. Задункевич М. Д., Севастьянов Р. М., Зыков Н. А. Материалы к расчету газодинамических установок с высокими температурами. — «Труды ЦАГИ», 1969, вып. 1165, с. 13—86.

21. Bernstein L. Tabulates solutions of the equilibrium gas properties behind the incident and reflected normal shock wave in a shock-tube. — «Aer. Res. Coun. Curr. Pap.», 1963, № 626, 77 p.

22. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. М., Изд. иностр. лит., 1956, 720 с. с ил.

Поступила в редакцию 12/1-1977 г.

УДК 531.787.68.33

В. А. ДУНАЕВА, И. В. ПЛОТНИКОВ

ВНИИМ

УСТАНОВКА С БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИМ КЛАПАНОМ ДЛЯ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ДАВЛЕНИЙ В ЖИДКОСТИ

При исследовании динамических характеристик измерительных преобразователей давления необходимо на вход преобразователя подавать давление, изменяющееся во времени по известному закону. Одной из наиболее удобных форм входного сигнала является ступень, т. е. скачкообразный переход с одного установившегося уровня давления на другой.

Практически форма входного сигнала отличается от ступенчатой наличием переходного процесса. Давление, изменяющееся во времени и содержащее начальное и конечное установившиеся значения, а также переходный процесс, будем называть переходным давлением.

С целью воспроизведения переходного давления в жидкости разработана и изготовлена установка с быстродействующим клапаном. Принцип действия установки состоит в следующем.

Две камеры (малого и большого объемов) заполнены рабочей жидкостью и разделены клапаном. Вначале давление в камерах различно. В малой камере поддерживается атмосферное давление, в большой — создают избыточное давление, которое измеряют образцовым манометром. Поверяемые преобразователи монтируют в стенки малой камеры. С помощью быстродействующего клапана обе камеры соединяют между собой, при этом давление в малой камере возрастает от атмосферного до некоторого избыточного, которое вследствие сжимаемости жид-

кости меньше первоначально установленного давления на величину, пропорциональную отношению объемов обеих камер. Так, например, чтобы падение избыточного давления было не более 0,1%, отношение объемов большой и малой камер должно составлять не менее 1000.

Время нарастания давления существенно зависит от степени быстродействия клапана. В рассматриваемой конструкции клапан представляет собой поршневую пару с поршнем переменного сечения, притертым своими утолщенными участками с зазором 3—5 мкм к поверхности цилиндрического канала, в стенке которого на разной высоте имеются выходы в атмосферу, малую и большую камеры. Поршень перемещается вдоль оси канала под действием сжатой пружины и открывает проход между камерами, имея скорость порядка 3 м/с.

Схема конструкции установки приведена на рис. 1. Большая камера имеет объем 3 л; малая камера объемом 0,004 л содержит три гнезда для установки преобразователей с присоединительными размерами M18×1,5 (2 шт.) и M22×1,5 (1 шт.). Возможен переход на размер M12×1,25. Рабочей жидкостью, заполняющей все внутренние полости и каналы установки, является трансформаторное масло. Габариты установки 0,6×0,6×1,5 м³. Установка позволяет получать переходные давления от 10⁶ до 6·10⁷ Па (1—600 кгс/см²) и постоянные давления до 1,5·10⁸ Па. Форму и параметры переходного давления в установке определяют посредством записи электрического напряжения измерительного преобразователя на экране запоминающего осциллографа, а для интервала времени 1—10 с — по показаниям электрометра ВК2-16. В качестве согласующих усилителей применены микросхема К2СС842 А и усилитель, собранный на основе транзистора КП304. Запуск луча осциллографа перед началом переходного давления осуществляется с помощью микровыключателя, расположенного около головки поршня.

На рис. 2 приведена осциллограмма переходного давления, записанная преобразователем типа ЛХ-612. Переходный процесс имеет длительность 7—10 мс; время нарастания до пикового давления 0,2—0,3 мс; далее имеют место затухающие колебания давления с частотой 2 кГц. Амплитуда первого колебания близка к установившемуся значению, амплитуда последующих колебаний падает по экспоненциальному закону. Спад полки переходного давления определяется в основном утечкой жидкости в атмосферу через микронные зазоры поршневой пары клапана, а также постоянной времени входной цепи согласующего усилителя.

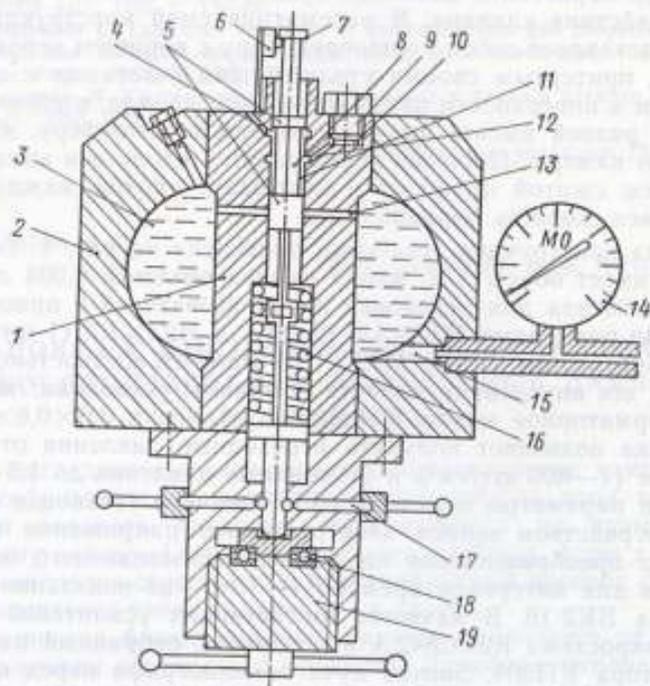


Рис. 1. Схема конструкции установки
 1— втулка; 2— корпус; 3— камера большого объема; 4, 12, 13, 15— соединительные каналы; 5— утолщенные участки поршня; 6— микровыключатель; 7— головка поршня; 8— поршень; 9— преобразователь давления; 10— камера малого объема; 11— цилиндрический канал; 14— манометр; 16— пружина; 17— устройство, фиксирующее пружину в сжатом состоянии; 18— подшпинник; 19— винт.

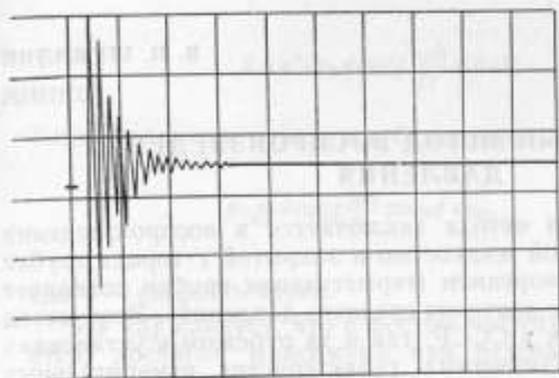


Рис. 2. Осциллограмма переходного давления. Развертка по горизонтали 2,5 мс/дел., развертка по вертикали 1 В/дел., давление 9,0 МПа. Перед началом давления виден импульс электрической калибровки

Падение давления вследствие утечки жидкости через зазоры поршневой пары клапана зависит от геометрических размеров изолирующего участка поршня, вязкости жидкости и пропорционально амплитуде переходного давления.

В данной установке при начальном давлении 3,0 МПа (30 кгс/см²) постоянная времени спада давления, измеренного по манометру, равна 1800 с.

Погрешность воспроизведения переходного давления определяется тем, насколько действительное значение давления в малой камере после окончания переходного процесса отличается от первоначально установленного давления в большой камере. Давление в большой камере измеряется образцовым манометром класса 0,4, что дает погрешность измерения 1% на 0,4 шкалы манометра.

Максимальный объем трех малых камер, когда преобразователи монтируются в гнезда установки через переходные детали, составляет 0,006 л. Это обуславливает падение избыточного давления после соединения малой и большой камер на 0,2% от первоначально установленного.

Падение давления вследствие утечки жидкости через зазоры равно 0,2% от первоначального через 3 с после соединения камер. К этому времени производился отсчет показаний манометра с целью определения фактического давления в камерах после их соединения. Как показали измерения, падение давления фактически составляет 1—2% от первоначального; это можно объяснить наличием пустот в малой камере, образующихся при монтаже преобразователя.

Установка может быть применена для квазистатической градуировки преобразователей давления, а также для определения динамических характеристик низкочастотных преобразователей.

ИНЕРЦИОННЫЙ МЕТОД ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ

Суть инерционного метода заключается в воспроизведении давления в заполненной жидкостью и закрытой с торцев трубка при движении ее с ускорением (герметизация трубки позволяет создавать в ней любые значения среднего давления). Этот метод нашел применение как в СССР, так и за рубежом в установках для определения динамических характеристик измерительных преобразователей давления [1, 2].

Если трубка совершает колебание вдоль своей оси, то давление у ее торцев приближенно описывается выражением:

$$p - \bar{p} = p_{cp} = \frac{1}{2} \rho h \omega^2 A \sin \omega t + p_{cp}, \quad (1)$$

где ρ — плотность жидкости; h — высота трубки; ω — частота колебаний трубки; A — амплитуда колебаний трубки; p_{cp} — среднее давление в трубке.

Это равенство справедливо, если считать, что $\rho = \text{const}$. В действительности жидкость сжимаема и поэтому здесь необходимо учесть влияние волновых процессов. Точное значение \bar{p} дает решение гидродинамических уравнений: непрерывности, движения, состояния, переноса тепла, сохранения энергии. Эти уравнения нелинейны, однако приближенное их решение найдено в аналитической форме, при следующих допущениях, которым достаточно близко соответствует реальный процесс в трубке [3]:

1) будем считать процесс в трубке адиабатическим, так как выравнивания температур сжатого и разреженного участка волны за счет теплопроводности практически не происходит;

2) фронт волны можно считать плоским, так как диаметр трубки значительно меньше длины волны, а относительная скорость частиц и стенок трубки мала.

Найденное приближенное решение гидродинамических уравнений содержит решения уравнений первого и второго приближений. С достаточной для практических целей точностью можно ограничиться решением уравнений первого приближения [3].

$$\bar{p} = p' = p_0 A c \omega t g \frac{\omega h}{2c} \sin \omega t. \quad (2)$$

Тогда уравнение измерения будет иметь вид:

$$p = p_0 A c \omega t g \frac{\omega h}{2c} \sin \omega t + p_{cp}. \quad (3)$$

где c — скорость звука.

Из (3) следует, что с ростом частоты значение p увеличивается, достигая максимума при резонансе, наступающем при $\frac{\omega h}{2c} = \frac{\pi}{2}$. В этом случае амплитуду определяют диссипативные процессы. Рассчитать эту амплитуду не представляется возможным. Поэтому рассмотренное уравнение измерения применимо только в дорезонансной области, границы которой можно установить экспериментально.

Погрешности измерения амплитуды давления на торце трубки будут следующими:

систематическая

$$\begin{aligned} \Delta p &= \left| \frac{\partial p}{\partial p_0} \Delta p_0 \right| + \left| \frac{\partial p}{\partial c} \Delta c \right| = \\ &= A \omega \left[c t g \frac{\omega h}{2c} \Delta p_0 + p_0 \left(t g \frac{\omega h}{2c} + \frac{\omega h}{2c \cos^2 \frac{\omega h}{2c}} \right) \Delta c \right]. \quad (4) \end{aligned}$$

случайная

$$\begin{aligned} S_p &= \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial p_0} \right)^2 S_{p_0}^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial c} \right)^2 S_c^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial h} \right)^2 S_h^2} = \\ &= p_0 \sqrt{\left(\omega c t g \frac{\omega h}{2c} \right)^2 S_{p_0}^2 + \left(A c t g \frac{\omega h}{2c} + \frac{A \omega h}{2 \cos^2 \frac{\omega h}{2c}} \right)^2 S_c^2 + \left(\frac{A \omega^2}{2 \cos^2 \frac{\omega h}{2c}} \right)^2 S_h^2} \quad (5) \end{aligned}$$

Рассмотрим значения частных составляющих погрешности: Δp_0 , Δc , S_{p_0} , S_c , S_h .

1. Среднее значение плотности жидкости ρ_0 для большинства веществ определено с достаточно высокой точностью.

2. Погрешность определения скорости звука в жидкости, помещенной в камеру, может быть найдена из уравнения (4). В оптимальном случае, если наружный диаметр трубки в 2 раза больше внутреннего

$$c = c_0 \left(1 - \frac{\rho_0 c_0^2}{\rho_1 c_1^2} \right). \quad (6)$$

где c_0 — адиабатическая скорость звука в свободном пространстве, ρ_1 , c_1 — плотность и скорость звука в материале стенок камеры

Из (6) следует, что

$$\Delta c = \Delta c_0 + \left| \frac{3\rho_0 c_0^2}{\rho_1 c_1^2} \Delta c_0 \right| + \left| \frac{c_0^2}{\rho_1 c_1^2} \Delta \rho_0 \right| + \left| \frac{\rho_0 c_0^2}{\rho_1^2 c_1^2} \Delta \rho_1 \right| + \left| \frac{2\rho_0 c_0^2}{\rho_1 c_1^2} \Delta c_1 \right| \quad (7)$$

В уравнении (7) частные погрешности имеют следующие значения:

$$\Delta c_0 \approx \Delta c_1 \approx 1 \text{ м с}^{-1}; \quad \Delta \rho_0 \approx \Delta \rho_1 \approx 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3};$$

Значение S_c обусловлено погрешностями измерения внутреннего и наружного диаметров трубки

$$S_c \approx S_{d_1} = S_{d_2} \approx 10^{-5} \text{ м}$$

Подставив значения частных составляющих погрешностей в (7), получим

$$\Delta c \approx \Delta c_0 \approx 1 \text{ м/с}.$$

Величиной S_c можно пренебречь, так как она зависит только от малой случайной погрешности измерения.

3. Погрешность измерения амплитуды колебаний камеры определяется средством измерения. Современные оптические приборы (интерферометры) дают $S_A \leq 8 \cdot 10^{-8} \text{ м}$.

4. Погрешность измерения частоты колебаний, определяемая техническими характеристиками частотомеров $S_{\omega} \geq 10^{-6} \text{ с}^{-1}$.

5. Погрешность измерения высоты камеры S_h зависит от точности измерения расстояния между мембраной измерительного преобразователя расположенного у одного торца камеры, и внутренней плоскостью другого ее торца. Эта составляющая погрешности $S_h \geq 10^{-4} \text{ м}$. Подставив значения частных погрешностей в (5) и (6) вычислим Δp и S_p . Если при этом отбросить члены высших порядков малости, то получим

$$\Delta p = A\omega\rho_0 \left(tg \frac{\omega h}{2c} + \frac{\omega h}{2c \cos^2 \frac{\omega h}{2c}} \right) \Delta c,$$

$$S_p = \rho_0 \omega \sqrt{\left(c tg \frac{\omega h}{2c} S_A \right)^2 + \left(\frac{A\omega}{2c \cos^2 \frac{\omega h}{2c}} S_h \right)^2} \quad (8)$$

Ниже приведены значения Δp и S_p , вычисленные для предельных значений диапазона частот и амплитуд при условиях:

$h = 0,2 \text{ м}$, $\rho_0 = 13,4 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ (ртуть), $c = 1400 \text{ м/с}$;
 $S_A = 8 \cdot 10^{-8} \text{ м}$, $S_h = 10^{-4} \text{ м}$, $\Delta \rho_0 = 10^{-4} \text{ кг/м}^3$, $\rho_{ср} = 10^6 \text{ Па}$.

Параметры	$f = 10 \text{ Гц}$		$f = 1 \text{ кГц}$	
	$A_{\text{мин}} = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}$	$A_{\text{макс}} = 10^{-2} \text{ м}$	$A_{\text{мин}} = 4 \cdot 10^{-6} \text{ м}$	$A_{\text{макс}} = 6 \cdot 10^{-6} \text{ м}$
Δp	0,867	71,6	242	756
S_p	0,515	27,2	$4,25 \cdot 10^3$	$4,25 \cdot 10^3$
\tilde{p}	$6 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^4$	$2,13 \cdot 10^5$	$3,23 \cdot 10^5$

Как видно, существенное значение имеет только случайная составляющая погрешности. При указанных предельных значениях S_p и \tilde{p} относительная погрешность измерения $\tilde{\Delta p} \geq 2\%$.

Инерционный метод может быть осуществлен двумя способами: 1) на установке типа вибростенда, в которой трубка с жидкостью будет совершать колебательное движение вдоль

* Применение ртути обеспечивает возможность воспроизведения давления с амплитудами до 10^6 Па , однако из-за токсичности применять ртуть следует лишь в крайних случаях.

своей оси; 2) помещением трубки с жидкостью на платформу двойной центрифуги — установки, воспроизводящей гармоническое ускорение, наложенное на постоянное ускорение.

Второй способ отличается от первого тем, что при движении трубки на столе двойной центрифуги сила инерции, как показали расчеты, имеет негармонический характер и действует не по оси трубки.

К недостатку этого способа также следует отнести то, что сигнал с градулируемого измерительного преобразователя (ИП) давления выводится через токосъемное устройство, что является дополнительным источником погрешности. Поэтому экспериментальные исследования инерционного метода производили на макете, установленном на вибростенде (см. рис. 1) на частотах

от 100 Гц до 1 кГц при амплитудах ускорения до 800 м/с^2 .

Были выполнены следующие эксперименты.

1. Снята зависимость выходного сигнала ИП давления от амплитуды ускорения; этот эксперимент дал значения $1,5 \cdot 10^3 \text{ Па} < p_0 < 1,5 \cdot 10^4 \text{ Па}$, при этом $25 \text{ Па} < S_p < 120 \text{ Па}$. Результаты опыта подтвердили линейную зависимость $p(A)$, которая следует из уравнения (3). Расхождение расчетных и опытных данных p не превышает 2%, что находится в пределах ожидаемого значения погрешности.

2. Снята зависимость давления от частоты колебаний, полученная с помощью ИП типа ЛХ-611 при постоянной амплитуде ускорения $A_{\omega^2} = 10 \text{ м/с}^2$. Исследовалась дорезонансная область амплитудно-частотной характеристики уст-

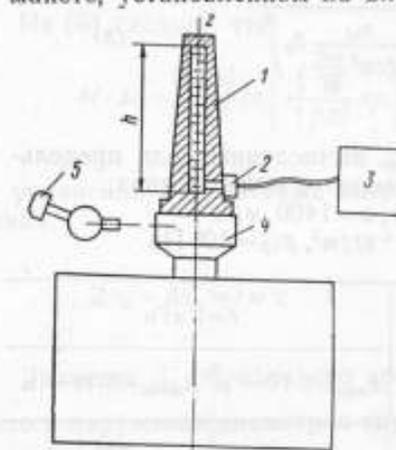


Рис. 1. Принципиальная схема установки инерционного типа

1 — камера с жидкостью; 2 — градулируемый ИП давления; 3 — регистрирующая аппаратура; 4 — стол вибростенда; 5 — оптическое устройство для измерения амплитуды вибрации.

ройства. Ввиду недостаточной жесткости верхней крышки устройства, кроме резонанса при частоте $f = \frac{c}{2h}$ наблюдался резонанс при $f = \frac{c}{4h}$.

Как видно на рис. 2, максимальное расхождение экспериментальной зависимости $p(f)$ отличается от расчетной, полученной по формуле (3), и составляет менее 10%. Этот результат можно считать удовлетворительным, так как динамические погрешности ИП ЛХ-611 неизвестны.

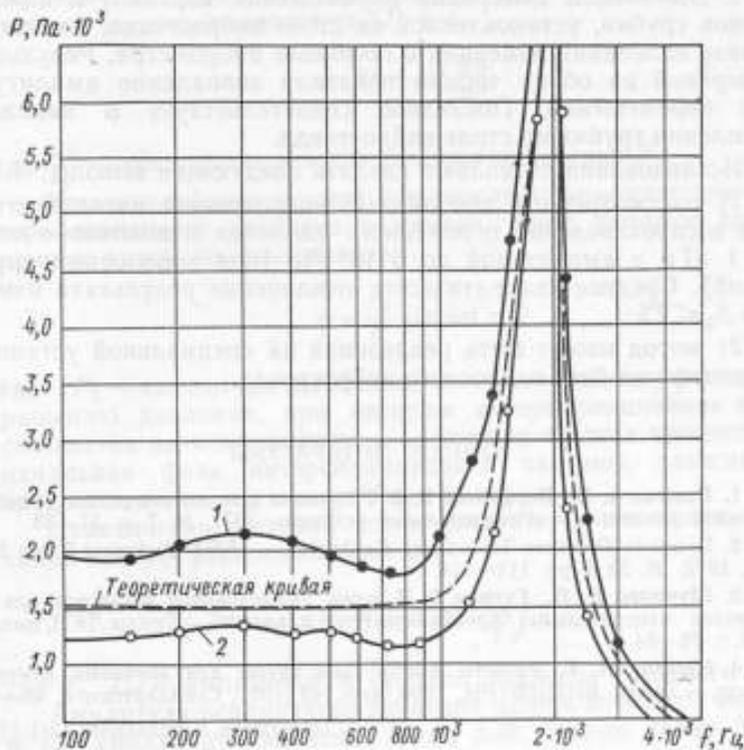


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики метода, полученные с помощью ИП ЛХ-611; 1 — ИП № 7492210; 2 — ИП № 74933516

3. Исследовано влияние вибрации камеры на чувствительный элемент ИП давления. С этой целью ИП закреплялся в камере в двух положениях: соосно с осью камеры (в этом положении ось чувствительности ИП совпадает с направлением вектора ускорения) и перпендикулярно оси камеры.

Установлено, что расположение ИП соосно с направлением вектора ускорения, совпадающего с осью трубки, приводит к увеличению выходного сигнала на 5—7%. Близкие результаты

получены при колебаниях трубки без жидкости. Этот эксперимент подтверждает также необходимость установки ИП давления в камере таким образом, чтобы его ось чувствительности была перпендикулярна оси камеры.

4. Выполнены измерения перемещений верхнего и нижнего торцов трубки, установленной на столе вибростенда. Амплитуду и фазу колебаний измеряли с помощью виброметра. Результаты измерений на обоих торцах показали совпадение амплитуд и фаз перемещений. Последнее свидетельствует о надежном креплении трубки на столе вибростенда.

Исследования позволяют сделать следующие выводы:

1) рассмотренный абсолютный инерционный метод пригоден для воспроизведения переменного давления в диапазоне частот до 1 кГц с амплитудой до $5 \cdot 10^4$ Па (при заполнении трубки водой). Среднее квадратическое отклонение результата измерения $S_p \leq 2\%$;

2) метод может быть реализован на специальной установке, созданной на базе одноосного вибростенда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Плешко А. П., Перфильев В. В. Установка для динамических испытаний датчиков давления. — «Измерительная техника», 1971, № 7, с. 37—38.
2. Dynamic Pressure Transducer Calibrator. — «NBS Technical News Bulletin», 1972, 56, № 5, pp. 111—114.
3. Шумилин В. П., Гутман Т. Л. и др. Исследование установок для градуировки измерительных преобразователей давления. — Труды ЛКИ, вып. 109, 1976, с. 76—84.
4. Русаков А. Г. Расчеты конструкции трубы для звуковых измерений в воде. — Труды ВНИИФТРИ, 1960, вып. 45 (105), Стандартгиз, с. 40—47.

Поступила в редакцию 12/1-1977 г.

УДК 531.787.53

В. П. ШУМИЛИН, Ф. Н. АВДЕЕВ

ВНИИМ

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДАВЛЕНИЯ, ОСНОВАННЫЙ НА ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОМ МЕТОДЕ

Оптический интерференционный метод определения амплитуды переменного давления основан на измерении разности хода лучей интерферометра, возникающей вследствие изменения плотности среды при изменении в ней давления.

Допущения, принятые для жидкой среды, позволяют установить функциональную связь между давлением, плотностью и показателем преломления*.

На основании опытных данных можно с необходимой точностью считать, что интерференционная картина смещается пропорционально изменению показателя преломления Δn , зависящего от изменения давления ΔP , т. е.

$$\Delta n = \Delta P \frac{dn}{dP}.$$

где $\frac{dn}{dP}$ — «быстрота» изменения n при изменении P .

Фаза интерференционной картины при гармоническом характере изменения давления в камере, через которую проходит один из лучей интерферометра,

$$\varphi = \frac{P_0}{k} \sin \omega t + \psi, \quad (1)$$

где P_0 — амплитуда давления; k — коэффициент, равный приращению давления, при котором интерференционная картина смещается на одну полосу; ω — угловая частота процесса; ψ — начальная фаза интерференционной картины, зависящая от среднего давления в камере P_{cp} и от n .

Практически световой поток измеряют в плоскости локализации интерференционных полос

$$J = J_0 \sin \left(\frac{P_0}{k} \sin \omega t + \psi \right) + J_{cp}, \quad (2)$$

где J_0 , J_{cp} — амплитуда и среднее значение светового потока.

Амплитуду переменного давления можно измерить, определив в (2) амплитуду изменения фазы P_0/k , равную числу N целых и дробных долей полос, пробегающих перед щелью фотоприемника за $1/4$ периода процесса изменения давления.

Измерение дробных частей полосы является сложной задачей, которая сводится к измерению мгновенного значения фазы электрического сигнала переменной частоты.

Метод определения N путем счета полос за m периодов процесса изменения давления с последующим усреднением (см. сноску на стр. 87) практически неприемлем, так как при этом

* В. П. Шумилин, Интерференционный метод измерения давления. В сб.: «Физические основы астрономо-геодезического приборостроения», Изд. ВАГО АН СССР, М., 1975.

дробная часть полосы будет сосчитана в каждый из m периодов, как целая полоса или вообще не зарегистрируется в зависимости от абсолютного значения дробной части N и от настройки отсчетного устройства.

Однако этих трудностей можно избежать, если фазу интерференционной картины (1) изменять по гармоническому закону с частотой $\omega_1 \ll \omega$.

Оптимальным вариантом является случай, когда время изменения числа полос N

$$\tau = \frac{2\pi}{\omega_1} = m \frac{2\pi}{\omega}$$

Тогда фаза дробной части полосы будет непрерывно изменяться и за m периодов будет зарегистрировано

$$N = \frac{m N_0 + N_1}{m}, \quad (3)$$

где N_0 и N_1 — число целых и дробных полос за 1/4 периода процесса.

Таким образом, уравнение измерения имеет вид

$$P_0 = k \frac{m N_0 + N_1}{m} \quad (4)$$

Значение k в этом равенстве находят градуировкой интерферометра путем счета полос при медленном изменении среднего давления $P_{ср}$ в камере от P_1 до P_2 .

Случайная погрешность результата измерения

$$\delta_P = \sqrt{k^2 S_N^2 + N^2 S_k^2}, \quad (5)$$

где S_N и S_k — средние квадратические отклонения результатов измерения N и k .

Систематическая погрешность измерения амплитуды давления в жидкости вызвана тем, что значение k не постоянно и зависит от частоты процесса, среднего давления в камере и от степени однородности поля переменного давления на пути луча интерферометра.

Частота процесса влияет на k следующим образом: при $f < 10$ Гц процесс в камере не адиабатический, что сильно влияет на k ; при $f > 100$ кГц сказываются релаксационные процессы, усиливается влияние нелинейных эффектов, растет влияние газо-

вых пузырьков. Как показали расчеты и экспериментальные исследования, в диапазоне частот $10 \text{ Гц} < f < 100 \text{ кГц}$ значение k изменяется не более, чем на 0,1—0,3%.

Влияние на k среднего давления в камере вызвано нелинейной зависимостью коэффициента сжимаемости жидкости от $P_{\text{ср}}$. Установлено, что k при изменении давления в диапазоне $10^6 \text{ Па} < P_{\text{ср}} < 10^7 \text{ Па}$ для воды и этилового спирта изменяется на 0,2—0,4%.

В результате влияния неоднородности поля давления интерферометр будет измерять усредненное значение давления на пути светового луча. Эта составляющая систематической погрешности зависит от формы и размеров камеры и от частоты процесса. Как показали расчеты, при измерении амплитуды давления в трубах-резонаторах и при условии, что один из лучей интерферометра проходит через трубу перпендикулярно ее оси, влияние неоднородности поля давления окажется минимальным. Однако оно будет увеличиваться с ростом частоты. В диапазоне частот $f < 5 \text{ кГц}$ этой составляющей погрешности можно пренебречь, при частоте 100 кГц ее значение возрастает до 1%.

Созданный для измерения амплитуды давления в резонаторе интерференционный преобразователь давления (ИПД) (см. рисунок) оптически связан с трубой-резонатором 2, переменное давление, в котором создается излучателем 1,

получающим питание от усилителя 14, связанного с генератором 15. Градуированный преобразователь давления 4 вводится в трубу-резонатор через торцевую крышку. Основными элементами интерферометра являются газовый лазер 5, светоделиватель 6, зеркала 3, электрооптический модулятор света 7 и фотоприемник 8. Электронный блок состоит из ключевой схемы 9, счетчика 10, схемы управления 11, делителя частоты 13 и усилителя 12.

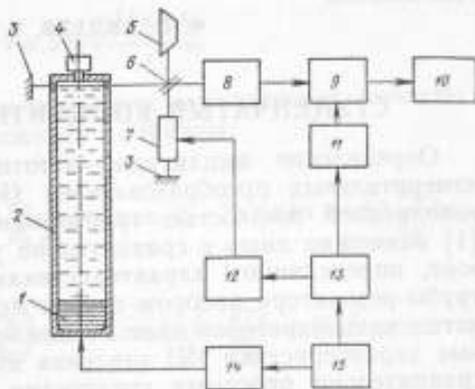


Схема интерференционного преобразователя давления.

Измерение амплитуды давления производится следующим образом. Синусоидальное напряжение от генератора поступает на делитель частоты, преобразующий частоту изменения дав-

ления ω в частоту ω/m . Сигнал с делителя после усиления поступает на электрооптический модулятор, осуществляющий изменение фазы интерференционной камеры с амплитудой $\varphi_0 = \frac{\pi}{2}$ и с периодом изменения $T = m/\omega$. По команде, поступающей со схемы управления, электронный ключ включает счетчик, регистрирующий за время $t = T$ интерференционные полосы, проходящие перед щелью фотоприемника за m периодов процесса изменения давления в трубе-резонаторе. Описанная электронная схема позволяет отсчитывать $1/m$ -ю часть полосы. В данном ИПД $m = 100$.

Исследованием ИПД установлено, что при диаметре трубы-резонатора $d = 0,05$ м и при заполнении ее водой изменение давления на 10^5 Па вызывает смещение интерференционной картины на 2,32 полосы. Это обеспечивает измерение в воде амплитуды давления $P_0 \geq 4 \cdot 10^4$ Па с погрешностью $S_p = 1\%$. Применение жидкости большей сжимаемостью (спирт, ацетон) и увеличение времени измерения позволит снизить погрешность измерения.

Поступила в редакцию 12/1-1977 г.

УДК 531.787.9

Ф. Н. АВДЕЕВ, Т. Л. ГУТМАН, В. П. ШУМИЛИН

ВНИИМ

СТУПЕНЧАТЫЙ КОНЦЕНТРАТОР ДАВЛЕНИЯ

Определение амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) измерительных преобразователей (ИП) давления с помощью заполненной жидкостью трубы-резонатора переменной длины [1] возможно лишь в сравнительно узком амплитудном диапазоне, определяемом характеристиками установки. Дополнение трубы-резонатора набором трубок меньшего диаметра — ступенчатых концентраторов дает возможность исследовать амплитудные характеристики ИП давления на ряде частот и тем самым сравнительно простыми средствами получить дополнительные сведения о его динамических характеристиках.

Ступенчатый концентратор давления, заполненный жидкостью, существенно отличается по характеру физических процессов, происходящих в пограничном слое, от аналогичных устройств, заполненных газом, и особенно — от процессов в металлических стержнях переменного сечения — механических трансформаторах, применяемых в ультразвуковых инструментах.

Поле давления P в полости концентратора может быть определено решением уравнения

$$\Delta P + k^2 P = 0; \quad k^2 = \frac{\omega^2}{c_0^2} \quad (1)$$

в области, состоящей из двух цилиндрических полостей с общей осью и разными радиусами. Здесь Δ — оператор Лапласа; ω — круговая частота колебаний; c_0 — скорость звука.

Решение этого уравнения $P(z, r)$ отражает зависимость давления от двух переменных [2]; z — расстояния данной точки мембраны излучателя и r — расстояния от оси цилиндров. Давление в центре мембраны $P(0, 0)$ на стыке труб $P(H, 0)$ и в торце узкой трубки $P(H+h, 0)$ соответственно имеют вид:

$$P(0, 0) = -\frac{2i c_0 \rho_0 v_0}{c} A.$$

$$P(H, 0) = -\frac{i c_0 \rho_0 v_0}{c} \cos kh; \quad (2)$$

$$P(H+h, 0) = -\frac{i c_0 \rho_0 v_0}{c}$$

Здесь ρ_0 — плотность жидкости, заполняющей полость; v_0 — амплитуда скорости движения мембраны;

$$C = \sin kH \cos kh + \left(\frac{r_0}{R_0}\right)^2 \sin kh \cos kH + 2k \sin kh \sin kH \frac{r_0}{R_0} L_0.$$

$$A = \frac{1}{2} \left[\cos kH \cos kh - \left(\frac{r_0}{R_0}\right)^2 \sin kh \sin kH \right] + \frac{k r_0}{R_0} \sin kh \left[L_0 \cos kh - K_0 \right].$$

r_0, R_0 — внутренние радиусы узкой и широкой трубки; L_0 и K_0 — некоторые бесконечные суммы [2], но при $r_0 \ll R_0$ можно считать, что

$$L_0 = -\frac{R_0}{2} \left(1 - \frac{3,83 r_0}{2R_0} \right) \quad (K_0 \approx 0)$$

Условие резонанса требует обращения в нуль знаменателя в формуле (2). При $h=H$ это приводит к следующему уравнению для собственных частот

$$\sin^2 kh \left\{ \left[1 + \left(\frac{r_0}{R_0} \right)^2 \right] \operatorname{ctg} kh - kr_0 \left(1 - \frac{3,83 r_0}{2 R_0} \right) \right\} = 0. \quad (4)$$

Основную частоту получим, найдя наименьший положительный корень уравнения

$$\operatorname{ctg} kh = kh \frac{\frac{r_0}{h} \left(1 - \frac{3,83 r_0}{2 R_0} \right)}{1 + \left(\frac{r_0}{R_0} \right)^2}. \quad (5)$$

Более высокие собственные частоты можно получить из соотношения

$$kh = n\pi \quad (n = 1, 2, 3), \quad (6)$$

найдя другие корни уравнения (5). Для макета установки (см. рис. 1) при $r_0=5$ мм, $R_0=39$ мм, $h=H=150$ мм уравнение (5) приобретает вид

$$0,0223 x = \operatorname{ctg} x \quad (7)$$

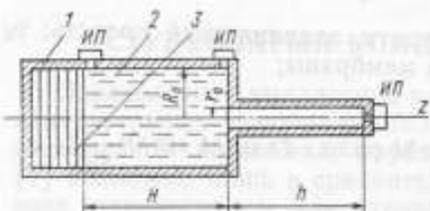


Рис. 1. Схема ступенчатого концентратора давления.

ми уменьшается увеличением номера корня.

Вычисление первых двух корней уравнения (7) дает: $x_1 = -1,536 = -0,489\pi$; $x_2 = 4,61 = 1,467\pi$. Учитывая (6), имеем $(kh)_1 = -0,489\pi$, $(kh)_2 = \pi$; $(kh)_3 = 1,467\pi$.

Принимая во внимание, что

$$k = \frac{\omega}{c_0} = \frac{2\pi f}{c_0},$$

можно получить $f_i = \frac{(\kappa h)_i}{2} c_0$

Для первых трех собственных частот (в предположении, что скорость звука равна 1440 м/с) $f_1=2,34$ кГц; $f_2=4,9$ кГц; $f_3=7,03$ кГц.

Коэффициент усиления при $H=h$ определяется как $M = \left| \frac{P(H+h, 0)}{P(0, 0)} \right|$ при

$$M = \frac{1}{\left| \cos^2 kh - \left(\frac{r_0}{R_0}\right)^2 \sin^2 kh - kh \frac{r_0}{h} \sin kh \cosh kh \left(1 - \frac{3,83 r_0}{2 R_0}\right) \right|} \quad (8)$$

Из этого выражения следует, что усиление зависит от частоты. Для первых двух собственных частот коэффициенты усиления $M_1 \approx \left(\frac{R_0}{r_0}\right)^2$; $M_2=1$.

При экспериментальном исследовании макета установки определялись АЧХ концентратора и его коэффициент усиления.

Макет (см. рис. 1) представляет собой полый ступенчатый цилиндр 1, его полость 2 заполнялась дистиллированной водой. Широкий торец цилиндра закрыт пьезоэлектрическим излучателем 3, а узкий — мембраной ИП давления типа ЛХ-611. Такие же ИП введены в камеру в плоскости мембраны излучателя ($z=0$) и в плоскости изменения сечения камеры ($z=H$). С целью исключения кавитации в камере поддерживалось среднее избыточное давление $P_{ср} = 5 \cdot 10^6$ Па.

АЧХ снимали в области частот 1—10 кГц, в которой находятся частота резонанса концентратора и частоты ближайших гармоник. Исследование в области частот выше 10 кГц не проводилось, так как при этом нарушалось условие создания в резонаторе плоских волн $d \leq 0,61\lambda$.

Результаты экспериментального исследования АЧХ представлены на рис. 2. Получены зависимости $P(f)|_{z=0}$,

$$P(f)|_{z=H}, P(f)|_{z=H+h}.$$

Как видно из графика, 1-я собственная частота концентратора не совпадает с расчетной. Это может быть объяснено влиянием импеданса крышек макета; 2-я и 3-я собственные частоты совпадают с расчетными.

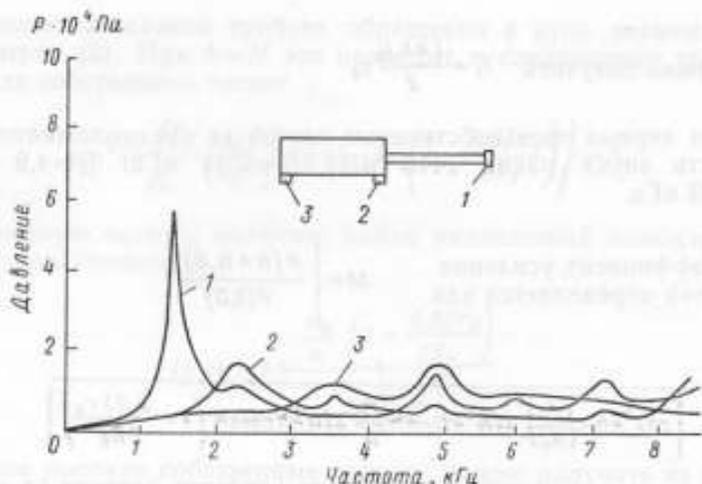


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики макета ступенчатого концентратора давления.
1, 2, 3 — измерительные преобразователи давления.

Коэффициент усиления концентратора $M \approx 10$, что значительно ниже максимального расчетного значения ($M \approx 60,8$). Однако выражение (8) не учитывает влияния диссипации и потери энергии в воздушных пузырьках.

Результаты выполненных исследований указывают на перспективность применения ступенчатых концентраторов в трубах-резонаторах, наполненных жидкостью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шумилин В. П., Авдеев Ф. Н. Устройство для определения динамических характеристик измерительных преобразователей давления. Авт. свид. № 509806, — «Бюлл. изобр.», 1976, № 13.
2. Авдеев Ф. Н., Шебалов А. Н., Шумилин В. П., Гутман Т. Л., Клещев А. А., Гораничева Т. С. Исследование установок для градуировки измерительных преобразователей давления. — Труды ЛКИ, вып. 109, 1976, с. 76—84.

Поступила в редакцию 12/1-1977 г.

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ
В ДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

Динамические измерения вследствие инерционных свойств измерительных приборов сопровождаются значительными погрешностями, точные значения которых во многих случаях неизвестны. Поэтому, чтобы судить о правильности результатов измерений, динамические погрешности средств измерений определяют приближенно. В статье предложены формулы, которые позволяют оценивать эти погрешности несколько точнее, чем по формулам работы [1].

Многие приборы для динамических измерений по принципу действия эквивалентны механической колебательной системе с одной степенью свободы. К ним относятся, например, осциллографы и различные преобразователи механических колебаний в электрические.

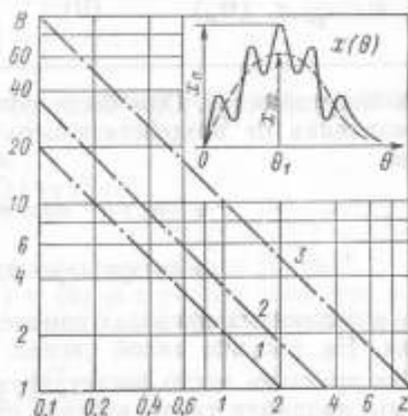
Колебательная система описывается дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами вида

$$\frac{dy}{d\theta^2} + 2z\varepsilon \frac{dy}{d\theta} + z^2 y = x(\theta), \quad (1)$$

где $\theta = t/t_n$ — нормированное относительно длительности воздействующего сигнала (см. рисунок) безразмерное время;

$x(\theta) = \ddot{f}(\theta)/m$ — воздействующее ускорение на единицу массы (ускорение);
 $z = \omega_0 t_n$ — нормированная (обобщенная) круговая частота собственных колебаний;

$\varepsilon = h/2m\omega_0$ — относительный, безразмерный коэффициент затухания, обусловленный коэффициентом силы трения h ;
 $y(\theta)$ — реакция колебательной системы (смещение инерционного элемента массой m).



Регистрируемые сигналы и графики, иллюстрирующие точности оценок динамических погрешностей по формулам (III) и (IV).

Решение уравнения (1) при нулевых начальных условиях имеет вид

$$y(\theta) = \frac{1}{z_1} e^{-z_1 \theta} \int_0^\theta x(\tau) e^{z_1 \tau} \sin z_1 (\theta - \tau) d\tau, \quad (2)$$

где $z_1 = z \sqrt{1 - \varepsilon^2}$, τ — параметр интегрирования.

Анализируя это решение, академик А. Н. Крылов в 1909 г. [1] вывел приближенные формулы (см. таблицу)*, которыми и в настоящее время широко пользуются для оценки динамиче-

Формулы А. Н. Крылова	Предложенные формулы
$\varepsilon \neq 0$	
$ x < \frac{\pi}{z^2} e^{-z \theta_1} f'(\theta_M) \quad (I)$	$ x < \frac{2,8 x_n}{z^2} [k_{HK} + \frac{1}{2}(1 - e^{-z \theta_1})] \quad (III)$
$\varepsilon = 0$	
$ x < \frac{\pi}{z^2} x'(\theta_M) \quad (II)$	$ x < \frac{2,8 x_n}{z^2} k_{HK} \quad (IV)$

ских погрешностей. Они были получены в предположении, что производная от воздействующего сигнала удовлетворяет условиям

$$\begin{aligned} x'(\theta) > 0 \quad \text{при } \theta = 0 - \theta_1, \\ x'(\theta) < 0 \quad \text{при } \theta > \theta_1, \end{aligned} \quad (3)$$

т. е. в указанных пределах изменений аргумента она не меняет знака. На рисунке такой сигнал отмечен пунктирной линией.

На практике часто регистрируют сигналы и более сложной формы, например такой, которая отмечена на рисунке сплошной линией. Иногда в подобных случаях также применяют формулы (I) и (II) [2], но оценка погрешностей, по сравнению со случаем, когда условия (3) выполняются, получается завышенной.

* Номера формул в таблице обозначены римскими цифрами.

Чтобы получить формулы для оценки погрешностей регистрации или преобразования сигналов произвольной формы, удовлетворяющих лишь условиям Дирихле, запишем решение (2) в таком виде

$$y(\theta) = \frac{1}{z_f^2} x(\theta) - \frac{1}{z_f^2} e^{-2z_f \theta} \left[\sin z_f \theta, \int_0^{\theta} f'(\tau) \sin z_f \tau d\tau + \right. \\ \left. + \cos z_f \theta, \int_0^{\theta} f'(\tau) \cos z_f \tau d\tau \right], \quad (4)$$

где

$$f(\tau) = x(\tau) e^{2z_f \tau} \quad (5)$$

Первое слагаемое в полученном решении в масштабе $1/z_f^2$, точно соответствует входному воздействию $x(\theta)$, а второе (в квадратных скобках) является погрешностью α , которую следует оценить.

Интегралы, входящие в выражение (4) (обозначим их I_1 и I_2), являются интегралами Стильеса, для которых существует оценка [3]

$$|I_1| = |I_2| \leq M\nu, \quad (6)$$

где M — максимальное значение функций \sin и \cos , входящих в подынтегральные выражения, а

$$\nu = \int_0^{\theta} |f'(\tau)| d\tau \quad (7)$$

— полная вариация функции $f(\tau)$ на отрезке $[0, \theta]$.*

На основе выражений (4) и (6) и с учетом того, что в рассматриваемом случае $M=1$, можно дать оценку погрешности

$$|\alpha| \leq \frac{\sqrt{2} \nu}{z_f^2} e^{-2z_f \theta}, \quad (8)$$

* Выбранный верхний предел интегрирования не ограничивает общности полученных далее результатов. Вариацию можно определять в пределах изменения аргумента от момента возникновения сигнала до любого другого значения, при котором требуется оценить погрешность.

При $\varepsilon=0$ формула (8) упрощается*

$$|\alpha| \leq \frac{\sqrt{2} V_0}{z^2} \quad (9)$$

Здесь

$$V_0 = \int_0^{\Theta_1} |x'(\tau)| d\tau \quad (10)$$

— полная вариация входного воздействия $x(\Theta)$ на отрезке $[0, \Theta_1]$.

Оценка погрешностей по формулам (11) и (9) проще, чем по формулам (1) и (8), когда $\varepsilon \neq 0$. При вычислении с помощью формулы (1) возникает затруднение при определении максимума производной функции $f(\tau)$, так как для этого требуется найти соответствующее значение аргумента Θ_m , а при сложной функции $x(\Theta)$ эта задача часто сводится к решению трансцендентного уравнения, что неудобно.

При использовании формулы (8) трудности возникают при определении вариации функции $f(\tau)$, так как последняя равна произведению двух функций [см. формулу (5)] и ее вариация (7) не может быть выражена только через заданное входное воздействие $x(\Theta)$ и его параметры. Однако можно воспользоваться приближенным соотношением, которое в принятых обозначениях имеет вид

$$V \leq x_n V_e + r V_0 \quad (11)$$

где V_e — вариация функции $\exp(z\varepsilon\tau)$ на отрезке $[0, \Theta_1]$, $x_n = \sup |x(\tau)|$ — пиковое значение функции $x(\Theta)$ и $r = \sup |\exp(z\varepsilon\tau)|$ — пиковое значение функции $\exp(z\varepsilon\tau)$ при $\tau \in [0, \Theta_1]$.

Выполнив согласно (11) все действия, находим

$$V \leq (V_0 + x_n) e^{z\varepsilon\Theta_1} - x_n$$

Подставляя этот результат в (8), окончательно получаем

$$|\alpha| \leq \frac{\sqrt{2}}{z^2} \left[V_0 + x_n (1 - e^{-z\varepsilon\Theta_1}) \right] \quad (12)$$

* Формулы (8), (9) справедливы для сигналов произвольной формы. Для импульсов без наложенных колебаний в работе [4] получены точные формулы.

В выражение (12), так же как и в формулу (9), входит полная вариация V_0 входного воздействия $x(\theta)$ в пределах длительности фронта $[0, \theta_1]^*$. Ее принято определять в относительной форме как $k_{\text{ин}} = V_0/2x_n$ [6]. С учетом этого формулы для оценки погрешности α приведены в таблице и обозначены (III) и (IV).

Определять погрешности по этим формулам проще, чем по (I) и (II), так как параметры функции $x(\theta)$, входящие в (III), (IV), обычно измеряются или легко определяются по осциллограмме [4], а максимальную крутизну, входящую в (I) и (II), находить сложнее. Определение параметров x_n и θ_1 дано на рисунке. Вариация V_0 , через которую выражается параметр $k_{\text{ин}}$, равна сумме абсолютных приращений между соседними экстремальными точками кривой $x(\theta)$ в порядке следования слева направо до $\theta = \theta_1$ (см. рисунок), т. е.

$$V_0 = \sum_{i=0}^n |x_{i+1} - x_i|$$

Рассмотрим примеры, поясняющие применение формул (III) и (IV). Оценим погрешности пьезоэлектрического датчика, преобразующего импульсные ударные ускорения в электрический сигнал. Ускорения задаются следующими выражениями [5]:

для симметричного треугольного импульса

$$x_1(\theta) = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 > \theta > 1 \\ 2x_n\theta & \text{при } 0 \leq \theta \leq 0,5 \\ 2x_n(1-\theta) & \text{при } 0,5 \leq \theta \leq 1 \end{cases}$$

для полусинусоидального импульса

$$x_2(\theta) = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 > \theta > 1 \\ x_n \sin \pi\theta & \text{при } 0 \leq \theta \leq 1 \end{cases} \quad (13)$$

для пилообразного импульса

$$x_3(\theta) = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 > \theta > 1 \\ \frac{10}{9}x_n\theta & \text{при } 0 \leq \theta \leq 0,9 \\ 10x_n(1-\theta) & \text{при } 0,9 \leq \theta \leq 1 \end{cases}$$

* Определение длительности фронта сигналов см. в ГОСТ 8.127-74.

Пьезоэлектрические измерительные преобразователи характеризуются малым коэффициентом затухания, т. е. можно положить, что $\varepsilon \approx 0$. Поэтому воспользуемся формулами (II) и (IV). Для приведенных трех сигналов по формуле (II) получаем

$$|\alpha_1| < 2\pi x_n / z^2; \quad |\alpha_2| < \pi^2 x_n / z^2; \quad |\alpha_3| < 10\pi x_n / z^2$$

Заметим, что у трапецидального импульса [5] крутизна фронта и спада равна крутизне спада пилообразного импульса. Поэтому, обозначив погрешность преобразования трапецидального импульса как $|\alpha_1|$, запишем $|\alpha_1| = |\alpha_3|$.

Оценка погрешности по формуле (IV) зависит от параметра $k_{\text{нпк}}$. Будем рассматривать вариацию заданных сигналов в пределах относительной длительности $\theta_n = 1$. При этом $V_0 = 2x_n$ и $k_{\text{нпк}} = 1$. С учетом этого по формуле (IV) $|\alpha| \leq 2,8 x_n / z^2$.

Составим отношения оценок $|\alpha_1|$, $|\alpha_2|$ и $|\alpha_3|$

$$\text{к оценке } |\alpha|: \beta_1 = |\alpha_1 / \alpha_2| = 2\pi / 2,8z \approx 2/z.$$

$$\beta_2 = \pi^2 / 2,8z = 3,5/z. \quad \beta_3 = \beta_4 = 10\pi / 2,8z \approx 10/z$$

Отсюда следует, что оценка погрешности по формуле (IV) оказывается точнее, чем по формуле (II).

Зависимости отношений B_1 , B_2 и B_3 от частоты показаны штрих-пунктирными линиями на рисунке. Как видно, улучшение оценок погрешностей лежит в пределах 20—100. Выигрыш обусловлен тем, что в формулу (IV) частота z входит во второй степени, а в (II) — в третьей (это оказывает существенное влияние при $z < 1$) и тем, что для вариации справедливо соотношение

$$v_0 \leq x'(\theta_m) \theta_u. \quad (14)$$

где θ_n — нормированная длительность сигнала, равная единице.

Рассмотрим случай, когда условия (3) не выполняются. Пусть входное воздействие имеет вид

$$x_S(\theta) = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 > \theta > 1, \\ x_{n0} \sin \pi \theta + x_m \sin 2\pi \theta & \text{при } 0 \leq \theta \leq 1. \end{cases}$$

где x_m — амплитуда колебаний, наложенных на полусинусоидальный импульс (13), а n — число периодов этих колебаний. Этот сигнал аналогичен изображенному на рисунке сплошной линией, но во времени ограничен длительностью $\Theta_n=1$.

При $n=2m+0,5$ (где $m=1,2,\dots$) и $n>5$ параметр $k_{\text{ин}}$ с большой точностью определяется по выражению [6]: $k_{\text{ин}}=2nk(1+k)$, в котором $k=x_m/x_{\text{во}}$ — относительная амплитуда наложенных колебаний. Определяя с учетом этого $|\alpha_5|$ по формуле (II) и $|\alpha'_5|$ по формуле (IV), находим:

$$\beta_5 = \left| \frac{\alpha_5}{\alpha'_5} \right| = \frac{3,5}{z} \left(1 + \frac{1}{2nk} \right)$$

Из этого выражения следует, что при фиксированном значении z с увеличением произведения nk , т. е. с увеличением V_0 отношение B_5 стремится к постоянному значению $3,5/z$. Это объясняется тем, что с ростом V_0 увеличивается максимальное значение производной $x'(\Theta_n)$, а соотношение (14) остается неизменным.

Таким образом, выведенные формулы позволяют точнее оценивать динамические погрешности средств измерений при выполнении условий (3) и, кроме того, они применимы при произвольных входных воздействиях.

Рассмотрение формул (III), (IV) позволяет прийти к выводу, что при известных z и ϵ экспериментальное определение погрешности сводится к измерению параметров сигнала $x_{\text{п}}$, t_1 , $k_{\text{ин}}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крылов А. Н. Некоторые замечания о крешерах и индикаторах. Собр. соч., т. IV, М.-Л., Изд. АН СССР, 1937, 443 с. с ил.
2. Иорин Ю. М. Виброметрия. М., Машгиз, 1963, 756 с.
3. Фихтенгольц Г. М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. «Наука», т. III, 1966, 656 с.
4. Пеллинец В. С. Измерение ударных ускорений. М., Изд-во стандартов, 1975, 287 с.
5. Рекомендация МЭК. Публикация 68-2-27. Основные методы испытаний электронной аппаратуры и ее элементов на воздействие внешних факторов. Женева, 1967.
6. Тарасов Г. А. Аналитическое определение и измерение коэффициента наложенных колебаний импульсов ударного ускорения — «Метрология», 1973, № 12, с. 12—17.

ПРИБЛИЖЕННОЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ РЕШЕНИЕ
ЗАДАЧИ СТОКСА

Для определения гидрологических параметров (давления, температуры и солености воды) путем вертикального зондирования морских глубин и океанов за последние годы стали применяться измерительные приборы одноразового действия. Используемые конструкции зондов представляют собой сигарообразное тело с хвостовым оперением, в носовой части которых монтируется измерительный прибор. Внутри сигары находится шуля с микрокабелем для передачи измерительной информации на борт судна или летательного аппарата. После окончания процесса измерений зонд обрывается и остается на дне моря.

Глубина зондирования x определяется по времени τ погружения зонда; в этом случае теоретическая зависимость $x(\tau)$ является частным случаем решения задачи Стокса. Существующие методы расчета $x(\tau)$ не могут обеспечить высокую точность определения глубины погружения зонда из-за трудно поддающихся учету ряда явлений, вызванных турбулентностью потока, изменением механического сопротивления микрокабеля в процессе его размотки, изменением массы и положения центра тяжести системы, а также изменчивостью физико-химических свойств водного пространства. В то же время и экспериментальное определение $x(\tau)$ будет справедливо только для строго определенной области водного пространства и не может быть распространено на другие районы температурного зондирования морских глубин из-за различия и непостоянства их гидравлических свойств. Значительные погрешности в определении глубины погружения зонда возникают в верхних слоях водного пространства, где проявляется влияние условий приводнения зонда (направление его движения и скорость приводнения).

В настоящее время погрешность определения глубины зондирования* находится в пределах 2—5%. Поэтому для практических целей нет необходимости пользоваться точными и сложными формулами расчета $x(\tau)$. Можно ограничиться приближенной оценкой глубины зондирования.

* Бродский А. Д., Кофман Л. Ю. Вертикальный температурный разрез в океане при помощи двухпроводной линии, — «Метрология», 1976, № 8, с. 16—24.

Для приближенного определения $x(\tau)$ рассмотрим «идеализированное» уравнение движения зонда. Введем следующие обозначения: x — координата глубины; m — масса зонда; F_c — сила полного сопротивления движению тела; μ — коэффициент сопротивления; F_a — сила Архимеда; V — вытесняемый телом объем жидкости; g — ускорение свободного падения; v — скорость движения тела; $\rho_{ж}$ — плотность жидкости.

Дифференциальное уравнение движения тела имеет вид:

$$m \dot{x} = mg - f_a - f_c. \quad (1)$$

где $F_c = \mu v^2 = \mu x^2.$

Тогда $F_a' = \rho_{ж} V g.$

$$\frac{m}{\mu} \ddot{x} = v_c^2 - \dot{x}^2, \quad (2)$$

где $v_c = \sqrt{\frac{mg - f_a}{\mu}}$ — скорость установившегося движения.

Из уравнения (2) при начальных условиях $x|_{\tau=0} = v_0$; $\dot{x}|_{\tau=0} = 0$ получим выражение для определения глубины погружения зонда $x(\tau)$:

$$x = v_c \left[2A \ln \frac{e^{\tau/A} - \delta}{1 - \delta} - \tau \right], \quad (3)$$

где $A = \frac{m}{2\mu v_c}$; $\delta = \frac{v_0 - v_c}{v_0 + v_c}$

Как видно, глубина погружения x состоит из двух слагаемых: одного, соответствующего равномерному погружению термозонда, равному $v_c \tau$, и второго слагаемого, являющегося некоторой добавкой к глубине погружения, зависящей от начальной скорости приведения зонда.

При $e^{\tau/A} \gg \delta$ приближенное решение уравнения (3) примет вид

$$x \approx v_c \tau - 2A v_c \ln(1 - \delta) \quad (4)$$

Подставив значения A и δ , находим

$$x = v_0 \tau - \frac{m}{\mu} \ln \frac{2}{\frac{v_0}{v_c} + 1} \quad (5)$$

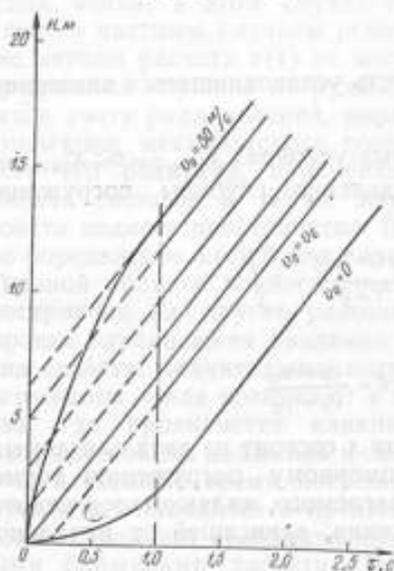
Для практических расчетов глубины погружения зонда достаточно знать только значение v_0 . Остальные величины являются постоянными для данной конструкции зонда. Тогда приближенное решение $x(\tau)$ приводится к удобному для расчета виду:

$$x \approx v_0 \tau + b \quad (6)$$

где

$$b = \frac{m}{\mu} \ln \frac{2}{\frac{v_0}{v_c} + 1}$$

На рисунке представлены кривые зависимости $x(\tau)$, рассчитанные по формуле (3) для зонда с $v_0 = 7$ м/с. При $\tau > 1,5$ с и $0 \leq v_0 \leq 30$ м/с зависимость $x(\tau)$ совпадает с приближенным ее решением по формуле (6). Погрешность расчета по формуле (3) не превышает 5%, а при возрастании τ эта погрешность уменьшается и стремится к нулю.



Кривые зависимости $x(\tau)$.

Установлено, что скорость приведения зонда сильно влияет не только на определение $x(\tau)$ в поверхностном слое, но и на определение глубины в течение больших промежутков времени.

Однако до настоящего времени вопросу больших скоростей приведения не уделялось должного внимания. Как видно из формулы (6), основной составляющей систематической погрешности определения глубины погружения зонда является погрешность в определении скорости его приведения. При сбрасывании зондов с летательных аппаратов при $0 \leq v_0 \leq 30$ м/с погрешность в определении глу-

бины погружения зонда может достигать 12 м. В связи с этим пренебрегать зоной неустановившегося движения зонда не рекомендуется.

Для исключения систематической погрешности, обусловленной скоростью приведения и зоной неустановившегося движения, следует воспользоваться выражением (6).

Покажем на примере, как следует пользоваться приближенной формулой (6) для определения $x(\tau)$, зная начальную скорость приведения зонда. В процессе эксперимента момент приведения фиксируется на диаграммной ленте самописца. Распределение измеряемой величины a (давления, температуры или солености) по глубине зондирования получают путем наложения на диаграмму специального планшета, представляющего собой прямоугольную, по возможности тонкую пластину, изготовленную из прозрачного материала. Вдоль одной из сторон пластины нанесена шкала, соответствующая значениям измеряемой величины, перпендикулярно к ней расположена линейная шкала, служащая для отсчета глубины погружения зонда. Цена деления на планшете должна быть связана с ценой деления временной шкалы диаграммы таким образом, чтобы глубине x соответствовало значение $\frac{v_l}{v_c} x$ линейной шкалы, v_l — скорость протяжки диаграммной ленты, мм/с.

1. Пусть скорость приведения зонда равна скорости установившегося движения ($v_0 = v_c$), т. е. имеет место равномерное погружение. Тогда, совместив начало отсчета линейной шкалы с нулевым уровнем диаграммы x_0 , получим картину распределения измеряемой величины по глубине зондирования.

2. Если $v_0 \neq v_c$, $\left[\begin{array}{l} b > 0 \text{ при } v_0 < v_c \\ b < 0 \text{ при } v_0 > v_c \end{array} \right]$,

то используя для расчета глубин x приближенную формулу (6), для одних и тех же моментов времени τ соответствующие глубины будут отличаться от глубины равномерного погружения на $\pm b$ (знак «+» соответствует $v_0 > v_c$; «-» — $v_0 < v_c$). Для получения наглядной зависимости $a(x)$ начало отсчета линейной шкалы планшета должно быть сдвинуто относительно нулевого уровня диаграммы на величину b , либо вверх ($v_0 > v_c$) либо вниз ($v_0 < v_c$).

Рекомендуемая конструкция планшета позволяет сократить время определения глубины зондирования. С целью повышения точности для нахождения зависимости $x(\tau)$ путем расчета ее по приближенной формуле (6) следует скорость установившегося движения v_c определять экспериментально на различных участках глубины погружения зонда.

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ СДВИГА ФАЗЫ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ФАЗО-ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ НА ДВОЙНОЙ ЦЕНТРИФУГЕ

Известно, что динамические свойства низкочастотных линейных акселерометров оценивают обычно по совокупности амплитудно- и фазо-частотной характеристик (АЧХ и ФЧХ). За последние годы для исследования АЧХ все шире используют ротационные установки типа двойных центрифуг с поступательным абсолютным движением или с независимым приводом поворотного стола (например [1, 2]). Однако до настоящего времени эти установки не нашли широкого применения для исследования ФЧХ акселерометров.

В соответствии с ГОСТ 18955-73 ФЧХ называют зависимость сдвига фазы Θ между выходным сигналом акселерометра $U(t)$ и задаваемым гармоническим ускорением $a(t)$ от частоты F ускорения. На двойной центрифуге с поступательным движением стола [1] измерение сдвига фазы сигнала $U(t)$ производилось относительно базового импульса с выхода преобразователя числа оборотов ротора. В установках с независимым приводом ориентация стола в его абсолютном движении может изменяться. При этом связь между базовым импульсом и положением стола оказывается неоднозначной, что исключает использование этого метода измерения угла Θ .

Во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева разработана измерительная система, которую можно использовать в обеих разновидностях двойных центрифуг. Она обеспечивает определение сдвига фазы двумя способами — путем прямых измерений угла Θ [3] и преобразованием измеряемого угла во временной интервал T с последующим измерением этого интервала. В обоих случаях угол Θ определяется между нулевыми значениями ускорения $a(t)$ и сигнала $U(t)$.

Измерительная система (рис. 1) включает в себя счетчик 1, частотомер 2, формирователь 3 и два магнитных преобразователя угла поворота поворотного стола. Счетчик и частотомер используются для прямых измерений угла Θ и интервала T . К управляющим входам счетчика и частотомера подключены выходы исследуемого акселерометра 4 (через формирователь 3) и считывающего устройства 6 одного из преобразователей

угла, счетный вход счетчика соединен с выходом считывающего устройства 5 другого преобразователя. Считывающие устройства 5 и 6 установлены на роторе 10 двойной центрифуги. Шкалы

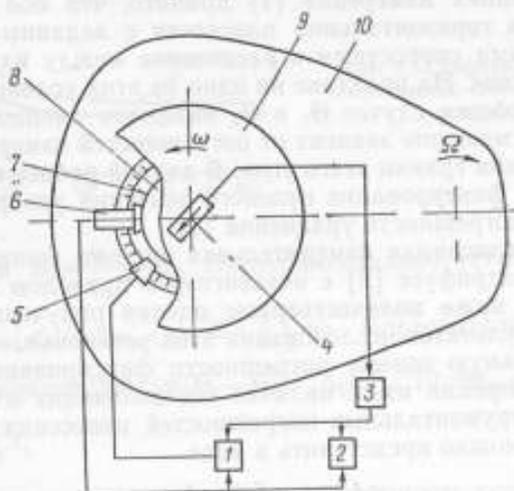


Рис. 1. Схема системы измерения сдвига фазы.

преобразователей выполнены на двухдорожечном магнитном барабане 8, жестко связанном с поворотным столом 9. На одну из дорожек нанесена магнитная метка 7. На другую — n магнитных меток, постоянный угловой интервал между которыми

$$\varphi_0 = \frac{2\pi}{n}$$

При вращении платформ двойной центрифуги метка 7 проходит мимо считывающего устройства 6 при нулевом значении ускорения $a(t)$. Сформированный в этот момент старт-импульс включает счетчик и частотомер. Счетчик подсчитывает импульсы со считывающего устройства 5 до прихода с формирователя 3 стоп-импульса, сформированного при прохождении через нуль сигнала $U(t)$. Частотомер измеряет промежуток времени между старт- и стоп-импульсами.

Оценки сдвига фазы θ_1 и θ_2 , полученные при многократных измерениях T и Θ , можно представить в таком виде

$$\theta_1 = \frac{\omega_0}{N} \sum_{i=1}^N \tau_i \quad \text{и} \quad \theta_2 = \frac{\varphi_0}{N} \sum_{i=1}^N m_i \quad (1)$$

где ω_0 — заданное значение относительной угловой скорости

стола; T_i — интервал времени между старт- и стоп-импульсами при i -м наблюдении; N — число наблюдений; m_i — количество импульсов, подсчитанное счетчиком при i -м наблюдении.

В уравнениях измерения (1) принято, что обе платформы вращаются в горизонтальной плоскости с заданными постоянными угловыми скоростями и расстояние между их осями вращения $R_0 = \text{const}$. На практике ни одно из этих условий не выполняется, и в общем случае Θ_1 и Θ_2 являются смещенными оценками Θ . Их смещение зависит от погрешностей измерения угла Θ и фиксирования границ этого угла. В данной работе исследуются погрешности фиксирования нулевого значения ускорения и специфические погрешности уравнений (1).

Впервые описанная измерительная система была применена в двойной центрифуге [2] с независимым приводом стола, и все приведенные ниже количественные оценки получены с использованием результатов исследования этой установки.

Максимальную оценку погрешности фиксирования нулевого значения ускорения из-за наличия составляющих $a(t)$ с частотой F и инструментальных погрешностей нанесения и считывания метки 7 можно представить в виде

$$\Delta\theta_0 = \sum_i \Delta\theta_{0i} = \frac{g\Delta\beta^2}{a_0} + \frac{\Delta\dot{R}_2}{2a_0} + \frac{\Delta\omega_2}{4\omega_0} + \Delta\theta_{04} + \theta_{05}. \quad (2)$$

где g — ускорение свободного падения; a_0 — заданное значение амплитуды ускорения; $\Delta\beta$ — угол перекося осей вращения ротора и стола; $\Delta\dot{R}_2$ — амплитуда второй производной второй гармоники периодического колебания стола в своей опоре; $\Delta\omega_2$ — амплитуда второй гармоники периодического колебания угловой скорости стола; $\Delta\theta_{04}$ — смещение старт-импульса вследствие неточной ориентации стола при нанесении метки 7; $\Delta\theta_{05}$ — смещение старт-импульса из-за протяженности метки 7 вдоль окружности барабана 8.

В экспериментах получено: $\Delta\beta < 6 \cdot 10^{-4}$ рад; $\Delta\omega_2 < 6 \cdot 10^{-4} \omega_0$; $\Delta\dot{R}_2$ не превышает $4,3 \cdot 10^{-3}$ и $2,2 \cdot 10^{-2}$ м/с² при частотах ускорения 15 и 30 Гц; в области $F \leq 15$ Гц $\Delta\theta_{05} \approx (1 + 0,25F)$ угл. мин., а при $F > 15$ Гц $\Delta\theta_{05} \approx 4,75'$. Расчетная оценка $\Delta\theta_{04} < 1'$.

Из графиков $\Delta\theta_0 = (a_0)$ (рис. 2) видно, что во всем диапазоне ускорений $\Delta\theta_0 < 12'$. Отметим, что в (2) учтены только составляющие $\Delta\theta_{0i} > 10''$. Сумма остальных слагаемых не превышает $50''$.

Анализируя точность приближенных уравнений измерения (1), погрешностями фиксирования границ измеряемого угла пренебрегаем. В общем случае действительное значение угло-

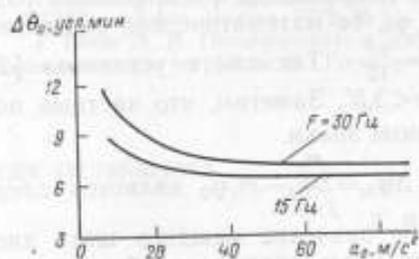


Рис. 2. Графики зависимости погрешности $\Delta\theta_2$ от амплитуды ускорения a_0 .

вой скорости $\omega_1 = \frac{\theta_1}{T_1} \neq \omega_0$. Экспериментально установлено, что

$|\Delta\omega| = |\bar{\omega} - \omega_0| < 10^{-3}\omega_0$, где $\bar{\omega} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \omega_i$. Следовательно, систематическое смещение $|\Delta\theta_{1c}| = |\theta_1 - \theta| \approx |\Delta\omega| \bar{T} \leq 10^{-3}\theta_1$, где

$$\bar{T} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i$$

Из (1) следует, что случайная погрешность определения θ_1 является функцией случайных колебаний угловой скорости стола и погрешностей измерения интервала T . Как показали исследования, оценка среднего квадратического отклонения результата наблюдения при измерении угловой скорости $S_{\omega} < 6 \cdot 10^{-4} \omega_0$. Составляющие оценки дисперсии сдвига фазы $S_{\theta_1}^2$ из-за погрешностей измерения T пренебрежимо малы, и поэтому $S_{\theta_1} \approx S_{\omega} \bar{T} < 6 \cdot 10^{-4} \theta_1$.

Таким образом, погрешности определения сдвига фазы преобразованием угла θ во временной интервал зависят, в основном, от нестабильности угловой скорости стола.

Систематическое смещение $\Delta\theta_{2c}$ оценки θ_2 представим в виде $\Delta\theta_{2c} \approx \sum_{i=1}^3 \Delta\varphi_i$, где $\Delta\varphi_1 = \varphi_0 - \varphi'$, $\varphi' < \varphi_0$ — угол между стартовым импульсом и первым из последовательности заполняющих импульсов; $\Delta\varphi_2$ — среднее значение случайной погрешности измерения сдвига фазы; $\Delta\varphi_3$ — накопленная погрешность преобразователя угла поворота стола.

Эксперименты показали, что в области $F \leq 15$ Гц зависимость $\Delta\varphi_1$ от F аппроксимируется линейной функцией $\Delta\varphi_1 \approx (0,25 + 0,25F)$ угл. мин., а при $F > 15$ Гц $\Delta\varphi_1 \approx 4'$.

Случайная погрешность измерения угла θ обусловлена несовпадением стоп-импульса и последнего из заполняющих им-

пульсов. Как известно [4], эта погрешность распределена равномерно в интервале от 0 до φ_0 , ее математическое ожидание $m_{\Delta\varphi_2} = 0,5 \varphi_0$, а дисперсия $\sigma^2 = \frac{\varphi_0^2}{12}$. Так как в установке [2] угол $\varphi_0 = 12'$, то $m_{\Delta\varphi_2} = 6'$ и $\sigma < 3,5'$. Заметим, что частные погрешности $\Delta\varphi_1$ и $\Delta\varphi_2$ имеют разные знаки.

Накопленная погрешность $\Delta\varphi_{\text{эл}} = \sum_{j=1}^m \varphi_j - m_1 \varphi_0$ является следствием того, что действительное значение каждого шага дискретности $\varphi_j \neq \varphi_0$. В результате исследования преобразователя угла поворота стола установлено, что при повороте стола на любой угол φ погрешность $|\Delta\varphi_3| \leq 30''$, а при $\varphi < 10^\circ$ она не превышает $10''$.

Таким образом, максимальная погрешность измерений сдвига фазы — систематическое смещение оценки Θ_2 не превышает $12'$. Случайная погрешность измерения Θ_2 характеризуется оценкой среднего квадратического отклонения $S_{\Theta_2} \approx \sigma$. Очевидно, что с уменьшением шага дискретности φ_0 повышается точность измерений Θ .

Как показали исследования, по точности измерения сдвига фазы оба способа отвечают современным требованиям. В случае малой нестабильности угловой скорости предпочтительно преобразование измеряемого сдвига фазы во временной интервал. В то же время при прямых измерениях угла Θ к точности стабилизации угловой скорости не предъявляются жестких требований, что позволяет применять этот способ, например, в образцовых двойных центрифугах второго разряда.

В заключение следует отметить, что вместо магнитных преобразователей в описанной выше системе измерения сдвига фазы могут использоваться дискретные преобразователи угла поворота любого другого типа. Кроме того, при определенной ориентации измерительной оси акселерометра относительно метки 7 и использовании соответствующего формирователя стоп-импульса эта система может применяться и для измерения сдвига фазы между экстремальными значениями ускорения и выходного сигнала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Smith R. O., Willis E. A., Hilten J. S. A dual centrifuge for generating low-frequency sinusoidal accelerations. — «J. Res. Nat. Bur. Standards», 1962, с. 66, № 4, pp. 362—372 il.
2. Блантер Б. Э., Синельников А. Е. Комплекс образцовых средств для воспроизведения постоянных и низкочастотных линейных ускорений. В сб.: «Опыт измерения параметров вибраций». Л., Изд. ЛДНТП, 1973, с. 3—6.

3. Блантер Б. Э. и др. Центрифуга для поверки акселерометров. Авт. свид. № 355570 — «Бюлл. изобр.», 1972, № 31.

4. Гитис Э. И. Преобразователи информации для электронных цифровых вычислительных устройств. М., Госэмергонздат, 1961, 376 с. с ил.

Поступила в редакцию 12/1-1977 г.

УДК 531.787.53.088.3

Т. В. БЕРСЕНЕВА, Р. М. ДОЛГИХ,
Л. В. НАЛБАНДОВ, А. С. РОМАШЕНКО
ВНИИМ

О ВОЗМОЖНОСТИ ТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДАВЛЕНИЙ В ЖИДКОСТЯХ С ПОМОЩЬЮ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА

Для повышения точности и обеспечения единства этих измерений большое значение имеет поиск и разработка безынерционных методов измерений постоянных и переменных давлений в жидкостях.

Как показывает анализ, весьма перспективными в этом отношении являются оптические методы [1, 2]. Используя зависимость показателя преломления жидкости от давления [3], измерение последнего можно свести к определению измерения показателя преломления.

Среди различных методов измерения показателя преломления наибольшей чувствительностью обладают интерференционные методы, однако их точность ограничена возможностью регистрации дробной доли полосы. Лучшие фотоприемные устройства имеют погрешность регистрации дробной части 0,01—0,05 полосы [4], т. е. порог чувствительности такого устройства весьма высок. Переход от линейных измерений разности хода к угловым измерениям разности фаз между компонентами, определяющими эллиптическое колебание результирующего вектора световой волны, позволяет повысить точность измерений на 2—3 порядка. Поэтому для получения более точных измерений давлений в жидкостях рекомендуется интерференционно-поляризационный метод.

Установка для измерения давления этим методом может быть построена на базе интерферометра ИТ-105 по схеме Маха-Цендера. Принцип действия оптической схемы этой установки (см. рис. 1) состоит в следующем.

Поток излучения от источника 5 проходит поляризатор 4 и светоделительной пластиной 3 делится на два потока, которые после отражения от зеркал 7 и 1 сводятся светоделительной

пластиной 9. Ортогональность взаимодействующих световых потоков достигается введением в одно из плеч интерферометра элемента 6, поворачивающего плоскость колебаний электрического вектора световой волны на 90° . Элемент 11 в другом плече

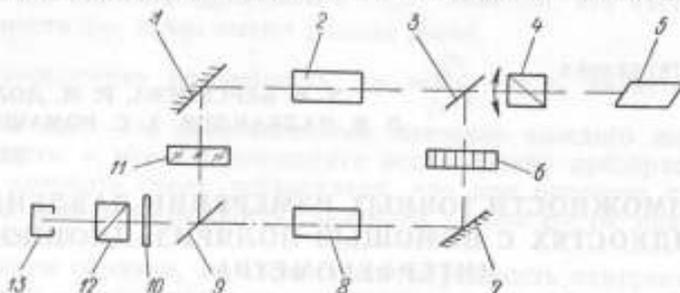


Рис. 1. Оптическая схема интерферометра.

интерферометра служит для компенсации, возникающей вследствие введения элемента 6 разности хода. В плечи интерферометра вводятся также образцовая и рабочая камеры 2 и 8 с жидкостью. В качестве жидкости для заполнения камер предполагается использовать спирт или ацетон — вещества, обладающие наибольшей чувствительностью показателя преломления к изменению давления

$\left(\frac{\partial n}{\partial p} = 4 \cdot 10^{-10} \frac{1}{\text{Па}} \right)$ За светодели-

тельной пластиной 9 установлена фазовая пластинка $\lambda/4$ и анализатор 12; после анализатора поток излучения попадает на фотоэлектронный умножитель 13.

Анализ эллиптически поляризованного света осуществляется по методу Сенармона. При равенстве давлений в камерах оптические пути, проходящие светом в плечах интерферометра, равны, поэтому результирующий поток излучения будет линейно поляризован. Через фазосдвигающую пластинку, одна из осей которой расположена вдоль направления плоскости колебаний электрического вектора результирующего потока излучения, световой поток пройдет без изменений. При установке анализатора в скрещенное положение с поляризатором результирующий поток пропускаться не будет, и ФЭУ регистрирует минимум сигнала. Если давление в рабочей камере изменится на ΔP , то показатель преломления жидкости в этой камере изменится на Δn ; к месту объединения световые потоки придут сдвинутыми по фазе на δ . В результате после сведения световых потоков свето-

делительной пластиной 9 получим эллиптически поляризованное колебание. Пройдя ориентированную соответствующим образом фазовую пластинку $\lambda/4$ результирующий поток будет линейно поляризован. При этом плоскость его колебаний будет повернута на некоторый угол β относительно начального положения плоскости колебаний, соответствующего равенству давлений в камерах.

Угол β связан с разностью фаз теоремой Сенармона $\delta=2\beta$ и определяется поворотом анализатора в положение, при котором освещенность ФЭУ вновь будет минимальной.

Определяя Δn из соотношения $\frac{\Delta n}{\lambda} = \frac{\beta}{2\pi}$ и учитывая, что $\delta=2\beta$, получим изменение давления

$$\Delta p = \frac{\lambda}{\pi l} \frac{1}{\frac{\partial n}{\partial p}} \beta. \quad (1)$$

Элементом, поворачивающим плоскость колебаний электрического вектора световой волны в одном из плеч интерферометра, может служить кварцевая пластинка, вырезанная перпендикулярно оптической оси, или соответствующим образом ориентированная полуволновая пластинка.

Для повышения чувствительности данного метода измерения постоянных и переменных давлений можно применить модуляцию потока излучения. Это позволяет вести регистрацию угла β по исчезновению первой гармоники электрического сигнала на выходе ФЭУ; при этом исчезновение первой гармоники может быть зарегистрировано по осциллографу при наблюдении момента удвоения частоты электрического сигнала.

Минимально обнаружимое отклонение анализатора от скрещенного положения с поляризатором определяет пороговую чувствительность метода [5]

$$\beta_{min} = \sqrt{\frac{e \Delta f m \left(\frac{2k}{\alpha_0} + 1 \right)}{2 \Phi_0 S_{\lambda} (m-1)}}. \quad (2)$$

где e — заряд электрона; Δf — полоса пропускания узкополосного усилителя; m — число каскадов усиления сигнала в фотоприемнике; k — коэффициент пропускания при скрещенном положении поляризатора и анализатора; α_0 — амплитуда колебаний плоскости поляризации; Φ_0 — световой поток, выходящий из поляризатора; S_{λ} — спектральная чувствительность катода ФЭУ.

Полагая $\Delta f = 1$ Гц, $\Phi_0 S_\lambda = 10^{-10}$ А, $k = 5 \cdot 10^{-5}$; $\alpha_0 = 0,03$ рад, получим $\beta_{\min} \approx 0,1'$. В соответствии с выражением $\Delta n = \frac{1}{\pi l} \beta$ при длине камеры $l = 6$ см и $\lambda = 632,8$ нм разность показателей преломления жидкости в образцовой и рабочей камерах составит порядка $2 \cdot 10^{-12}$ единиц показателя преломления.

Считая параметры установки по характеристикам давления, камер, электронных устройств и температурным условиям идеализированными, пороговая чувствительность метода при заполнении камер ацетоном, рассчитанная по формуле (2), составит $\Delta P_{\min} = 5 \cdot 10^{-3}$ Па. Очевидно, реальные значения перечисленных характеристик значительно ухудшат чувствительность метода.

Ожидаемая средняя квадратическая погрешность измерения постоянных и переменных давлений, согласно [3], определяется средней квадратической погрешностью измерения показателя преломления жидкости, которая с учетом $\Delta n = \frac{1}{\pi l} \beta$ будет иметь вид

$$\delta(\Delta n) = \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta n}{\partial \beta} \delta \beta\right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta n}{\partial l} \delta l\right)^2}, \quad (3)$$

где $\delta \beta$ и δl — частные погрешности измерения угла поворота плоскости колебаний электрического вектора световой волны и длины камеры.

Ошибка $\delta \beta$ складывается из погрешности фоторегистрирующего устройства, определяемой формулой (2), и погрешности изготовления и установки фазовой пластинки. К ним следует отнести наклоны пластины к падающему пучку, погрешность ориентации главных направлений пластинки, «эффективный дихроизм» и отступление вводимой пластинкой разности фаз от 90° .

Влияние погрешности, вызванной наклоном пластинки $\lambda/4$ к падающему пучку, может быть определено по формуле [6]:

$$\delta \varphi = \frac{2\pi d}{\lambda} (n_o - n_e) \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right); \quad (4)$$

где θ — угол наклона пластинки; d — толщина пластинки; n_o и n_e — показатели преломления для обыкновенного и необыкновенного лучей; $\delta \varphi$ — отклонение от 90° вводимой пластинкой разности фаз.

Оценка этой погрешности для кварцевой пластинки $\lambda/4$ толщиной порядка 1 мм, установленной с отклонением от перпендикулярности $10'$, дает $\delta \varphi \approx 1,5'$.

Ориентация пластинки $\lambda/4$ не внесет заметной ошибки в угол поворота анализатора из-за высокой чувствительности [см. формулу (2)] метода индикации, используемого для установки этой пластинки.

Погрешность измерения разности фаз, вызванную многократным отражением света в пластине, можно свести к минимуму путем помещения ее в иммерсионную среду [7].

Погрешность, образующаяся в результате отступления от 90° вводимой пластинкой разности фаз, согласно [8], может быть рассчитана по формуле

$$2\varepsilon \cdot \frac{\alpha^2}{4} \sin 2\delta \quad (4)$$

где α — отступление вводимой пластинкой разности фаз от 90° .

При погрешности отбора пластинки $\lambda/4$ 3° максимальное значение погрешности ε_{\max} (при $\sigma = 45^\circ$), рассчитанное по формуле (5), составит около $2'$.

При определении $\delta\beta$ следует учитывать только погрешность, вызванную отступлением от 90° вводимой пластиной разности фаз, так как влияние остальных факторов может быть снижено до пренебрежимо малой величины.

Полагая $\delta\beta = 2'$; $\delta l = 0,1 \mu$; $\Delta n = 4 \cdot 10^{-6}$ единиц показателя преломления (Δn соответствует измеряемому диапазону давлений при использовании в качестве жидкости для заполнения камер ацетона или спирта) и вычисляя путем дифференциро-

вания коэффициенты $\frac{\partial \Delta n}{\partial \beta}$ и $\frac{\partial \Delta n}{\partial l}$, при той же длине

камеры будем иметь:

$$\frac{\partial \Delta n}{\partial \beta} \delta\beta = \frac{\lambda}{\pi l} \delta\beta \approx 2 \cdot 10^{-9};$$

$$\frac{\partial \Delta n}{\partial l} \delta l = \frac{\lambda}{\pi l^2} \beta \delta l = 1 \cdot 10^{-9}$$

Таким образом, ожидаемая средняя квадратическая погрешность измерения изменения показателя преломления $\delta(\Delta n)$ определяется погрешностью отступления вводимой пластинкой разности фаз от 90° и не превышает $2 \cdot 10^{-9}$.

Кроме рассмотренных источников погрешностей работы поляризационного интерферометра, необходимо иметь в виду,

что при отражении плоскополяризованной световой волны от полупрозрачной пластины в общем случае свет станет эллиптически поляризованным с произвольной ориентацией осей эллипса колебаний. Так как угол падения светового потока на зеркала интерферометра неизменен, то добавочная разность фаз между интерферирующими пучками является систематической погрешностью. Ее можно скомпенсировать до начала измерения или принять это состояние за начало отсчета.

Для создания постоянных давлений в рабочей камере можно использовать грузопоршневые манометры. Модуляцию потока излучения можно осуществить с помощью поляризатора, помещенного в переменное магнитное поле [9]. Измерение давления в рабочей камере в этом случае будет сводиться к определению угла β и вычислению ΔP по формуле (1).

Угол β отсчитывается по лимбу, механически связанному с анализатором. Его регистрация осуществляется по осциллографу (путем наблюдения момента удвоения частоты электрического сигнала) либо с помощью синхронного детектора, на который подается опорный сигнал от генератора, питающего модулятор.

При измерении переменных давлений модуляция потока излучения будет осуществляться самим давлением, меняющимся по синусоидальному закону, и поэтому электромеханический модулятор должен быть отключен. Амплитуда и частота переменных давлений могут быть измерены следующим образом: вращением анализатора определяют его нулевое положение, наблюдая момент удвоения частоты электрического сигнала. Этому положению анализатора соответствует равенство постоянных давлений в камерах. Так, кривая 1 (см. рис. 2, а) соответствует закону

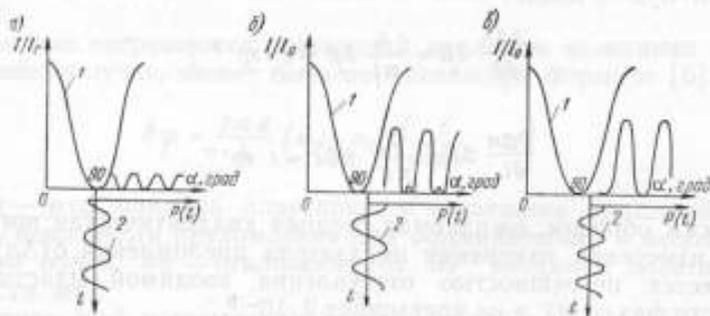


Рис. 2. Зависимость формы выходного электрического сигнала от угла поворота анализатора при измерении переменных давлений.

Малюса, кривая 2 — подаваемому на камеру переменному давлению. При вращении анализатора от нулевого положения изменится форма электрического сигнала, т. е. существенно изменится амплитуда циклов колебаний (рис. 2, б). Для определения угла β анализатор следует вращать до исчезновения малых циклов колебаний (рис. 2, в). Угол β поворота анализатора, соответствующий исчезновению малых циклов (вторая гармоника), позволяет вычислить амплитуду переменных давлений по формуле (1). Частота колебаний электрического сигнала в этом случае будет соответствовать частоте переменного давления. Очевидно, что подобным же образом можно измерить переменное давление при одновременном изменении его постоянного уровня.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бласов В. И. Исследование ультразвуковых полей высоких частот в жидкости методом оптической фазометрии. Акустические и гидроакустические измерения. — Труды институтов Комитета, вып. 45 (105), 1960, с. 28—50.
2. Butlers J. N. Laser interferometer for fluid pressure measurements. — «Optics Technology», 1969, Nov., pp. 532—556.
3. Иоффе Б. В. Рефрактометрические методы химии, Л., «Химия», 1974, 400 с.
4. Нагибина И. М. Интерференция и дифракция света. Л., «Машиностроение», 1974, 360 с. с ил.
5. Волкова Е. А., Сорокина И. С. Об измерении угла вращения плоскости поляризации объективным методом — Труды метрологических институтов СССР, вып. 114 (174), 1970, с. 63—66 с ил.
6. Буслаева В. Е., Налбандов Л. В. Объективный метод измерения разности фаз дупреломляющих объектов. — Труды метрологических институтов СССР, вып. 114 (174), 1970, с. 76-81.
7. Jerrard N. G. Calibration of Quater-Wave plates. — J.O.S.A., 1952, v. 42, № 3, p. 159.
8. Васильев Б. В. Оптика поляризационных приборов, М., «Машиностроение», 1969, 210 с. с ил.
9. Шамбуров В. А., Кудрявцев В. И., Кеймах Р. Я. Электромеханический вибрационный поляризатор-модулятор угла поворота плоскости поляризации света. — Труды ВНИИЭКИПРОДМАШ, М., 1962, № 1, 2, с. 3—8.

Поступила в редакцию 12.01.1977 г.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Предисловие	2
<i>Г. И. Полухин</i> . Классификация конструкций поршневых манометров	3
<i>Г. И. Лоскутов</i> , <i>Г. И. Полухин</i> . Исследование грузоприемных устройств рабочих эталонов единицы давления с верхним пределом измерения $6 \cdot 10^7$ Па	11
<i>Г. И. Лоскутов</i> , <i>Г. И. Полухин</i> . Оптическое устройство для наблюдения за положением равновесия грузопоршневых манометров, входящих в состав первичного, вторичного и рабочих эталонов единиц давления	14
<i>Г. И. Полухин</i> , <i>В. А. Цвелик</i> . Грузопоршневые манометры абсолютного давления	16
<i>Г. И. Полухин</i> , <i>О. В. Лавренко</i> , <i>В. А. Цвелик</i> . Интерференционные методы измерения разности уровней ртути в манометрах абсолютного давления	22
<i>С. М. Бородинская</i> , <i>А. В. Ерюхин</i> , <i>В. В. Кузьмин</i> , <i>Е. К. Фролов</i> . Исследования и выбор электрического режима образцовых ионизационных манометров	28
<i>В. А. Кукушкин</i> , <i>В. А. Рыжов</i> . Повышение верхнего предела измерения мембранно-емкостного манометра	36
<i>В. А. Кукушкин</i> , <i>В. А. Рыжов</i> . Принцип построения установки для градуировки манометрических преобразователей в динамическом режиме	38
<i>В. А. Кукушкин</i> , <i>В. А. Рыжов</i> . Измерение объемов резервуаров сложной конфигурации	42
<i>В. В. Кузьмин</i> . Редукционно-хронометрический метод градуировки вакуумметров	44
<i>В. В. Кузьмин</i> . Комбинированная методика градуировки манометров в области высокого и сверхвысокого вакуума	49
<i>В. А. Ефимов</i> , <i>И. В. Плотников</i> . Градуировка волноводного измерительного преобразователя на ударной трубе	60
<i>В. А. Ефимов</i> , <i>И. В. Плотников</i> . Измеритель скорости ударной волны	64
<i>В. А. Ефимов</i> . Режим работы ударной трубы при поверке преобразователей давления	66
<i>В. А. Ефимов</i> , <i>И. В. Плотников</i> . Установка с ударной трубой как средство воспроизведения размера единицы давления в динамическом режиме	69

	<i>В. А. Дунаева, И. В. Плотников.</i> Установка с быстродействующим клапаном для воспроизведения импульсных давлений в жидкости	76
	<i>В. П. Шумилин.</i> Инерционный метод воспроизведения давления	80
	<i>В. П. Шумилин, Ф. Н. Авдеев.</i> Преобразователь давления, основанный на интерференционном методе	86
	<i>Ф. Н. Авдеев, Т. Л. Гутман, В. П. Шумилин.</i> Ступенчатый концентратор давления	90
	<i>Г. А. Тарасов.</i> Оценка погрешностей средств измерений в динамическом режиме	95
	<i>А. Д. Бродский, Г. И. Полухин, М. А. Свирина.</i> Приближенное экспериментальное решение задачи Стокса	102
стр.	<i>Б. Э. Блангер.</i> Исследование системы измерения сдвига фазы при определении фазо-частотной характеристики акселерометров на двойной центрифуге	106
2	<i>Т. В. Берсенева, Р. М. Долгих, Л. В. Налбандов, А. С. Ромашенко.</i>	
3	О возможности точных измерений давлений в жидкостях с помощью поляризационного интерферометра	111
	Рефераты публикуемых статей	121

11
14
16
22
28
36
38
42
44
49
50
54
56
59

100. ...
101. ...
102. ...
103. ...
104. ...
105. ...
106. ...
107. ...
108. ...
109. ...
110. ...
111. ...
112. ...
113. ...
114. ...
115. ...
116. ...
117. ...
118. ...
119. ...
120. ...
121. ...
122. ...
123. ...
124. ...
125. ...
126. ...
127. ...
128. ...
129. ...
130. ...
131. ...
132. ...
133. ...
134. ...
135. ...
136. ...
137. ...
138. ...
139. ...
140. ...
141. ...
142. ...
143. ...
144. ...
145. ...
146. ...
147. ...
148. ...
149. ...
150. ...
151. ...
152. ...
153. ...
154. ...
155. ...
156. ...
157. ...
158. ...
159. ...
160. ...
161. ...
162. ...
163. ...
164. ...
165. ...
166. ...
167. ...
168. ...
169. ...
170. ...
171. ...
172. ...
173. ...
174. ...
175. ...
176. ...
177. ...
178. ...
179. ...
180. ...
181. ...
182. ...
183. ...
184. ...
185. ...
186. ...
187. ...
188. ...
189. ...
190. ...
191. ...
192. ...
193. ...
194. ...
195. ...
196. ...
197. ...
198. ...
199. ...
200. ...

УД
Кл
«И
ин
пр
осо
ют
но
УД
Ис
вер
«И
ин
ни
пр
не
ра
УД
Оп
нев
эта
дов
тут
пол
деш
УД
Гру
ли
рол
лю
Бис

РЕФЕРАТЫ ПУБЛИКУЕМЫХ СТАТЕЙ

УДК 531.787.3.005

Классификация конструкций поршневых манометров. Полухин Г. И. — «Исследования в области механических измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 223 (283), 1978, с. 3—10.

Рассматриваются типы поршневых пар, применяемых в грузопоршневых приборах для измерения давления. Дается классификация по конструктивным особенностям. Указываются достоинства и недостатки поршневых пар и даются рекомендации по применению их в грузопоршневых приборах различного назначения. Ил. 13.

УДК 531.787.3.089.68

Исследование грузоприемных устройств рабочих эталонов единицы давления с верхним пределом измерения $6 \cdot 10^7$ Па. Лоскутов Г. И., Полухин Г. И. — «Исследования в области механических измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 223 (283), 1978, с. 11—13.

Исследуется влияние грузоприемного устройства рабочего эталона единицы давления с верхним пределом измерений $6 \cdot 10^7$ Па (~ 600 кгс/см²) на приведенную площадь поршня. Для исследования влияния сил трения применяется вспомогательная поршневая пара. Подтверждается правильность выбора методики аттестации рабочих эталонов. Ил. 2.

УДК 531.787.3.089.68

Оптическое устройство для наблюдения за положением равновесия грузопоршневых манометров, входящих в состав первичного, вторичного и рабочих эталонов единиц давления. Лоскутов Г. И., Полухин Г. И. — «Исследования в области механических измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 223 (283), 1978, с. 14—15.

Дано описание конструкции оптического устройства для наблюдения за положением равновесия поршней сличаемых грузопоршневых манометров, входящих в состав эталонов единицы давления. Ил. 1.

УДК 531.787.3

Грузопоршневые манометры абсолютного давления. Полухин Г. И., Цветник В. А. — «Исследования в области механических измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 223 (283), 1978, с. 16—22.

Дан обзор и классификация точных грузопоршневых манометров абсолютного давления, приводятся технические характеристики приборов. Ил. 5. Библи. 11.

Интерференционные методы измерения разности уровней ртути в эталонных манометрах абсолютного давления. Полухин Г. И., Лавренко О. В., Цвельк В. А. — «Исследования в области механических измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 223 (283), 1978, с. 22—28.

Дан обзор интерференционных методов измерения разности уровней ртути манометрами абсолютного давления. Рассмотрены схемы интерферометров. На основании сравнения различных методов выбран наиболее перспективный. Ил. 4. Библ. 6.

УДК 531.788.7.089.79

Исследования и выбор электрического режима образцовых ионизационных манометров. Бородицкая С. М., Ерюхин А. В., Кузьмин В. В., Фролов Е. К. — «Исследования в области механических измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 223 (283), 1978, с. 28—36.

Изложены результаты исследований электрического режима образцовых ионизационных манометров 2-го разряда типов ВИО-1, ВИО-2 и ОИМ-8. Изучены зависимости ионного тока манометрических преобразователей от электронного тока, напряжений на аноде, катоде, экране и модуляторе при давлениях 10^{-2} — 10^{-4} Па по азоту. Выбраны номинальные значения параметров электрического режима манометров. Ил. 9. Табл. 1. Библ. 3.

УДК 531.788.12

Повышение верхнего предела измерения мембранно-емкостного манометра. Кукушкин В. А., Рыжов В. А. — «Исследования в области механических измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 223 (283), 1978, с. 36—38.

Для повышения верхнего предела измерения мембранно-емкостного манометра предлагается применить вакуумный шунт по аналогии с электрическим. Дана оценка погрешности измерения давления. Ил. 1.

УДК 531.788.089.62

Принцип построения установки для градуировки манометрических преобразователей в динамическом режиме Кукушкин В. А., Рыжов В. А. — «Исследования в области механических измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 223 (283), 1978, с. 38—42.

Дана оценка погрешности градуировочной установки, основанной на методе редукции давления. Минимальный объем камеры исходного давления позволяет свести до минимума время установления стационарного течения газа. Ил. 1. Библ. 3.

УДК 531.73

Измерение объемов резервуара сложной конфигурации. Кукушкин В. А., Рыжов В. А. — «Исследования в области механических измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 223 (283), 1978, с. 42—44.

Дана оценка погрешности метода измерения объема, основанного на заполнении резервуара известным количеством газа. Ил. 1.

УДК 531.788.089.6

Редукционно-хронометрический метод градуировки вакуумметров. Кузьмин В. В. — «Исследования в области механических измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 223 (283), 1978, с. 44—48.

Описан редукционно-хронометрический метод градуировки вакуумметров, представляющий сочетание расчета изменяющегося во времени исходного давления и редукции его в область высокого и сверхвысокого вакуума. С помощью данного метода расширен диапазон градуировки в сторону низких давлений и максимально упрощена методика градуировки и конструкция установки. Процесс градуировки сводится к наблюдению временной зависимости сигналов градуируемого вакуумметра и двухкратному изменению непрерывно понижающегося давления образцовым манометром Табл. 1. Ил. 1. Библ. 11.

УДК 531.788.089.6

Комбинационная методика градуировки манометров в области высокого и сверхвысокого вакуума. Кузьмин В. В. — «Исследования в области механических измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 223 (283), 1978, с. 49—59.

Изложена комбинационная методика градуировки вакуумметров, представляющая сочетание двух методов: метода статического расширения (экспансионного метода) или метода расчета исходного давления во времени (хронометрического метода) с методом редукции этого давления в область высокого и сверхвысокого вакуума. Такая методика градуировки обеспечивает значительное расширение ее диапазона, а также имеет ряд существенных конструктивных и методических преимуществ. Приведены конкретные способы осуществления комбинационного принципа. Приводятся результаты испытания экспансионно-редукционного метода градуировки вакуумметров. Табл. 1. Ил. 3. Библ. 13.

УДК 531.787.087.92

Градуировка волноводного измерительного преобразователя на ударной трубе. Ефимов В. А., Плотников И. В. — «Исследования в области механических измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 223 (283), 1978, с. 60—63.

Приводится описание конструкции градуировочной ударной трубы, которая может быть изготовлена в лабораторных условиях. Приводятся результаты градуировки волноводного измерительного преобразователя давления. Ил. 2. Библ. 4.

УДК 532.533

Измеритель скорости ударной волны. Ефимов В. А., Плотников И. В. — «Исследования в области механических измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 223 (283), 1978, с. 64—66.

Приводится описание конструкции измерителя скорости ударной волны, существенно отличающегося от известных ранее. Дается анализ погрешности измерения скорости ударной волны. Ил. 1. Библ. 2.

УДК 533.6.071.8:531.787

Режим работы ударной трубы при поверке преобразователей давлений. Ефимов В. А. — «Исследования в области механических измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 223 (283), 1978, с. 66—69.

Приведен расчет и графическая зависимость частной погрешности определения разности давлений из фронте падающей и отраженной ударных волн от числа Маха. Даны рекомендации по выбору режима работы установки с целью снижения погрешности градуировки и расширения ее рабочего диапазона. Ил. 2. Библ. 2.

УДК 689.7.018.1:531.787.089.98

Установка с ударной трубой как средство воспроизведения размера единицы давления в динамическом режиме. Ефимов В. А., Плотников И. В. — «Исследования в области механических измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 223 (283), 1978, с. 69—76.

Представлена обзорная информация по градуировочным ударным трубам, на основании которой рассмотрена схема установки, уравнение измерения, выбор элементов конструкции. Дано обоснование оптимальных режимов работы установки и оценка погрешностей измерения импульсного давления. Ил. 1. Библ. 22.

УДК 531.787.68.33

Установка с быстродействующим клапаном для воспроизведения импульсных давлений в жидкости. Дунаева В. А., Плотников И. В. — «Исследования в области механических измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 223 (283), 1978, с. 76—79.

Приводится описание и результаты экспериментального исследования установки с быстродействующим клапаном, позволяющей воспроизводить в жидкости ступенчатые давления от 15^5 до $6 \cdot 10^7$ Па со временем нарастания до пикового давления 0,3 мс и длительностью установления переходного давления 7—10 мс. Дается оценка погрешности воспроизведения давления. Ил. 2.

УДК 531.787.9

Инерционный метод воспроизведения переменного давления. Шумилин В. П. — «Исследования в области механических измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 223 (283), 1978, с. 80—86.

Дана результаты теоретического и экспериментального исследования инерционного метода воспроизведения периодического переменного давления, являющегося абсолютным методом измерения. Описаны результаты исследования погрешностей измерения. Работа содержит также рекомендации для создания образцовой установки, основанной на инерционном методе. Ил. 2. Библ. 4.

УДК 531.787.53

Преобразователь давления, основанный на интерференционном методе. Шумилин В. П., Авдеев Ф. Н. — «Исследования в области механических измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 223 (283), 1978, с. 86—90.

Приведены основные результаты исследований, полученные при разработке преобразователя давления, основанного на интерференционном методе измерения.

Дано решение, позволяющее сравнительно простыми средствами отсчитывать целые и дробные доли интерференционных полос. Описывается преобразователь и результаты его исследования. Ил. 1.

УДК 531.787.9

Ступенчатый концентратор давления. Авдеев Ф. Н., Гутман Т. Л., Шумилин В. П. — «Исследования в области механических измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 223 (283), 1978, с. 90—94.

Изложены результаты теоретического и экспериментального исследования ступенчатого концентратора давления, заполненного жидкой средой. Получено выражение для коэффициента усиления, снята опытная амплитудно-частотная характеристика макета концентратора. Результаты эксперимента, в основном, совпадают с расчетными данными. Ил. 2, Библ. 2.

УДК 531.787.9:53.088

Оценка погрешностей средств измерений в динамическом режиме. Тарасов Г. А. — «Исследования в области механических измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 223 (283), 1978, с. 95—101.

Предложены формулы, которые позволяют оценивать динамические погрешности средств измерений при произвольных входных воздействиях. Ил. 1. Табл. 1. Библ. 6.

УДК 532.51.5

Приближенное, экспериментальное решение задачи Стокса. Бродский А. Д., Полухин Г. И., Свирина М. А. «Исследования в области механических измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 223 (283), 1978, с. 102—105.

Посвящена частному случаю решения задачи Стокса, имеющей большое практическое значение для вертикального зондирования морских глубин с летательных аппаратов. Дано приближенное решение уравнения движения зонда с учетом начальной скорости его приведения.

Для удобства расчета определения глубины зондирования рекомендуется применение специального планшета. Ил. 1.

УДК 531.787.53.088.3

Исследование системы измерения сдвига фазы при определении фазо-частотной характеристики акселерометров на двойной центрифуге. Блантер В. Э.— «Исследования в области механических измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 223 (283), 1978, с. 106—111.

Описана схема системы измерения сдвига фаз, используемой при исследовании фазо-частотной характеристики низкочастотных линейных акселерометров на двойной центрифуге. Определены основные источники погрешностей при прямых измерениях сдвига фаз и в случае преобразования измеряемого угла во временной интервал. Найдены оценки систематических и случайных погрешностей измерения сдвига фаз обоими способами. Ил. 2. Библ. 4.

УДК 531.787.53.088.3

О возможности точных измерений давлений в жидкостях с помощью поляризационного интерферометра. Берсенева Т. В., Долгих Р. М., Налбандов Л. В., Ромашенко А. С.— «Исследования в области механических измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 223 (283), 1978, с. 111—114.

Рассматривается возможность применения поляризационного интерферометра в идеализированных условиях для измерений давлений в жидкостях. Проанализированы оптические характеристики поляризационного интерферометра и методика работы при измерении постоянных и переменных давлений. Ил. 2. Библ. 9.

ИССЛЕДОВАНИЯ
В ОБЛАСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ
ИЗМЕРЕНИЙ

Труды метрологических институтов СССР

В ы п у с к 223 (283)

Редакторы: *Л. Ф. Садовская, И. А. Шайкевич*
Технический редактор: *З. Г. Мамонова*
ИБ

Сдано в набор 8.6.77 г.

Подписано к печ. 10.1.78 г.

М-14230

Формат 60×90^{1/16}

Бум. типографская № 3

Печ. л. 7,5

Уч.-изд. л. 5,4

Тираж 500

Заказ 5231

Цена 70 коп.

Т. 5 Ленуприздат, Парголово, ул. Ломоносова, д. 115

1978, 1979, 1980.

Результаты экспериментальных работ по изучению влияния различных факторов на развитие и выживаемость личинок комаров в водоемах. Ученые из Института биологии и экологии растений и животных Уральского государственного университета СССР, 1978, 1979, 1980, с. 103-108.

Изучены влияние различных факторов на развитие личинок комаров в водоемах. Ученые из Института биологии и экологии растений и животных Уральского государственного университета СССР, 1978, 1979, 1980, с. 103-108.

Для цитирования: Биология и экология растений и животных Уральского государственного университета, 1978, 1979, 1980, с. 103-108.

1978, 1979, 1980.

Изучены влияние различных факторов на развитие личинок комаров в водоемах. Ученые из Института биологии и экологии растений и животных Уральского государственного университета СССР, 1978, 1979, 1980, с. 103-108.

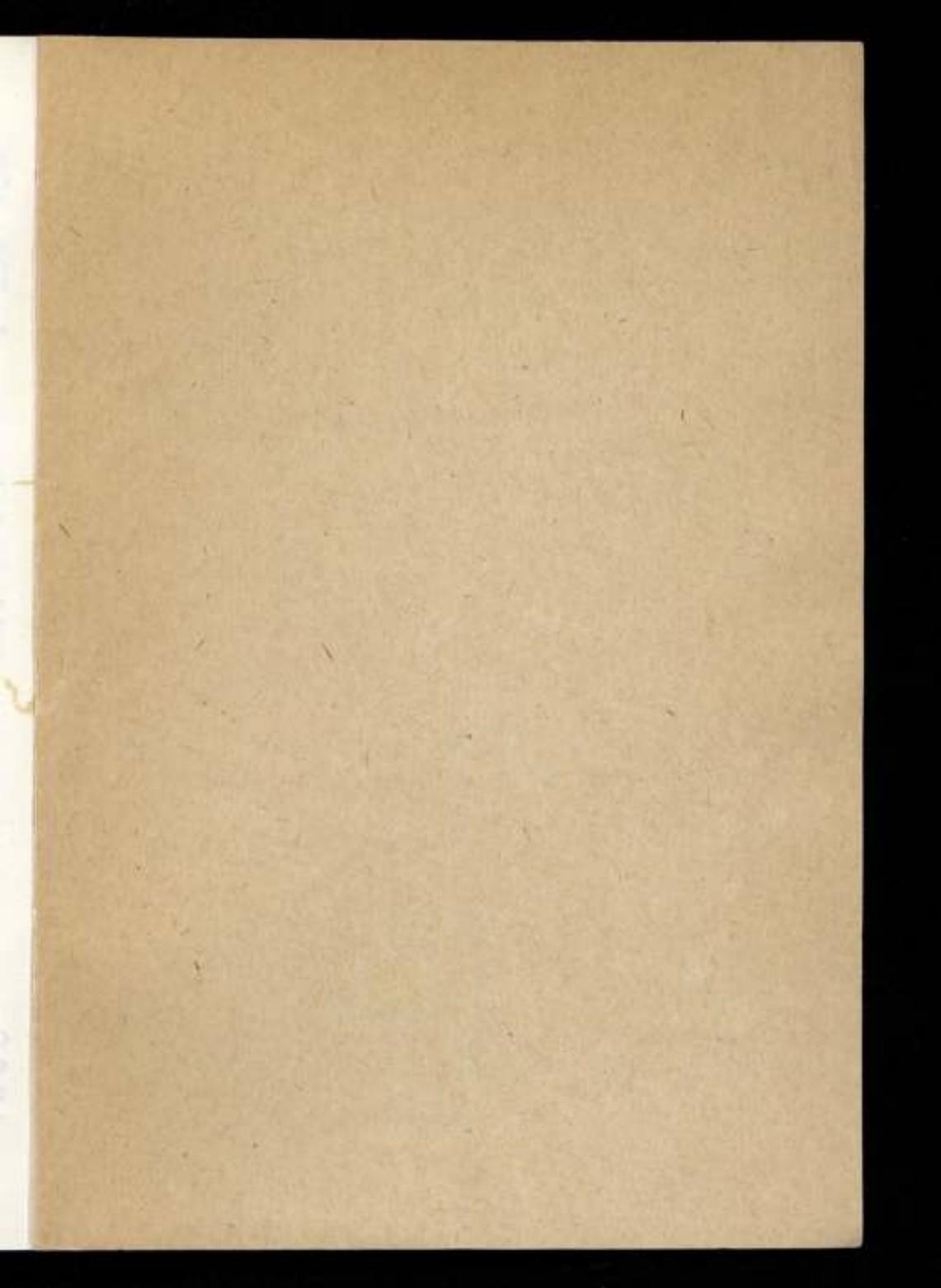
Изучены влияние различных факторов на развитие личинок комаров в водоемах. Ученые из Института биологии и экологии растений и животных Уральского государственного университета СССР, 1978, 1979, 1980, с. 103-108.

1978, 1979, 1980.

Изучены влияние различных факторов на развитие личинок комаров в водоемах. Ученые из Института биологии и экологии растений и животных Уральского государственного университета СССР, 1978, 1979, 1980, с. 103-108.

Изучены влияние различных факторов на развитие личинок комаров в водоемах. Ученые из Института биологии и экологии растений и животных Уральского государственного университета СССР, 1978, 1979, 1980, с. 103-108.

1978, 1979, 1980. Биология и экология растений и животных Уральского государственного университета, 1978, 1979, 1980, с. 103-108.



Цена 70 коп.