

КОМИТЕТ СТАНДАРТОВ, МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР

ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ МЕТРОЛОГИИ
ИМ Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

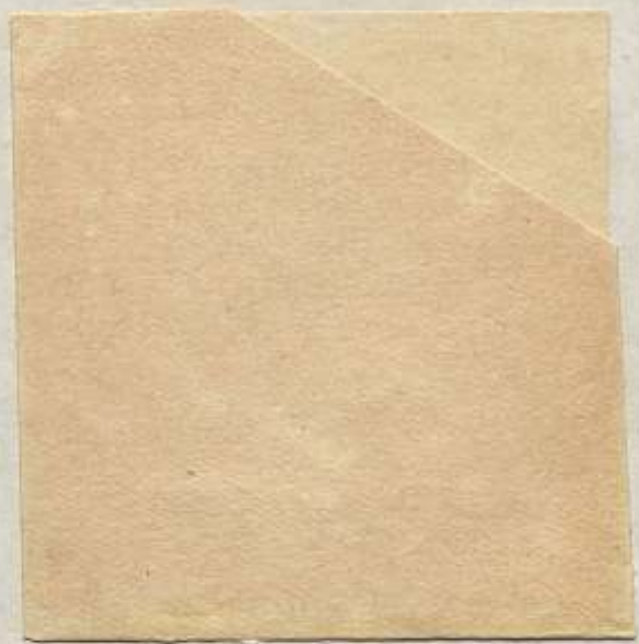
**ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ
ИЗМЕРЕНИЙ ДАВЛЕНИЯ,
РАСХОДА И ВАКУУМА**

ТРУДЫ ИНСТИТУТОВ КОМИТЕТА

ВЫПУСК 66(126)

СТАНДАРТГИЗ

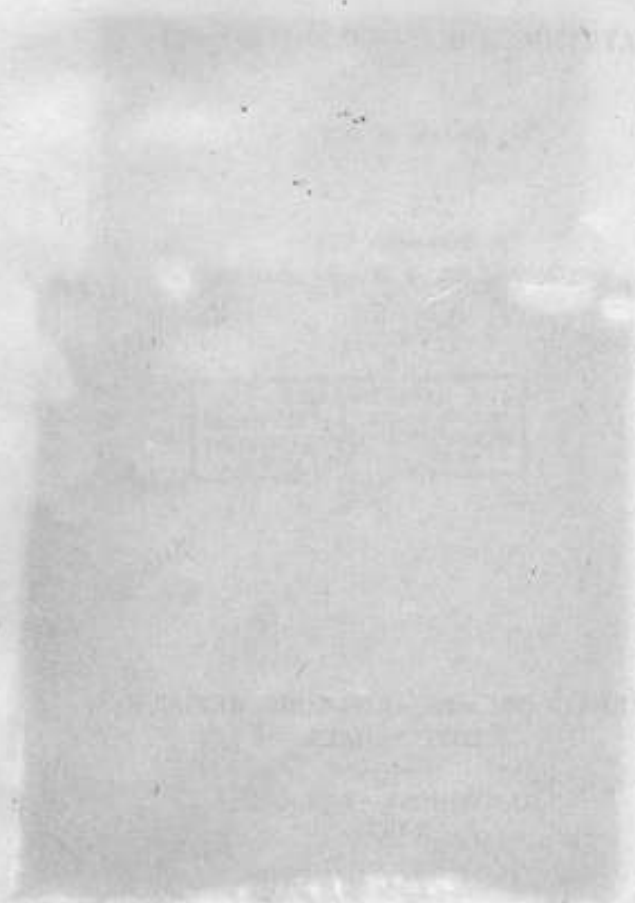
МОСКВА — ЛЕНИНГРАД
1962



ИЗДАНИЕ ПЕРВОЕ, 1954 г. 100 000 экз. Цена 1 руб. 50 коп.

ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР
УДАРЕНИЕ И. М. МИНДЕЛОВА

ИЗМЕНЕНИЯ В ОБЛАСТИ ПОВЫШЕННОГО ДАВЛЕНИЯ, ПРИХОДА И ВАКУУМА



107614

КОМИТЕТ СТАНДАРТОВ, МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР

ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
МЕТРОЛОГИИ им. Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ДАВЛЕНИЯ, РАСХОДА И ВАКУУМА

ТРУДЫ ИНСТИТУТОВ КОМИТЕТА

ВЫПУСК 66(126)

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



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО СТАНДАРТОВ
СТАНДАРТИЗ

МОСКВА — ЛЕНИНГРАД
1962

м 12796

Редакционный совет

П. Н. Агаецкий, К. К. Аглинцев, И. Н. Александрова,
В. О. Арутюнов, С. В. Горбачевич, Е. Ф. Долинский,
М. А. Жоховский, Л. М. Заке, В. В. Кандыба, Л. К. Каяк,
И. И. Киренков, Д. К. Коллеров, Е. Т. Чернышев,
К. П. Широков, Е. Г. Шрамков, Б. М. Яновский

Ответственный редактор
д-р техн. наук проф. В. О. АРУТЮНОВ

ПРЕДИСЛОВИЕ

Сборник посвящен исследованиям в области измерения давлений, скоростей и расходов жидкостей и газов.

За последнее время значительно расширилась область применения грузопоршневых приборов, которые оказались пригодными для измерения не только избыточного давления, но и разрежения, абсолютного давления и разностей давления.

Универсальный двухпоршневой прибор с предельной погрешностью, не превышающей 0,05% от измеряемой величины, описан в статье В. Н. Граменицкого и К. И. Хансуварова. Описание поршневого барометра дано в статье К. И. Хансуварова.

Образцовый жидкостный микроманометр 1-го разряда типа МКМ-3 описан в статье А. А. Часовникова.

Задачам создания образцовой аппаратуры в области измерения малых абсолютных давлений (от 10^{-4} до 10^{-11} мм рт. ст.) посвящены статьи М. И. Дриги и А. В. Ерюхина; А. В. Ерюхина; А. В. Ерюхина и В. А. Рыжова. В первой из них рассмотрены систематические и случайные погрешности термомолекулярного и ионизационного манометров. Вторая статья устанавливает условия, при которых ионизационный манометр может быть применен в качестве образцового. Погрешности, вызываемые депрессией ртути, а также возможность введения поправок на депрессию, рассмотрены в третьей статье.

Влияние температуры на показания поплавковых дифманометров-расходомеров и расчет соответствующих поправок даны в статье С. С. Кивилиса и В. Е. Олейникова.

Некоторые вопросы, связанные с измерением расхода, рассмотрены в статьях Е. Ф. Долинского и А. И. Петрова. Основанием обеих статей является теория гидромеханического подобия. На ней основана рассматриваемая в первой статье методика градуировки и поверки рео-

метров и условия поверки объемных счетчиков на так называемых жидкостях-заменителях, составляющие содержание второй статьи.

В статье Н. Ф. Гонека, П. П. Кремлевского и М. С. Педан рассмотрены возможности повышения верхнего предела образцовых газомерных установок с колокольными мерниками путем автоматизации работы этих установок.

Вопросу оптимальных соотношений между основными размерами скоростных трубок посвящена статья М. С. Педан.

Редактор

Н. Ф. ГОНЕК, П. П. КРЕМЛЕВСКИЙ, М. С. ПЕДАН
ВНИИМ

АВТОМАТИЧЕСКИЕ ОБРАЗЦОВЫЕ ГАЗОМЕРНЫЕ УСТАНОВКИ

В статье рассмотрены два метода построения автоматических образцовых газомерных установок: с отсчетом показаний поверяемого газосчетчика «на ходу» и с двумя непрерывно работающими мерниками. Приведены результаты исследования экспериментальной установки второго типа.

Автоматизация метрологической аппаратуры позволяет в ряде случаев повысить пределы измерения, достигнутые в настоящее время. Особенно убедительно это можно доказать на примере образцовых газомерных установок. Применение принципов автоматического управления позволяет здесь при том же исходном метрологическом оборудовании резко повысить величину предельных расходов этого оборудования, а в некоторых случаях, кроме того, и точность поверки.

Основным элементом образцовой газомерной установки до настоящего времени в большинстве случаев является колокольный газовый мерник, имеющий класс точности порядка 0,2. Он успешно применялся и применяется для поверки небольших и средних газосчетчиков. Но существенным недостатком колокольного мерника является его громоздкость. Согласно Инструкции 22—56 нормальная длительность поверки газосчетчика равна 3 мин. Отсюда следует, что емкость колокольного мерника должна быть не менее чем одна двадцатая от объема газа, пропускаемого через счетчик за 1 ч при максимальном расходе. Это значит, что для поверки газосчетчика на расходе 1000 м³/ч нужны мерники объемом 50 м³, а для поверки на расходе 10 000 м³/ч необходимы мерники объемом уже в несколько сот кубических метров.

Чтобы несколько облегчить положение, в Инструкции 22—56 разрешается на мерниках, имеющих объем 1 м³ и выше, сокращать длительность поверки до 1,5 мин. Однако это лишь в два раза повышает предел поверяемых расходов, но в то же время снижает качество поверки, поскольку процессы «разгона» и остановки газосчетчика приобретают большее относительное значение. Отсюда ясно, что нельзя оставаться на старых методах работы колокольных мерников при поверке больших газосчетчиков. Необходимо искать пути интенсификации образцовых газомерных установок или разрабатывать новые принципы работы последних.

В настоящее время наметилось два направления, позволяющих

решить поставленную задачу. Оба они опираются на автоматизацию тех или других сторон работы газомерной установки.

Первый метод основан на автоматизации отсчета показаний поверяемого газосчетчика на «ходу» при проходе колоколом мерника контрольного объема.

Второй метод предусматривает создание образцовой установки из двух колокольных мерников, автоматически работающих в непрерывном режиме.

Установка с автоматическим съемом показаний газосчетчика на «ходу»

Идея данного метода состоит в исключении периодов «разгона» и остановки газосчетчика из процесса поверки и осуществлении отсчета его показаний на «ходу» в моменты прохода колоколом мерника двух контрольных отметок. При этом ротору газосчетчика должна быть предварительно сообщена угловая скорость, соответствующая тому расходу, при котором будет поверяться данный прибор. Этот предварительный «разгон» газосчетчика может производиться как за счет объема воздуха в мернике, так и непосредственно вентилятором. Последнее лучше в том отношении, что сохраняет большую часть объема воздуха в мернике для самого процесса поверки. Операция «разгона», вообще говоря, носит подготовительный характер и в принципе может управляться вручную. Однако значительно целесообразнее автоматизировать также и ее. Показателем конца «разгона» является достижение газосчетчиком необходимой скорости вращения. Ввиду отсутствия у последнего тахометрического устройства, приходится ограничиваться косвенным показателем, перепадом давления на газосчетчике, соответствующим заданному расходу, или даже определенной длительностью времени «разгона». В этом случае существенно, чтобы в процессе «разгона» газосчетчика от вентилятора колокольный мерник был также подключен. Это предупреждает возможность «переразгона» газосчетчика. Таким образом, одновременно происходит наполнение мерника и «разгон» поверяемого прибора, причем необходимо, чтобы последний приобрел нужную скорость вращения раньше, чем колокол мерника достигнет своего верхнего положения.

Центральной частью метода является снятие показаний поверяемого газосчетчика на «ходу». Это необходимо делать с помощью автоматических устройств. Возможны различные технические средства решения задачи; так, например, описано устройство особого счетного механизма, укрепляемого на оси поверяемого прибора.* Устройство это состоит из пяти текстолитовых роликов, каждый из которых несет на своей цилиндрической поверхности виток нихромовой спирали. Все ролики соприкасаются с бумажной лентой шириной 125 мм, снаружи которой укрепляется проволока параллельно оси роликов. В моменты съема показаний на наружную проволоку и спирали подается высокое напряжение и на бумаге прожигаются пять точек. Положение точек соответствует показанию газосчетчика, которое можно прочесть с помощью особой масштабной линейки.

Во ВНИИМ в 1959 г. были разработаны две схемы (рис. 1 и 2) автоматизации отсчета показаний, основанные на автоматическом фотографировании показаний поверяемого газосчетчика в моменты, когда колокол мерника проходит контрольные отметки. Для этого в соответствующую

* Bean H. S., Benesh M. S., Witting F. C., Journal of Research of the National Bureau of Standards, 1946, p. 183—209.

ших местах шкалы устанавливаются электрические контакты 1 и 2. В схеме, изображенной на рис. 1, при замыкании этих контактов происходит срабатывание механизма 5, управляющего затвором фотоаппарата 6. Последний желательнее иметь с автоматическим перемещением кадра. В данной схеме счетчик 4 все время освещается лампой 3.

В схеме, изображенной на рис. 2, при замыкании верхнего контакта 2 загорается лампа 4, освещающая сильным пучком зеленого света ци-

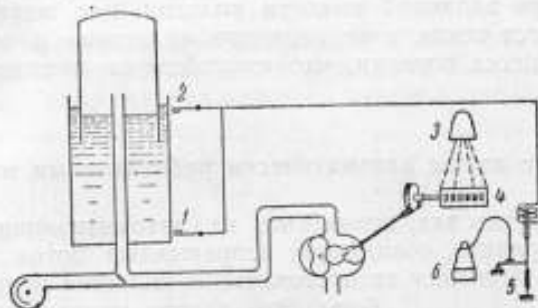


Рис. 1. Регистрация показаний поверяемого газосчетчика с помощью автоматически включаемого фотоаппарата.

ферблат счетчика 5 поверяемого прибора. Отраженный пучок света вторично отражается от полупрозрачного стекла 10 и, проходя через зеленый светофильтр 7, попадает на открытый фотоаппарат 6, который и фотографирует показания счетчика в момент прохода колоколом верхней контрольной отметки. При дальнейшем проходе колоколом нижней кон-

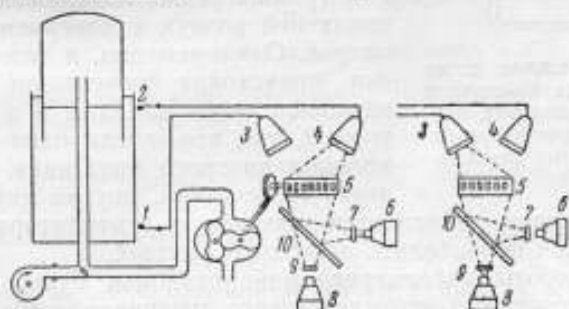


Рис. 2. Фоторегистрация показаний поверяемого газосчетчика с помощью автоматически включаемых осветителей.

трольной отметки замыкается контакт 1 и загорается лампа 3, дающая пучок света, окрашенный в другой цвет, например красный. Этот пучок отражается от цифр счетчика и, проходя через стекло 10 и красный светофильтр 9, попадает на открытый фотоаппарат 8, который и фотографирует показания счетчика в конце испытания. В обоих фотоаппаратах применяются слабочувствительные пленки, позволяющие иметь затворы фотоаппаратов открытыми в течение всего времени испытания.

На заводе «Станиславприбор» в 1961 г. была разработана и с успехом осуществлена схема снятия показаний, основным элементом которой является счетчик оборотов, присоединяемый с помощью электромуфты к поверяемому прибору в момент начала прохождения колоколом контрольного объема. Несомненным достоинством последней схемы

является простота устройства и удобство работы; недостатком — меньшее быстродействие по сравнению с другими схемами. Следует отметить, что на заводе, кроме того, осуществлена автоматизация «разгона» по схеме, близкой к той, которая рассмотрена нами выше, хотя и несколько более сложной. Работает эта схема вполне удовлетворительно.

Рассмотренный метод автоматизации является весьма эффективным средством для значительного повышения предельных величин поверяемых расходов при заданной емкости колокольного мерника. Достоинством его является исключение периодов «разгона» и остановки газосчетчика из процесса поверки, что способствует повышению точности последней.

Установка с двумя автоматически работающими мерниками

Газомерная установка, основанная на автоматизации работы двух колокольных мерников, создающих непрерывный поток газа, сложнее предыдущей. Но большим ее достоинством является непрерывность работы. Это делает данный метод особенно ценным для построения установок, предназначенных для проведения различного рода исследовательских работ.

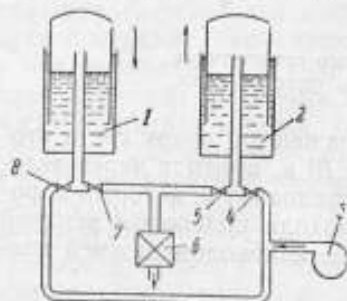


Рис. 3. Принципиальная схема установки двух автоматически работающих колокольных мерников при одноступенчатом отсекании воздушных потоков.

Принципиальная схема подобной установки показана на рис. 3. Два колокольных мерника 1 и 2 автоматически, с помощью концевых контактов и исполнительных механизмов, управляющих клапанами 5 и 7, поочередно подключаются к линии, подающей воздух к поверяемому газосчетчику 6. Одновременно, и тоже автоматически, происходит поочередное подключение мерников через клапаны 4 и 8 к вентилятору 3, так что, когда один из мерников, колокол которого идет вниз, гонит воздух через газосчетчик, другой мерник, колокол которого идет вверх, наполняется воздухом от вентилятора. Процесс наполнения должен происходить несколько быстрее.

Точность работы рассматриваемой установки будет определяться прежде всего точностью автоматического отмеривания объемов каждым колоколом. Это предъявляет очень жесткие требования к стабильности работы и быстродействию всех автоматических и в первую очередь отсекающих устройств, поскольку скорость опускания колоколов при поверке больших газосчетчиков будет весьма значительной. Полное время t опускания колокола, вытесняющего объем V , при расходе Q определяется уравнением

$$t = \frac{V}{Q}.$$

Чтобы предельная погрешность отмеривания объема V не превосходила $a\%$, необходимо, чтобы непостоянство времени Δt_0 каждого из двух отсекающих устройств не превосходило $\frac{a}{2}\%$. Тогда величина Δt_0 может быть получена из выражения

$$\Delta t_0 = \frac{a}{200} \cdot \frac{V}{Q}.$$

При $Q=1000 \text{ м}^3/\text{ч}$ и $V=5 \text{ м}^3$ время опускания колокола $t=18 \text{ сек}$. Тогда при $a=0,1\%$ величина $\Delta t_0 \approx 0,01 \text{ сек}$. С увеличением Q допустимая величина Δt_0 становится еще меньше.

Стабильность работы отсекающих устройств тем легче гарантировать, чем выше быстрдействие аппаратуры автоматики. Однако высокое быстрдействие осуществить трудно, особенно при больших диаметрах трубопроводов и соответственно больших массах отсекающих элементов.

Возможным средством решения задачи в этом случае является применение принципа двухступенчатого отсекания воздуха как при наполнении, так и при опорожнении каждого мерника: вначале отсекается ос-

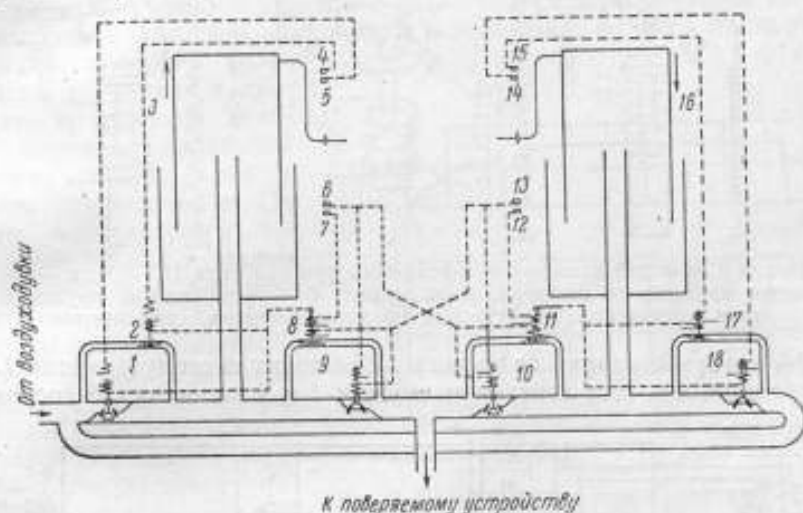


Рис. 4. Принципиальная схема установки двух автоматически работающих колокольных мерников при двухступенчатом отсекании воздушных потоков.

новная часть потока (порядка 90—95%), а затем поток перекрывается полностью.

Принципиальная схема такой установки показана на рис. 4. В этой схеме исполнительные механизмы клапанов 1, 9, 10 и 18 предварительного отсекания, управляемые контактами 5, 6, 13 и 14, могут иметь сравнительно большое время срабатывания, поскольку точность отмеривания объемов определяется стабильностью работы исполнительных механизмов малых клапанов 2, 8, 11 и 17, полностью перекрывающих поток. Последние механизмы управляются предельными концевыми контактами 4, 7, 12 и 15. В изображенном на рис. 4 положении происходит наполнение воздухом мерника 3 через открытые клапаны 1 и 2 и одновременно выход воздуха из мерника 16 через открытые клапаны 10 и 11 к поверяемому прибору.

В 1960 г. во ВНИИМ была построена первая экспериментальная установка, состоящая из двух колоколов по $0,4 \text{ м}^3$ каждый и работающая автоматически в непрерывном режиме. Трубы диаметром 50 мм и отсекающие элементы — краны были оставлены такими, какими они были у мерников до автоматизации. Для поворота кранов на 90° были применены электромагнитные исполнительные механизмы или приводы типа ПС-10М.

На рис. 5 привод ПС-10М показан схематически в трех положениях. Взвод пружины 1 осуществляется якорем 3 электромагнита 2 через

ролик 4, тягу 7 и рычаг 8. В конце взвода рычаг 8 сжимает пружину буфера 9, а концы оси 6 ложатся на собачку 5, опирающуюся на упор 16. Освобождение пружины 1 производится якорем 15 малого электромаг-

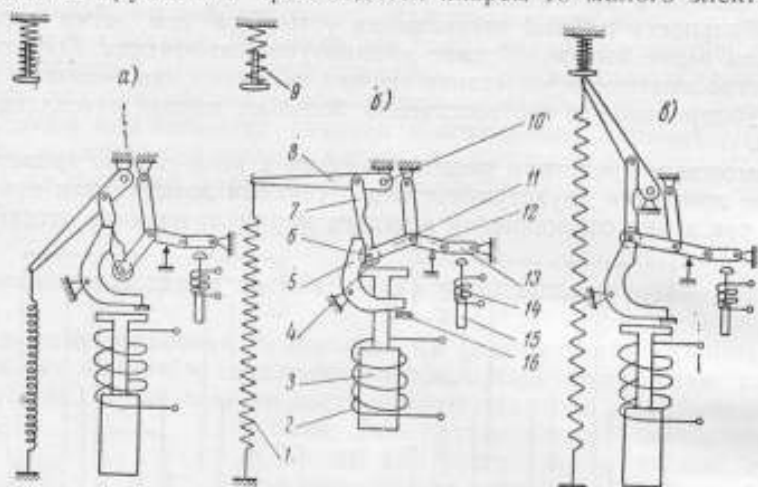


Рис. 5. Схема действия электромагнитного привода типа ПС-10М: а — силовая пружина не взведена, кран закрыт; б — взвод силовой пружины, кран открывается; в — силовая пружина взведена, кран открыт.

нита 14, который, ударяя по рычагу 13, выводит систему рычагов 11, 12, 13 из равновесия. Под действием пружин 1 и 9 концы оси 6 соскальзы-

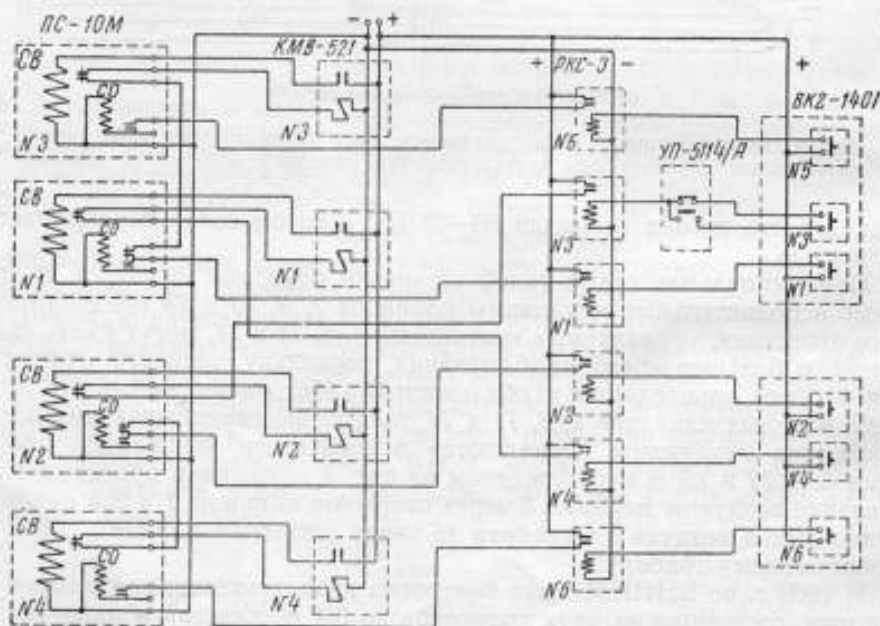


Рис. 6. Схема электрических соединений установки с двумя автоматически работающими колокольными мерниками.

вают с собачки 5 вправо, а рычаг 8 опускается вниз, поворачивая вал 10 против часовой стрелки. Связанный с валом 10 кран закрывается.

Схема электрических соединений газомерной установки показана на рис. 6. На каждом мернике установлены три микровыключателя типа

ВК2-140Г: один сверху и два внизу. Замыкание верхнего соответствует моменту окончания заполнения и вызывает закрытие крана, сообщающего мерник с вентилятором. Самый нижний микровыключатель замыкается, когда колокол опускается до своего нижнего положения, и вызывает закрытие крана, сообщающего мерник с поверяемым газосчетчиком. Нижний предварительный микровыключатель предназначен для подключения соседнего мерника к расходной линии с некоторым опережением по отношению к моменту отключения данного мерника от этой линии. Последовательно с микровыключателями установлены промежуточные реле типа РКС-3. Включение больших электромагнитов СВ производится через контакторы КМВ-521.

Исследование работы установки заключалось в определении быстродействия автоматической аппаратуры и зависящей от него точности от-

меривания объемов колокольными мерниками и, кроме того, в изучении величины и характера пульсаций давления, возникающих в моменты переключения. По данным осциллограмм токов в реле РКС-3 и малом (отключающем) электромагните привода ПС-10М построены кривые на рис. 7. Начало отсчета времени совпадает с моментом срабатывания соответствующего микровыключателя. Линия $l-l$ соответствует началу движения якоря реле, линия $m-m$ — замыканию электрического контакта

реле, а линия $n-n$ — остановке якоря. Начало подачи тока в электромагнит привода ПС-10М совпадает с линией $m-m$. Линия $p-p$ указывает момент удара сердечника по рычагам спускового механизма, линия $q-q$ — разрыв цепи электромагнита и линия $r-r$ — окончание угасания дуги.

Время срабатывания T_p реле РКС-3 равно 0,046 сек и отличается большим постоянством. Время срабатывания T_o электромагнита отключения равно $0,082 \pm 0,002$ сек. Эти цифры свидетельствуют о хорошем быстродействии и стабильности работы системы, что должно обеспечить высокую точность отмеривания объемов колокольными мерниками.

По данным осциллограмм токов в реле РКС-3 и большом (включающем) электромагните привода ПС-10М, а также осциллограммы напряжения на последнем, построены кривые на рис. 8. Кривая тока в реле и кривая напряжения указывают на большое падение напряжения в линии (кривая b) питания большого электромагнита. Время срабатывания реле РКС-3 $T_p = 0,046$ сек, время срабатывания контактора $T_k = 0,078$ сек и время срабатывания электромагнита включения $T_n = 0,108$ сек. Отклонения от этих величин очень малы.

Таким образом, примененные электроприводы обеспечивают высокое быстродействие не только при отключении, но и при включении запорной арматуры.

В дополнение к полученным результатам была проведена проверка повторяемости остановки колокола одного из мерников в верхнем и

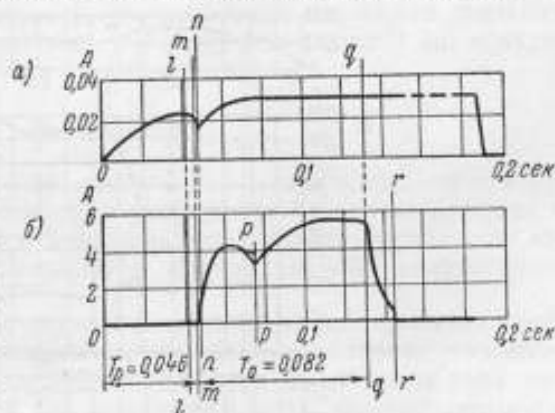


Рис. 7. Кривые токов в реле РКС-3 и малом электромагните отключения привода ПС-10М: а — ток реле; б — ток электромагнита.

нижнем положении. Проверка производилась при двух различных расходах, которым соответствует полное опускание колокола за 38 и 76 сек. На каждом расходе было выполнено несколько серий опытов с двенадцатью измерениями в каждой серии.

Полный ход колокола — порядка 1212 мм. Среднее квадратичное отклонение величины хода колокола по данным этих измерений составляет: при опускании колокола за 38 сек — 0,4 мм, или 0,033%, и при опускании колокола за 76 сек — 0,3 мм, или 0,025%. Предельные отклонения хода колокола от средней величины не превышают 0,1%. Таким образом, получено хорошее постоянство хода колокола. Измерения показали также, что с увеличением времени опускания колокола от 38 до 76 сек средняя величина полного хода уменьшается с 1212,9 до 1211,2 мм.

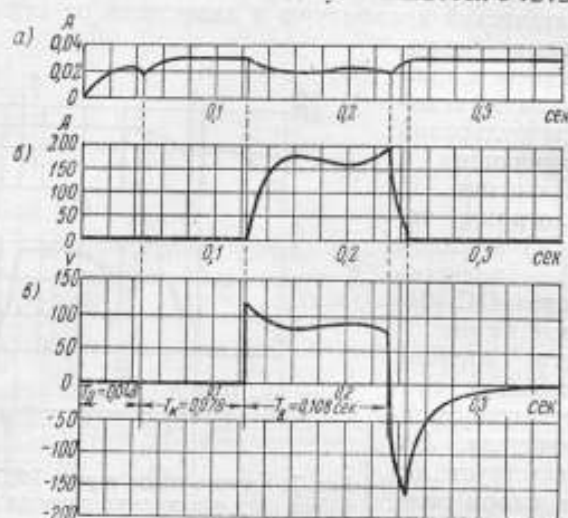


Рис. 8. Кривые токов и напряжения: а — ток реле РКЗ-3; б — ток большого электромагнита включения привода ПС-10М; в — напряжение на электромагните включения.

Уменьшение хода колокола составляет 1,7 мм, или 0,15%. Величина изменения хода колокола в результате изменения скорости его опускания может быть уменьшена путем увеличения быстродействия отсекающих устройств или учтена введением соответствующих поправок.

Исследование постоянства давления в подколокольном пространстве и в трубопроводе перед газосчетчиком производилось с помощью мембранного зеркального микроманометра. Испытания показали, что в моменты переключения кранов возникают колебания давления, причем в подколокольных пространствах они находятся в пределах ± 15 кгс/м², а перед газосчетчиком — всего лишь в пределах $\pm (4 \div 6)$ кгс/м². Колебания происходят с частотой около 4 гц и весьма быстро, примерно через 1 сек, практически затухают. Колебания возникают вследствие инерции колоколов при быстром открытии или закрытии кранов. Колебания в подколокольном пространстве могут быть снижены в два раза, если процессы открытия и закрытия кранов у двух соседних мерников производить с некоторым сдвигом во времени, так, чтобы иметь в течение этого времени параллельную работу двух мерников. В данной экспериментальной установке делать это было нецелесообразно из-за очень большого перепада давления, имевшегося в системе трубопроводов

вследствие очень малого диаметра последних. В дальнейшем при построении подобных установок необходимо существенно увеличивать диаметры трубопроводов по сравнению с принятыми при обычной работе колокольных мерников. В этом случае будет возможно осуществление открытия крана с предварением. Кроме того, целесообразно время открытия удлинить в несколько раз до $(0,5 \div 1)$ сек, что возможно, потому что это время не влияет на точность отмеривания объемов воздуха. В этом случае колебание давления при открытии крана практически исчезает, однако закрытие должно происходить достаточно быстро и это может явиться причиной возникновения небольших колебаний давления под соседним колоколом. Эти колебания также могут быть ликвидированы путем применения двухступенчатой схемы отсекаания, показанной на рис. 4.

Наряду с этим следует сказать, что небольшие колебания давления перед газосчетчиком, происходящие с частотой порядка 4 гц, практически едва ли будут сказываться на его работе.

Заключение

1. Газомерные установки с автоматизацией съема показаний поверяемого газосчетчика на «ходу» весьма удобны для поверочной работы и позволяют значительно повысить предельную величину расхода, на которой можно производить поверку при данной емкости колокольного мерника.

2. Газомерные установки с двумя автоматически работающими колоколами также существенно повышают предельную величину «поверочных» расходов. Кроме того, они создают непрерывный поток газа, что делает их особенно ценными для различного рода исследовательских работ.

3. Необходимо усилить работы по дальнейшему исследованию метрологических характеристик автоматизированных газомерных установок, с тем чтобы более четко определить: а) предельные величины расходов при данных емкостях мерников, б) наиболее целесообразные типы автоматической аппаратуры.

Поступила в редакцию

11/XII 1961 г.

В. Н. ГРАМЕНИЦКИЙ, К. И. ХАНСУВАРОВ
ВНИИК

ОБРАЗЦОВЫЙ ДВУХПОРШНЕВОЙ МАНОВАКУУММЕТР*

Статья содержит результаты работы, выполненной во ВНИИК, по созданию образцового мановакуумметра с двумя взаимно уравновешенными дифференциальными поршнями, выпускаемого в настоящее время под наименованием МВП-2,5 и применяемого в качестве образцового мановакуумметра 2-го разряда для поверки образцовых пружинных манометров и образцовых пружинных вакуумметров. В работе дано описание принципиальной схемы и конструкции мановакуумметра МВП-2,5, приведены результаты его теоретического исследования, описана методика испытаний и дана метрологическая характеристика мановакуумметра.

Авторами [1] разработаны образцовые двухпоршневые приборы со взаимно уравновешенными поршнями, предназначенные для измерения избыточного, абсолютного и атмосферного давления, разрежения и разности давлений.

Ниже приводится описание конструкции и результаты исследования одного из указанных приборов — образцового двухпоршневого мановакуумметра МВП-2,5 со взаимно уравновешенными поршнями.

Описание конструкции

Мановакуумметр МВП-2,5 предназначен для поверки образцовых пружинных манометров классов $0,16 \div 0,4$ с верхними пределами измерения до $2,5 \text{ кгс/см}^2$ и образцовых пружинных вакуумметров классов $0,16 \div 0,4$, а также для непосредственного измерения давления в пределах от 0 до $2,5 \text{ кгс/см}^2$ и разрежения.

Общий вид мановакуумметра МВП-2,5 показан на рис. 1.

Мановакуумметр состоит из двух соединенных между собой поршневых пар (поршень—цилиндр) 1 и 2 (рис. 2) с простым и дифференциальным поршнями, жидкостного пресса 5, воронки 4 и резервуара 3, сообщаемого с пространством, в котором создается измеряемое давление или разрежение. Между поршнями и цилиндрами отсутствуют уплотнения, а радиальные зазоры составляют 3—4 мк. Мановакуумметр заполняют трансформаторным маслом. Вращение поршней осуществляется от электродвигателя при помощи поводкового механизма. При выбранных

* Авторское свидетельство № 112893 от 4/III 1958 г. на имя В. Н. Граменицкого и К. И. Хансуварова.

параметрах прибора вертикальная составляющая нежидкостного трения в точке контакта поводкового механизма мала и не оказывает влияния на точность измерения. Массу поршней и грузоприемных дисков подгоняют так, что при отсутствии избыточного давления или разрежения в резервуаре оба поршня взаимно уравновешены и установлены

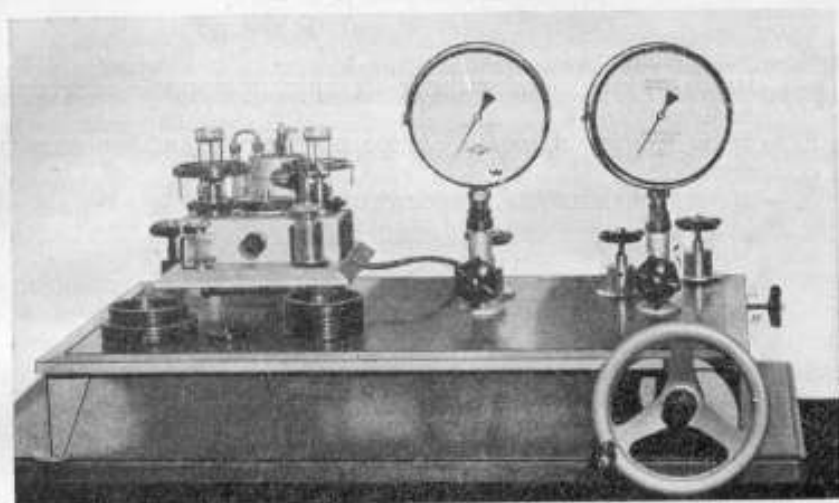


Рис. 1. Общий вид мановакуумметра МВП-2,5 со взаимно уравновешенными поршнями.

в «нулевые» положения, определяемые по соответствующим дискам. Мановакуумметр располагается на регулировочных винтах, позволяющих устанавливать по уровню колонку с дифференциальным поршнем.

В соответствии с основным назначением мановакуумметра (проверка образцовых пружинных манометров и вакуумметров) его выпускают в комплекте с воздушным прессом.

Принцип действия. Основные уравнения

Мановакуумметр является компенсационным прибором. Если при сообщении разделительного резервуара 3 (см. рис. 2) с атмосферой оба поршня были взаимно уравновешены и приведены в нулевые положения, то после сообщения его с пространством, в котором создано избыточное давление, равновесие нарушится, и для восстановления первоначального положения поршней на грузоприемный диск дифференциального поршня потребуется наложить определенное количество грузов. Величина давления определяется по формуле

$$P = \frac{m_1 g}{F_1} \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_c} \right), \quad (1)$$

- где P — измеряемое избыточное давление;
 m_1 — масса грузов, наложенных на грузоприемный диск дифференциального поршня;
 g — ускорение свободного падения тел;
 F_1 — приведенная (эффективная) площадь узкой части дифференциального поршня;
 ρ_w, ρ_c — соответственно плотность воздуха и материала грузов (стали).

Если разделительный резервуар сообщить с пространством, в котором создано разрежение, то поднимется простой поршень. Для восстановления равновесия в этом случае потребуется наложение грузов на диск простого поршня, а величина разрежения определится по формуле

$$P_1 = \frac{m_2 g}{F_1} \cdot \frac{F_2 - F_1}{F_3} \left(1 - \frac{\rho_v}{\rho_c} \right), \quad (2)$$

где P_1 — разрежение;

m_2 — масса грузов, наложенных на грузоприемный диск простого поршня;

F_2 — приведенная площадь широкой части дифференциального поршня;

F_3 — приведенная площадь простого поршня.

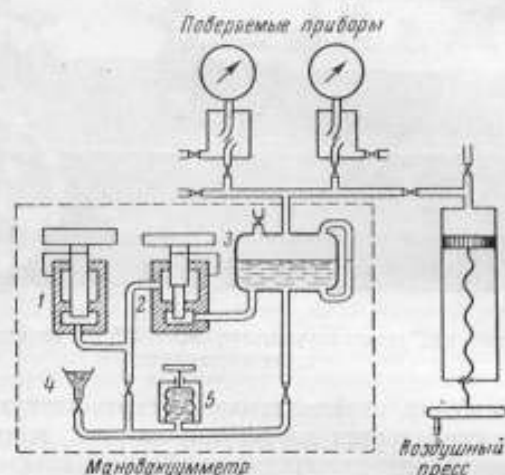


Рис. 2. Принципиальная схема мановакуумметра МВП-2,5.

1 и 2 — поршневые пары; 3 — резервуар; 4 — воронка; 5 — жидкостный пресс.

Чувствительность. Погрешность отсчета

Если чувствительность N мановакуумметра определять отношением перемещения ΔH одного из поршней, например дифференциального поршня, к изменению ΔP измеряемой величины, вызвавшей это перемещение, то, рассматривая, как это показано в работе [2], два положения равновесия при давлениях в резервуарах P и $P + \Delta P$, получим

$$N = \frac{\Delta H}{\Delta P} = \frac{1}{\left[\frac{(F_2 - F_1)(F_2 + F_3 - F_1)}{F_1 F_3} + \frac{F_1}{F_P} + 1 \right] (\gamma - \gamma_v)}, \quad (3)$$

где F_P — площадь горизонтального сечения резервуара;

γ, γ_v — соответственно удельный вес масла, заполняющего прибор, и воздуха.

При выводе формулы (3) предполагалось, что за время указанного перемещения поршня вытекание жидкости через зазоры внутри прибора было пренебрежимо мало, а масса поршней, грузоприемных дисков и наложенных на них грузов оставалась неизменной.

Выражение (3) позволяет оценить погрешность отсчета $\Delta P_{отсч}$, т. е. погрешность, вызываемую ошибкой определения положения поршня.

Если при определении нулевого положения поршня была допущена ошибка, равная ΔH_{\min} , то соответствующая ей абсолютная погрешность измерения, вызванная этой ошибкой, равна

$$\Delta P_{\text{отеч}} = \frac{\Delta H_{\min}}{N}. \quad (4)$$

Расход жидкости через зазоры

Расход жидкости Q из замкнутого пространства внутри прибора через зазоры между поршнями и кольцевыми выступами цилиндров представляет сумму трех расходов:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3,$$

где Q_1, Q_2, Q_3 — соответственно расходы жидкости через зазоры узкой части дифференциального поршня, его широкой части и через зазоры колонки с простым поршнем.

Пренебрегая давлением столбов жидкости, расположенных внутри прибора, имеем согласно [3]

$$Q_1 = \frac{\pi h_1^3 r_1}{6 \mu l_1} (P_0' - P_A); \quad (5)$$

$$Q_2 = \frac{\pi h_2^3 r_2}{6 \mu l_2} (P_0' - B); \quad (6)$$

$$Q_3 = \frac{\pi h_3^3 r_3}{12 \mu l_3} (P_0' - B); \quad (7)$$

где r_1, r_2 — радиусы узкой и широкой частей дифференциального поршня;

r_3 — радиус простого поршня;

h_1, h_2, h_3 — величина зазоров;

l_1, l_2, l_3 — ширина кольцевых выступов;

μ — динамическая вязкость жидкости;

P_0' — абсолютное давление в замкнутом пространстве прибора;

P_A — абсолютное давление в резервуаре;

B — атмосферное давление.

Вводя обозначение

$$\frac{\frac{h_1^3 r_1}{l_1} + \frac{h_2^3 r_2}{l_2} + \frac{h_3^3 r_3}{2l_3}}{\frac{h_1^3 r_1}{l_1}} = a, \quad (8)$$

можем написать

$$Q = \frac{\pi h_1^3 r_1}{6 \mu l_1} [a (P_0' - B) - (P_A - B)] \quad (9)$$

или, принимая во внимание формулу (5),

$$Q = Q_1 \frac{a (P_0' - B) - (P_A - B)}{P_0' - P_A}. \quad (10)$$

Из формулы (5) видно, что при $P_0' > P_A$ будет $Q_1 > 0$, т. е. в этом случае должно увеличиваться количество жидкости в резервуаре. Согласно формуле (9) при $P_A - B > a (P_0' - B)$ должно увеличиваться количество жидкости в замкнутом пространстве прибора, так как при этом $Q < 0$.

Для определения скорости опускания поршней следует рассмотреть два положения равновесия, соответствующие моментам времени t_1 и t_2 . Вытекание жидкости через зазоры вызовет за промежуток времени $\Delta t = t_2 - t_1$ изменения положения поршней (ΔH_1 и ΔH_2) и уровня жидкости в резервуаре (ΔH_3), а также изменение давления в резервуаре (ΔP), причем эти изменения должны удовлетворять условиям

$$\Delta P = \left[(\Delta H_1 - \Delta H_2) \frac{F_2 - F_1}{F_1} - (\Delta H_3 - \Delta H_1) \right] (\gamma - \gamma_0); \quad (11)$$

$$\Delta H_1 F_1 + \Delta H_3 F_P = Q_1 \Delta t; \quad (12)$$

$$\Delta H_1 (F_2 - F_1) + \Delta H_2 F_3 = -Q \Delta t; \quad (13)$$

$$\frac{\Delta P}{P_A} = \frac{\Delta H_3 F_P}{w}, \quad (14)$$

где w — сумма объемов воздуха в резервуаре и в замкнутом пространстве, с которым соединен резервуар.

Исключая из равенств (11) — (14) величины ΔP , ΔH_2 и ΔH_3 и принимая во внимание формулу (3), получим выражение для скорости опускания дифференциального поршня

$$V_1 = - \frac{\Delta H_1}{\Delta t} = \frac{\left(\frac{F_2 - F_1}{F_1 F_3} Q - \frac{1}{F_P} Q_1 \right) (\gamma - \gamma_0) - \frac{P_A Q_1}{w}}{\frac{1}{N} + \frac{P_A F_1}{w}}. \quad (15)$$

Скорость опускания простого поршня согласно формулам (13) и (15) равна

$$V_2 = - \frac{\Delta H_1}{\Delta t} = \frac{Q - (F_2 - F_1) V_1}{F_3}. \quad (16)$$

Оценка величин V_1 и V_2 при выборе параметров двухпоршневого мановакуумметра представляет практический интерес, так как при большом значении V_1 и V_2 будет затрудняться процесс измерения, а погрешность отсчета [см. формулу (4)] может стать соизмеримой с допустимой погрешностью прибора.

При работе с прибором всегда имеется возможность поддерживать неизменность положения дифференциального поршня при помощи воздушного пресса, а жидкостным прессом поддерживать постоянство количества жидкости в замкнутом пространстве прибора. Однако в течение некоторого времени t все же возникает погрешность измерения (ΔP_{yp}), вызванная изменением (ΔH_3) уровня жидкости в резервуаре.

Для определения погрешности, вызываемой изменением уровня жидкости в резервуаре, положим в уравнении (11)

$$\Delta H_1 = \Delta H_2 = 0,$$

тогда, принимая во внимание формулы (5) и (12), получим

$$\Delta P_{yp} = \frac{\pi R_1^3 r_1 (\gamma - \gamma_0) (P_0' - P_A)}{6 \pi d_1 F_P} t. \quad (17)$$

При оценке погрешности ΔP_{yp} величина $P_0' - P_A$ должна приниматься равной среднему значению разности давлений внутри прибора и в резервуаре за время t .

Влияние температуры окружающей среды на показания прибора

Если через F_1 , F_2 и F_3 обозначим величины приведенных площадей поршней мановакуумметра при температуре τ_0 , а F_1' , F_2' и F_3' — при температуре τ , то, полагая, что поршни и цилиндры изготовлены соответственно из одних и тех же материалов с коэффициентами расширения α_1 и α_2 , можем написать

$$F_1' = F_1 [1 + (\alpha_1 + \alpha_2)(\tau - \tau_0)]$$

и

$$\frac{F_2 - F_1}{F_3} = \frac{F_2' - F_1'}{F_3'}$$

Тогда для определения погрешности (δ_τ), вызываемой отклонением температуры прибора от нормальной ($\tau = 20^\circ\text{C}$), согласно формулам (1) и (2) получим

$$\delta_\tau = 100(\alpha_1 + \alpha_2)(\tau - \tau_0) \frac{F_1}{F_3} \quad (18)$$

Погрешность δ_τ при нормальных условиях эксплуатации мановакуумметра ($15^\circ\text{C} \leq \tau \leq 25^\circ\text{C}$) пренебрежимо мала и может не учитываться. Следует отметить, что у некоторых приборов с поршнем, уравновешенным столбом жидкости, может возникнуть погрешность измерения, вызванная изменением температуры жидкости в соединительной трубке за время между двумя уравновешиваниями. Эта погрешность при малых значениях измеряемой величины может стать соизмеримой с допустимой погрешностью измерения. В двухпоршневом мановакуумметре указанный недостаток исключен соответствующим расположением поршней и резервуара. Как показано в работе [2], для исключения влияния изменения температуры жидкости в приборе на его показания должно быть выполнено условие

$$\frac{F_2 - F_1}{F_1} = \frac{H_3 - H_1}{H_0 + H_1 - H_2} \quad (19)$$

где H_0 — высота узкой части дифференциального поршня;
 H_1 , H_2 — расстояния торцов дифференциального и простого поршня от некоторого начального уровня;
 H_3 — расстояние уровня жидкости в резервуаре от того же начального уровня.

Оценка динамических погрешностей

Во многих грузопоршневых измерительных приборах важное значение, определяющее некоторые эксплуатационные качества прибора, имеет инерционность поршневой системы во время уравновешивания. Поэтому при конструировании этих приборов выбор ряда параметров должен производиться с учетом зависимостей, определяющих движение поршней, и обеспечивать наибольшую скорость их уравновешивания.

Грузопоршневой мановакуумметр с двумя взаимно уравновешенными поршнями можно приближенно рассматривать как систему с одной степенью свободы, движение которой описывается известным дифференциальным уравнением второго порядка с постоянными коэффициентами

$$\ddot{x} + 2n\dot{x} + kx = 0 \quad (20)$$

Приближенные значения коэффициентов затухания n и собственной частоты k определяются следующими уравнениями:

$$n = \frac{\pi \omega_0}{m_{\text{пр}}} \left[\frac{l_1 r_1}{h_1} + \frac{l_2 r_2}{h_2} + \frac{2l_3 r_3}{h_3} \left(\frac{F_2 - F_1}{F_3} \right)^2 \right];$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{F_1}{m_{\text{пр}}} \left(\frac{1}{N} + \frac{P_A F_1}{w} \right)};$$

$$m_{\text{пр}} = m_2 + m_3 \left(\frac{F_2 - F_1}{F_3} \right)^2,$$

где $m_{\text{пр}}$ — приведенная масса;

m_2 — масса дифференциального поршня с грузоприемным диском и наложенных на него грузов;

m_3 — то же для простого поршня.

Легко показать, что для оценки относительной и абсолютной погрешностей, вызываемых неполным уравновешиванием системы в момент снятия показаний, могут быть применены следующие формулы.

Для случая $n < k$:

$$\delta_x \approx \frac{100 x_0}{NP e^{nt} \sqrt{1 - \frac{n^2}{k^2}}} \% \quad \text{и} \quad \Delta P_x \approx \frac{x_0}{N e^{nt} \sqrt{1 - \frac{n^2}{k^2}}}. \quad (21)$$

Для случая $n > k$:

$$\delta_x \approx \frac{100 x_0 \left(1 + \frac{n}{k_1} \right)}{2PN e^{(n-k_1)t}} \% \quad \text{и} \quad \Delta P_x \approx \frac{x_0 \left(1 + \frac{n}{k_1} \right)}{2N e^{(n-k_1)t}}, \quad (22)$$

где $k_1 = \sqrt{n^2 - k^2}$.

Формулы (21) и (22) могут быть применены также при выборе некоторых конструктивных параметров прибора, а также при определении минимальных промежутков времени t , для которых погрешности δ_x и ΔP_x не превысят допустимого значения.

Выбор конструктивных параметров

Приведенные выше соображения позволяют определить величины ряда конструктивных параметров (l , h и т. д.) при условии, если заданы приведенные площади поршней.

При выборе значений F_1 , F_2 и F_3 было принято во внимание, что существующие в настоящее время грузопоршневые манометры 2-го и 3-го разрядов (МП-2,5, МП-6, МП-60), работающие при невысоких давлениях, имеют приведенные площади поршней 1 см^2 и $0,5 \text{ см}^2$. Эти значения для указанной области измерения давления можно считать оптимальными. Кроме того, принято во внимание, что при взаимных сличениях манометров, имеющих одинаковые номинальные значения приведенных площадей, погрешность метода сличения будет минимальной. Поэтому номинальные значения приведенных площадей дифференциального и простого поршней были приняты равными:

$$F_1 = 0,5 \text{ см}^2; \quad F_2 = F_3 = 1 \text{ см}^2.$$

Масса поршней и грузоприемных дисков дифференциального и простого поршней выбраны равными соответственно 250 и 500 г, что обеспечило при выбранных значениях F_1 , F_2 и F_3 наименьшую величину P_0' [см. формулы (5) — (7)] и достаточную прочность.

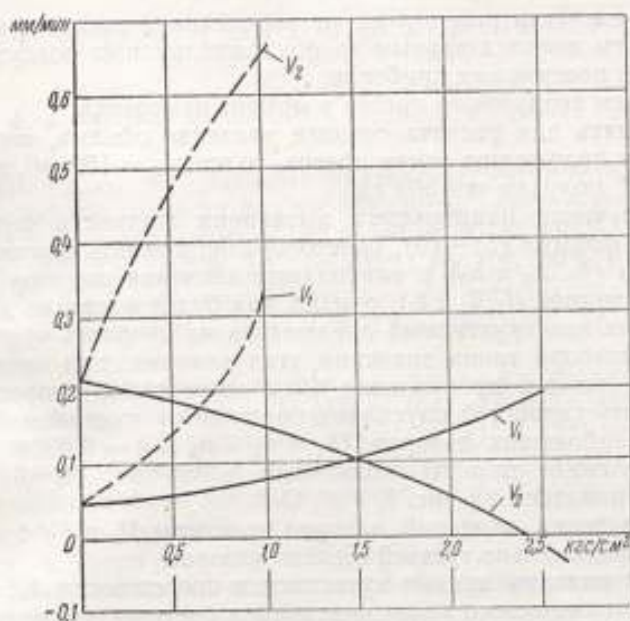


Рис. 3. Наибольшие скорости опускания поршей мановакуумметра (при $h=0,0004$ см).

--- при измерении разрежения; — при измерении избыточного давления.

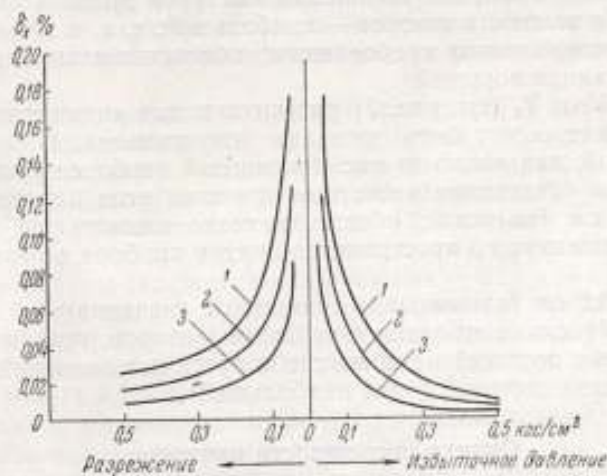


Рис. 4. Кривые динамических погрешностей.

1 — $l_1 = l_2 = l_3 = 0,5$ см, $h_1 = h_2 = h_3 = 0,0002$ см; 2 — $l_1 = 0,5$ см, $l_2 = l_3 = 0,2$ см, $h_1 = h_2 = h_3 = 0,0002$ см; 3 — $l_1 = 0,5$ см, $l_2 = l_3 = 0,2$ см, $h_1 = h_2 = h_3 = 0,0004$ см.

Максимальный объем воздушного пространства

$$\omega_{\max} = \omega_1 + \omega_2 + \omega_3,$$

где ω_1 — объем части резервуара, не заполненной жидкостью;

ω_2 — объем соединительных трубок, заполненных воздухом, и пружи поверяемых приборов;

ω_3 — объем воздушного пресса в момент измерения.

Если принять для расчета среднее значение объема, соответствующее среднему положению винта пресса, то при $\omega_1 = 150 \text{ см}^3$, $\omega_2 = 100 \text{ см}^3$ и $\omega_3 = 250 \text{ см}^3$ получим $\omega = 500 \text{ см}^3$.

Для обеспечения наименьшего вытекания жидкости через зазоры, как видно из формул (5) — (9), целесообразно принять наименьшие значения зазоров (h_1 , h_2 и h_3) и наибольшие значения ширины кольцевых выступов цилиндров (l_1 , l_2 и l_3), однако, как будет показано далее, влияние указанных конструктивных параметров на скорость уравнивания требует выбора таких значений этих величин, при которых уравнивание системы происходило бы с достаточной скоростью.

Зависимость скоростей опускания поршней от измеряемой величины для случая наибольших зазоров ($h_1 = h_2 = h_3 = h = 0,0004 \text{ см}$) и выбранных значений ширины кольцевых выступов ($l_1 = 0,5 \text{ см}$, $l_2 = l_3 = 0,2 \text{ см}$) показана на рис. 3.

При уменьшении значений зазоров величины V_1 и V_2 будут уменьшаться пропорционально третьей степени зазоров.

На рис. 4 показаны кривые зависимости погрешности δ_x , возникающей вследствие неполного уравнивания системы в момент t , принятый равным 10 сек. При построении кривых было принято $\omega = 500 \text{ см}^3$, $x_0 = 0,3 \text{ см}$ (половина свободного хода дифференциального поршня).

Кривые рис. 4 показывают, что для обеспечения минимальной инерционности прибора ширина кольцевых выступов должна быть выбрана наименьшей, а величина зазоров — наибольшей, т. е. в этом случае требования противоположны требованиям, обеспечивающим наименьшую скорость опускания поршней.

Значения V_1 и V_2 (см. рис. 3) рассчитаны для «наихудшего» случая, но, тем не менее, могут быть признаны допустимыми. При выбранных значениях l и h , как видно из рис. 4 кривые 3 наиболее приемлемы, поэтому приняты следующие расчетные значения этих параметров:

1) $l_1 = 0,5 \text{ см}$ (значение, обеспечивающее наименьшее перетекание жидкости из замкнутого пространства внутри прибора в резервуар и обратно);

2) $l_2 = l_3 = 0,2 \text{ см}$ (наименьшие возможные значения);

3) $h = 0,0004 \text{ см}$ (наибольшая величина зазоров, при которой скорости опускания поршней не превысят допустимых значений, а скорость уравнивания поршней будет наибольшей).

Оценка погрешности измерения

Зависимость погрешности измерения избыточного давления (δ_p) от погрешностей определения величин, входящих в формулу (1), согласно закону сложения случайных погрешностей может быть оценена по формуле

$$\delta_p = \sqrt{\delta_m^2 + \delta_g^2 + \delta_{F_1}^2 + \left(\frac{\gamma_n}{\gamma_c}\right)^2 (\delta_{\gamma_n}^2 + \delta_{\gamma_c}^2)}, \quad (23)$$

где δ_m , δ_g , δ_{F_1} , δ_{γ_n} и δ_{γ_c} — относительные погрешности величин m , g , F_1 , γ_n и γ_c .

Для определения погрешности измерения разрежения (δ_p) согласно формуле (2) получим аналогично

$$\delta_{p_i} = \sqrt{\delta_m^2 + \delta_g^2 + \delta_{F_1}^2 + \delta_{F_2}^2 + \left(\frac{\gamma_a}{\gamma_c}\right)^2 (\delta_{\gamma_a}^2 + \delta_{\gamma_c}^2)}, \quad (24)$$

где индекс $k_1 = \frac{F_2 - F_1}{F_3}$.

Принимая $\delta_m, \delta_g, \delta_{F_1}$ равными значениям, которые обычно принимаются при оценке точности других образцовых грузопоршневых приборов аналогичного назначения, т. е., полагая $|\delta_m| \leq 0,02\%$, $|\delta_g| \leq 0,01\%$, $|\delta_{F_1}| \leq 0,02\%$, $|\delta_{\gamma_a}| \leq 20\%$, $|\delta_{\gamma_c}| \leq 20\%$ и считая, что величина k_1 при разработанной методике ее определения может быть известна с погрешностью $|\delta_{k_1}| \leq 0,02\%$, получим $|\delta_p| < 0,04\%$ и $|\delta_{p_i}| < 0,04\%$.

При оценке погрешностей измерения давления и разрежения необходимо иметь в виду, что формулы (23) и (24) не учитывают погрешностей, определяемых формулами (4), (17), (18), (21) и (22). Однако при соответствующем выборе параметров прибора и в нормальных условиях его эксплуатации эти погрешности могут быть доведены до пренебрежимо малых значений.

Полагая в формуле (4) $\Delta H_{\min} \leq 0,02$ см (толщина риски) и $N \approx 500$ см³/кгс (значение, соответствующее выбранным значениям F_1, F_2, F_3 и F_p), получим $\Delta P_{\text{отеч}} \leq 0,4$ мм вод. ст., что при проверке манометра с верхним пределом измерения не менее 1 кгс/см² и при измерении разрежения составит не более 0,005% от верхнего предела измерения поверяемого прибора. Принимая во внимание, что допустимая погрешность образцовых пружинных манометров и вакуумметров составляет 0,16 ± 0,4% от верхних пределов измерения этих приборов, величиной $\Delta P_{\text{отеч}}$ можно пренебречь без ущерба для точности результатов проверки.

Для оценки погрешности $\Delta P_{\text{ур}}$ [см. формулу (17)], вызываемой изменением уровня жидкости в резервуаре за время t (между первым и вторым уравниваниями систем), примем во внимание, что при измерении избыточного давления 0 ÷ 2,5 кгс/см² величина $P_0' - P_A$, входящая в формулу (17), изменяется от +0,5 до -2,0 кгс/см², а при измерении разрежения — от +0,5 до +2,5 кгс/см². Поэтому, принимая средние значения этой величины соответственно равными -0,75 и +1,5 кгс/см² и полагая $h_1 = 0,0004$ см, $r_1 = 0,4$ см, $\gamma - \gamma_a \approx 1000$ дин/см³, $\mu \approx 0,2$ пз, $l_1 = 0,5$ см, $F_p = 50$ см² и $t = 3600$ сек, получим для случая измерения избыточного давления $\Delta P_{\text{ур}} = -0,07$ мм вод. ст. и для измерения разрежения $\Delta P_{\text{ур}} = 0,14$ мм вод. ст.

Легко видеть, что погрешностью $\Delta P_{\text{ур}}$ в рассмотренных случаях применения мановакуумметра можно пренебречь.

Для определения погрешности, вызываемой отклонением температуры от нормальной, положим $15^\circ\text{C} \leq \tau \leq 25^\circ\text{C}$. Тогда, полагая $\alpha_1 = 1 \cdot 10^{-5}$ и $\alpha_2 = 2 \cdot 10^{-5}$, согласно формуле (18) получим $|\delta_\tau| \leq 0,015\%$. Этот результат указывает на возможность применения мановакуумметра при температуре окружающей среды в пределах 15—25°С без введения поправок на температуру.

Для оценки погрешности, вызываемой неполным уравниванием системы в момент снятия показаний, можно воспользоваться кривой β на рис. 4. Легко видеть, что погрешность δ_c во всем диапазоне измерений пренебрежимо мала и лишь при малых значениях измеряемой вели-

чины относительная погрешность может оказаться одного порядка с допустимой погрешностью прибора. Поэтому в случае измерения небольших давлений и разрежений продолжительность уравнивания должна несколько увеличиваться (до 15—20 сек), что обеспечит достаточно полное уравнивание системы.

Методика испытаний

Приведенные площади поршней мановакуумметра могут быть определены методом взаимного сличения каждой поршневой колонки мановакуумметра с грузопоршневым манометром типа МП-6 1-го разряда. Однако такой способ требует разборки прибора. Кроме того, в этом случае необходимо строго соблюдать вертикальность обоих поршней в момент определения их площадей и во время эксплуатации, причем последнее потребует некоторого усложнения конструкции.

В целях упрощения методики определения приведенных площадей применяется способ, не требующий разборки прибора и исключающий необходимость строгой установки по уровню одновременно обоих колонок.

Определение F_1 производится путем подключения мановакуумметра к образцовому манометру с уравновешенным поршнем типа МП-2,5 1-го разряда, при сличении с которым средней, передающей давление, является воздух. Для определения отношения $\frac{F_2 - F_1}{F_3}$ [см. формулу (2)]

нет необходимости отдельно определять величины F_1 , F_2 и F_3 . Это отношение находится непосредственно путем взаимного уравнивания обоих поршней при различных нагрузках (без разборки прибора). При этом резервуар мановакуумметра сообщается с атмосферой. При условии предварительного уравнивания ненагруженных поршней отношение $\frac{F_2 - F_1}{F_3}$ равно отношению соответствующих нагрузок на поршни.

Для определения зазоров может быть применен гидродинамический метод. По ряду соображений это определение целесообразно производить также без разборки прибора. Для исключения ошибок, вызываемых неполным уравниванием поршней при определении скорости опускания того или иного поршня, второй поршень должен занимать крайнее верхнее или крайнее нижнее положение (путем соответствующей недогрузки или перегрузки).

Если дифференциальный поршень этим путем установлен в крайнее верхнее положение, то расход Q [см. формулу (9)] будет компенсироваться опусканием (или поднятием) лишь одного простого поршня. Скорость опускания простого поршня в этом случае может быть выражена формулой

$$V \approx \frac{Q}{\pi r_3^2}. \quad (25)$$

Принимая во внимание формулы (5) — (7), формула (25) может быть записана в виде

$$V = \frac{1}{6\mu} \left[\frac{h_1^3 r_1}{l_1 r_3^2} (P_0 - P_A) + \left(\frac{h_2^3 r_2}{l_2 r_3^2} + \frac{h_3^3}{2l_3 r_3} \right) (P_0 - B) \right]. \quad (26)$$

Величина зазора h_1 определяет перетекание жидкости из пространства внутри прибора в резервуар и обратно. Величины зазоров h_2 и h_3 определяют остальную часть суммарного расхода Q . Поэтому, в целях

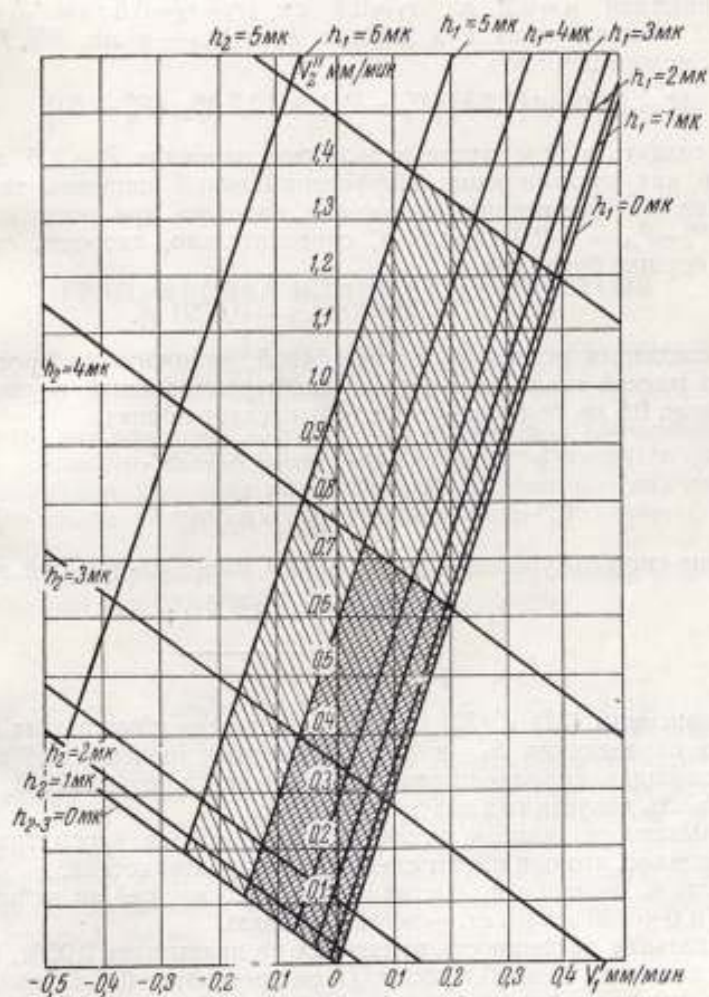


Рис. 5. Номограмма для определения зазоров гидродинамическим методом.

Штриховка клеткой — для мановакуумметров, выходящих из производства;
 косая штриховка — для мановакуумметров, находящихся в применении.

упрощения рассуждений, для расчетов можно принять некоторую среднюю величину (h_{2-3}), соответствующую выражению

$$h_{2-3} = \sqrt[3]{\frac{\frac{h_2^3 r_2}{l_2} + \frac{h_3^3 r_3}{2l_3}}{\frac{r_2}{l_2} + \frac{r_3}{2l_3}}}, \quad (27)$$

тогда, принимая $\mu=0,2$ пз, $r_1=0,4$ см, $r_2=r_3=0,6$ см, $l_1=0,5$ см, $l_2=l_3=0,2$ см и выражая V в мм/мин, h_1 и h_{2-3} — в мк, P'_0, P_A и B — в кгс/см², можем написать

$$V = 0,00048 [2,2 h_1^3 (P'_0 - P_A) + 12,5 h_{2-3}^3 (P'_0 - B)]. \quad (28)$$

Если создать в резервуаре избыточное давление $P = 2,5$ кгс/см² и нагрузить, как указано выше, дифференциальный поршень так, чтобы он занимал крайнее верхнее положение, находясь при этом во вращении, то $P'_0 - P_A \approx -2,0$ кгс/см² и, следовательно, скорость опускания простого поршня будет равна:

$$V' = V = 0,0030 h_{2-3}^3 - 0,0021 h_1^3. \quad (29)$$

Если соединить резервуар с атмосферой, наложить на простой поршень груз массой около 1,1 кг, а на дифференциальный поршень груз массой около 0,5 кг, то в уравнении (28) следует принять

$$P'_0 - P_A = P'_0 - B = 1,6 \text{ кгс/см}^2,$$

тогда

$$V'' = V = 0,0096 h_{2-3}^3 + 0,0017 h_1^3. \quad (30)$$

Решение системы уравнений (29) и (30) имеет следующий вид:

$$h_1 = \sqrt[3]{120(V'' - 3,2 V')}; \quad (31)$$

$$h_{2-3} = \sqrt[3]{4(21 V'' + 17 V')}. \quad (32)$$

По уравнениям (31) и (32) на рис. 5 построена номограмма для графического определения h_{2-3} и h_1 при известных значениях V' и V'' . На графике площадь параллелограмма, отмеченного штриховкой, ограничивает область допустимых значений зазоров.

Исчерпывающее опытное исследование приборов рассматриваемого типа установило, что они имеют следующие характеристики.

1. Пределы измерения составляют $0 \div 2,5$ кгс/см² по избыточному давлению и $0 \div 760$ мм рт. ст. — по разрежению.

2. Предельная погрешность измерения не превышает 0,05%, если измеряемая величина более 0,1 кгс/см², и не превышает 0,5 мм вод. ст. при значениях измеряемой величины менее 0,1 кгс/см².

Таким образом, эти приборы могут применяться для поверочных работ, упомянутых в начале статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Граменицкий В. Н., Образцовые манометрические приборы с уравновешенным поршнем, Труды ВНИИК, вып. 4, 1960, стр. 111.
2. Граменицкий В. Н., Принцип уравновешенного поршня в приборах для измерения давления, Диссертация, М., 1958.
3. Жоховский М. К., Теория и расчет приборов с неуплотненным поршнем, М., 1959.

Поступила в редакцию
5/IV 1960 г.

Е. Ф. ДОЛИНСКИЙ
вним

ГРАДУИРОВКА И ПОВЕРКА РЕОМЕТРОВ

Статья дает описание методики градуировки диафрагменных и капиллярных реометров на веществах-заменителях.

Реометр, как известно, представляет прибор для измерения расхода газа или жидкости, являющийся объединением сужающего устройства с дифманометром. Сужение может быть выполнено по типу диафрагмы или в виде капилляра относительно большой по сравнению с его диаметром длины.

Величина измеряемого расхода для реометра с диафрагмой определяется обычной для сужающих устройств формулой

$$Q = \alpha F \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho}} \quad (1)$$

Существенное отличие реометра от нормализованных сужающих устройств, сопел и диафрагм заключается в том, что первый из них требует индивидуальной градуировки. Это объясняется практической невозможностью дать значения коэффициента расхода даже для однотипных реометров и, кроме того, невозможностью (во всяком случае, для стеклянных реометров) определить с приемлемой точностью величину площади сечения F . Вследствие этого раздельное определение величин α и F также оказывается невозможным и потому уравнение измерения следует писать в форме

$$Q = \beta \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho}} \quad (2)$$

где β — коэффициент, являющийся функцией числа Рейнольдса

$$\beta = f(\text{Re}).$$

Для заданных реометра, а также газа или жидкости этот коэффициент будет, очевидно, функцией только расхода,

$$\beta = f(Q),$$

так как вязкость и плотность вещества, а также диаметр не будут меняться.

Градуировка или поверка реометра на газе или жидкости, для измерения которых он предназначен, не представляет никаких принципиальных затруднений; для этой цели достаточно присоединить реометр к об-

разцовый установке, позволяющей с достаточной точностью измерять расход, и провести измерения на ряде расходов, охватывающих шкалу прибора. Результаты этих измерений дадут таблицу сопряженных значений величин Δp_i и Q_i . Далее можно построить график зависимости расхода Q от перепада давлений, затем рассчитать и нанести именованную шкалу расхода.

Проверка реометра в этом случае еще более проста. Она заключается лишь в сравнении значений расходов указанных реометров со значениями тех же расходов, полученных измерениями на образцовой установке, и последующей оценке погрешностей реометра.

Однако этот наиболее благоприятный случай не может считаться общим. Реометры могут предназначаться для измерения расходов разнообразных жидкостей и газов. Некоторые из них могут отличаться вредными для здоровья свойствами, другие могут быть дефицитными или дорогостоящими. В связи с этим возникает задача о градуировке и проверке реометров на веществах-заменителях.

Существо этой задачи состоит в том, чтобы по зависимости

$$Q_0 = \beta_0 \sqrt{\frac{2 \Delta p_0}{\rho_0}} \quad (3)$$

для вещества-заменителя найти зависимость (2) для заданного вещества.

Выше упоминалось, что коэффициент β , а следовательно, и β_0 являются функциями числа Рейнольдса $\frac{vd}{\nu}$. Но для данного реометра диаметр его сужения d не изменен, поэтому его коэффициент β будет функцией $\frac{v}{\nu}$ или, что равносильно, функцией отношения $\frac{Q}{\nu}$. Это обстоятельство приводит к заключению, что $\beta = \beta_0$ при условии

$$\frac{Q}{\nu} = \frac{Q_0}{\nu_0} \quad (4)$$

Условие (4) указывает два возможных способа градуировки и проверки реометров на веществах-заменителях.

Первый из них основан на следующих соображениях. Если объединить в систему уравнения (2), (3), (4), то, принимая во внимание равенство $\beta = \beta_0$, получим

$$\left. \begin{aligned} \Delta p &= \Delta p_0 \frac{\nu^2}{\nu_0^2} \cdot \frac{\rho}{\rho_0} \\ Q &= Q_0 \frac{\nu}{\nu_0} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Измерения на веществе-заменителе позволяют построить график зависимости между Δp_0 и Q_0 . Подстановка значений этих величин, снятых с упомянутого графика, в правые части уравнений (5), при заданных ν , ν_0 , ρ , ρ_0 , дает возможность рассчитать сопряженные значения Δp и Q , построить график их зависимости и поверить или рассчитать и нанести именованную (в единицах расхода заданного газа или жидкости) шкалу расхода заданного вещества с плотностью ρ и кинематической вязкостью ν .

Для того чтобы охватить всю шкалу перепада давлений реометра, необходимо, чтобы

$$\frac{\nu^2}{\nu_0^2} \cdot \frac{\rho}{\rho_0} > 1, \quad (6)$$

так как только при этом условии можно получить Δp , соответствующее максимальному значению шкалы реометра. Однако не следует, чтобы эта величина значительно (например, в полтора и более раза) превышала единицу, так как тогда относительно малые значения Δp придется вычислять по очень малым значениям Δp_0 и потому точность нижней части шкалы реометра может оказаться недостаточной. Иногда поэтому рационально произвести измерения на двух веществах-заменителях. Одно из них, у которого величина

$$\frac{v^2}{v_0^2} \cdot \frac{\rho}{\rho_0} < 1, \quad (7)$$

даст возможность рассчитать нижнюю часть именованной шкалы, а второе, у которого та же величина больше единицы, позволит довести шкалу до Δp_{\max} .

Второй из упомянутых выше способов основан на построении графика зависимости

$$\beta = f\left(\frac{Q}{v}\right). \quad (8)$$

Этот график до необходимого верхнего предела $\left(\frac{Q}{v}\right)_{\max}$ можно получить по результатам испытаний реометра на образцовой расходомерной установке при измерениях на одном или нескольких веществах-заменителях.

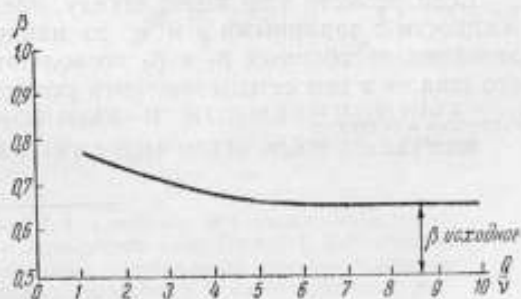


График зависимости коэффициента β от величины $\frac{Q}{v}$.

Построенный график (см. рисунок) позволяет рассчитать шкалу расхода для любого вещества, которое будет протекать через реометр. Для этой цели, зная v , задаются значениями Q и подсчитывают отношение $\frac{Q}{v}$. Далее, по графику находят β , соответствующие упомянутым отношениям $\frac{Q}{v}$. Затем по формуле

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho \frac{Q^2}{v^5} \quad (9)$$

рассчитывают значения Δp , соответствующие выбранным значениям Q . После этого можно построить график зависимости Q от Δp для заданного вещества.

Следует заметить, что значение β , соответствующее горизонтальному участку графика зависимости β от $\frac{Q}{v}$, равно $\beta_{\text{нск}}$, аналогично исходному коэффициенту расхода для нормализованных сужающих устройств.

Зависимость между расходом и перепадом давлений для капиллярных реометров можно представить* в виде

$$\Delta p = \beta_1 \tau_1 Q + \beta_2 \rho Q^2, \quad (10)$$

* Handbuch d. Technischen Betriebskontrolle II, Mengmessungen in Betrieb, Leipzig, 1955, S. 437—441.

откуда следует

$$\frac{\Delta p}{\eta Q} = \beta_1 + \beta_2 \frac{\rho Q}{\eta}, \quad (11)$$

где η — динамическая вязкость.

Результаты испытания реометра на образцовой установке на веществах-заменителях дают возможность построить график линейной зависимости между величинами $\frac{\rho Q}{\eta}$ и $\frac{\Delta p}{\eta Q}$. Этот график позволяет найти постоянные испытуемого реометра β_1 и β_2 , которые независимы от рода протекающего вещества.

Значения этих постоянных дают возможность рассчитать и далее нанести шкалу реометра для заданной жидкости по известным для нее ρ и η , т. е. проградуировать реометр.

Если реометр уже имеет шкалу, предназначенную для определенной жидкости с заданными ρ и η , то найденные при испытании реометра значения постоянных β_1 и β_2 позволяют произвести поверочный расчет его шкалы и тем самым поверить реометр.

Поступила в редакцию
12/XII 1961 г.

М. И. ДРИГА, А. В. ЕРЮХИН
вним

СЛИЧЕНИЕ КОМПРЕССИОННЫХ И ИОНИЗАЦИОННЫХ МАНОМЕТРОВ С ТЕРМОМОЛЕКУЛЯРНЫМ МАНОМЕТРОМ

Описана измерительная установка для сличения различных манометров с термомолекулярным образцовым манометром типа ТММП-1. Рассмотрена методика обработки результатов сличения, позволяющая определять средние квадратичные погрешности сличаемых манометров и систематические расхождения их показаний.

Для измерения высокого вакуума на производстве и в лабораториях наиболее широкое применение получили ионизационные вакуумметры типа ВИ-3 с пределами измерения $10^{-3} \div 10^{-7}$ мм рт. ст. В ряде случаев эти приборы служат и в качестве образцовых для градуировки по ним других электроразрядных манометров.

Прибор ВИ-3 снабжен стандартной шкалой, соответствующей линейной зависимости между ионным током манометрической лампы ЛМ-2 и измеряемым давлением. Постоянную этой зависимости определяют для типового прибора данной серии путем выборочной градуировки манометрических ламп по образцовому компрессионному манометру. Для приборов ВИ-3, применяемых в качестве образцовых, манометрические лампы подвергают индивидуальной градуировке.

Существующие компрессионные манометры позволяют производить градуировку ионизационных манометров только в пределах $10^{-3} \div 5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст., т. е. в той области давлений, где компрессионные манометры дают наименее точные показания. Расширение пределов измерения в область более низких давлений наталкивается на большие трудности.

В то же время существенный интерес представляет исследование дополнительных погрешностей ионизационных манометров, обусловленных поглощением газа в лампе, изменением состава газа, газоотделением электродов и т. п. Все эти погрешности должны быть хорошо заметны при низких давлениях (10^{-5} мм рт. ст. и ниже). В связи с этим для исследования ионизационных манометров был применен образцовый термомолекулярный манометр, имеющий более низкий предел измерения, чем компрессионные манометры, и свободный от погрешностей, свойственных ионизационным манометрам.

Термомолекулярный поршневой манометр ТММП-1 с измеритель-

ным механизмом типа микровесов и поршнем, представляющим собой систему дисков-экранов, был создан во ВНИИМ в 1956 г.*

Постоянная манометра была определена путем расчета по уравнению измерения. Кроме того, его постоянную оценили по результатам сравнительных измерений давления $10^{-4} \div 5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. рассматриваемым прибором и тремя компрессионными манометрами. Результаты сличений были обработаны по способу наименьших квадратов. Соотношения между показаниями компрессионных манометров $p_{ки}$ и термомолекулярного манометра $p_{тв}$ могут быть представлены в следующем виде:

$$p_{ки} = a_i p_{тв},$$

здесь a_i — постоянный коэффициент;
 i — номер компрессионного манометра;
 v — порядковый номер сличения.

При отсутствии систематических расхождений $a_i = 1$. По способу наименьших квадратов

$$a_i = \frac{\sum_{v=1}^n p_{киv} - p_{тв}}{\sum_{v=1}^n p_{тв}^2}; \quad S_{(a)}^2 = \frac{\sum_{v=1}^n (p_{киv} - a_i p_{тв})^2}{(n-1) \sum_{v=1}^n p_{тв}^2}.$$

Таблица 1

Статистические характеристики параметров	№ компрессионных манометров		
	1	2	3
a_i	0,97	1,07	1,00
S^2	$5,7 \cdot 10^{-4}$	$7,6 \cdot 10^{-4}$	$5,4 \cdot 10^{-4}$
S	0,02	0,03	0,02
$3S$	0,06	0,09	0,06

Результаты вычислений представлены в табл. 1. Полученные значения a_i и средних квадратичных погрешностей S позволяют считать, что при данном методе сличения для всех трех компрессионных манометров значение a_i попадает в 99,73%-ный интервал доверительной вероятности, и, следовательно, разброс значений a_i относительно единицы обусловлен только случайными причинами, а не систематическими погрешностями.

Случайный разброс был в данном случае обусловлен главным образом низкой точностью компрессионных манометров в указанных пределах измерения. Поэтому оценить отдельно случайные погрешности термомолекулярного манометра не представлялось возможным.

Сличения вакуумметров ВИ-3 с прибором ТММП-1 были произведены на измерительной установке, предназначенной для поверок различных манометров по манометру ТММП-1. Схема соединений элементов вакуумной системы этой установки приведена на рисунке.

* Дрига М. И., Новая конструкция абсолютного манометра, «Измерительная техника», № 4, 1957, стр. 47.

Для удаления влаги из вакуумной системы установки была предусмотрена многократная промывка ее воздухом, напускаемым через осушитель с фосфорным ангидридом. В результате удаления влаги и действия ловушек в вакуумной системе создавалась газовая смесь, обычно называемая «сухой воздух».

Давление в вакуумной системе изменяли ступенями с помощью крана-натекателя. Измерение давления производили термомолекулярным и ионизационными манометрами одновременно. Температура воздуха, окружавшего приборы, находилась в пределах $20 \pm 2^\circ \text{C}$. Перед выполнением сличений ионизационные манометры подвергались трени-

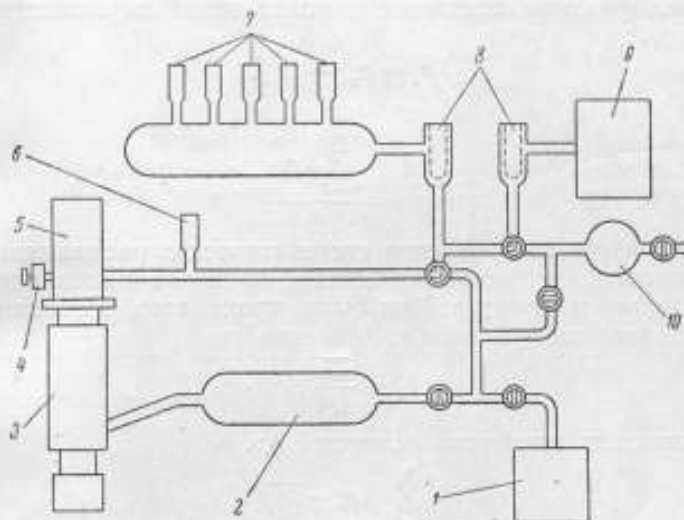


Схема измерительной установки.

1 — форвакуумный насос; 2 — форвакуумный баллон; 3 — диффузионный насос типа ММ-40; 4 — кран-натекатель; 5 — ловушка-отражатель диффузионного насоса; 6 — манометрическая лампа ЛМ-2; 7 — манометрическая лампа ЛМ-2; 8 — ловушки, охлажденные жидким азотом; 9 — термомолекулярный манометр ТММП-1; 10 — осушитель.

ровке в течение 40 ч путем прогрева катодов и сеток, а также длительной работы при обычном электрическом режиме и откачке диффузионным насосом.

С термомолекулярным манометром ТММП-1 были сличены пять ионизационных вакуумметров типа ВИ-3 при номинальных значениях давлений $9 \cdot 10^{-5}$, $6 \cdot 10^{-5}$, $3 \cdot 10^{-5}$, $9 \cdot 10^{-6}$, $6 \cdot 10^{-6}$, $3 \cdot 10^{-6}$ и $9 \cdot 10^{-7}$ мм рт. ст. Всего было сделано при каждом номинальном давлении по 20 сличений. Обработка результатов сличений была произведена методами математической статистики.

В качестве исследуемых величин были взяты разности между показаниями каждого из ионизационных и термомолекулярного манометров, так как истинное значение измеряемого давления при повторении сличений не могло оставаться строго постоянным. Средние значения этих разностей должны были характеризовать систематические расхождения между сличаемыми манометрами (при отсутствии последних они должны были стремиться к нулю), а дисперсии — суммарные случайные погрешности ионизационного и термомолекулярного манометров. Все применявшиеся ионизационные вакуумметры были однотипны, поэтому имелись основания полагать, что все пять разностей должны

принадлежать к одной генеральной совокупности и, следовательно, характеризуются одинаковыми параметрами распределения.

Для выяснения справедливости этой гипотезы был проведен дисперсионный анализ, который показал, что указанные разности принадлежат к разным совокупностям (критерий F оказался значительно больше табличных значений). Причина этого заключалась в том, что между показаниями ионизационных манометров имели место систематические расхождения. Поэтому оценить значения суммарных дисперсий таким способом было нельзя. Тогда были найдены средние из показаний пяти ионизационных манометров p_{iv} , и в качестве исследуемых величин взяты разности между этими средними и показаниями термомолекулярного манометра p_{tv} :

$$\Delta p_v = p_{iv} - p_{tv}.$$

Средние

$$\bar{\Delta p} = \frac{\sum_{v=1}^n \Delta p_v}{n}$$

показывали абсолютные значения систематических расхождений между средними из показаний ионизационных манометров и показаниями термомолекулярного манометра. Они были, кроме того, выражены в процентах к номинальному значению давления $[p]$:

$$\delta_0 = \frac{\bar{\Delta p}}{[p]}.$$

Были вычислены дисперсии разностей Δp_v

$$S^2 = \frac{\sum_{v=1}^n (\Delta p_v - \bar{\Delta p})^2}{n-1},$$

характеризовавшие суммарные случайные погрешности измерения термомолекулярного манометра и среднего из результатов пяти одновременных измерений ионизационными манометрами. Соответствующие относительные средние квадратичные погрешности S_0 были выражены в процентах к номинальному значению измеряемого давления.

Для того чтобы исключить из вычисленного значения дисперсии S^2 часть, обусловленную случайными погрешностями ионизационных манометров, те же исходные данные были применены для вычисления средних значений дисперсий этих приборов. Были вычислены разности показаний всех возможных попарных сочетаний ионизационных манометров

$$\Delta p_{ijv} = p_{iv} - p_{jv},$$

где $i \neq j$ — номера сличаемых ионизационных манометров.

Далее найдено

$$\bar{\Delta p}_{ij} = \frac{\sum_{v=1}^n \Delta p_{ijv}}{n}.$$

Среднее значение дисперсии одного ионизационного манометра было вычислено в предположении, что дисперсии всех пяти манометров одинаковы

$$S_{n1}^2 = \frac{\sum_{i=1}^4 \sum_{j=i+1}^5 \sum_{v=1}^n (\Delta p_{ijv} - \bar{\Delta p}_{ij})^2}{C_5^2 (n-1)^2},$$

здесь C_5^2 — число сочетаний, равное числу всех возможных разностей показаний сличаемых ионизационных манометров.

Дисперсия результата одновременного измерения давления пятью ионизационными манометрами (т. е. дисперсия $p_{нв}$).

$$S_{нв}^2 = \frac{S_{н1}^2}{5}.$$

Зная $S_{нв}^2$ и суммарную дисперсию S^2 , можно вычислить дисперсию, характеризующую только случайные погрешности термомолекулярного манометра

$$S_{т}^2 = S^2 - S_{нв}^2.$$

Результаты вычислений приведены в табл. 2, где даны также соответствующие указанным дисперсиям относительные средние квадратичные погрешности, выраженные в процентах к номинальному значению давления p .

Таблица 2

Статистические характеристики погрешностей	Номинальное значение измеряемого давления, мм рт. ст.						
	$9 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$9 \cdot 10^{-7}$
$\bar{\Delta p}$, мм рт. ст. . . .	$7,4 \cdot 10^{-6}$	$3,3 \cdot 10^{-6}$	$2,0 \cdot 10^{-6}$	$3,5 \cdot 10^{-7}$	$1,2 \cdot 10^{-7}$	$0,7 \cdot 10^{-7}$	$1,9 \cdot 10^{-8}$
$\bar{\xi}_0$, %	8,2	5,5	6,7	3,9	2,0	2,3	2,1
S^2 , мм ² рт. ст.	$8,5 \cdot 10^{-12}$	$5,0 \cdot 10^{-12}$	$0,53 \cdot 10^{-12}$	$15,5 \cdot 10^{-14}$	$5,6 \cdot 10^{-14}$	$2,4 \cdot 10^{-14}$	$43,0 \cdot 10^{-16}$
S_0 , %	3,2	3,7	2,4	4,4	3,9	5,2	7,3
$S_{н1}^2$, мм ² рт. ст.	$6,5 \cdot 10^{-12}$	$4,3 \cdot 10^{-12}$	$1,0 \cdot 10^{-12}$	$11,3 \cdot 10^{-14}$	$3,6 \cdot 10^{-14}$	$1,7 \cdot 10^{-14}$	$18,5 \cdot 10^{-16}$
$S_{н10}$, %	2,8	3,5	3,3	3,8	3,2	4,4	4,8
$S_{н5}^2$, мм ² рт. ст.	$1,3 \cdot 10^{-12}$	$0,83 \cdot 10^{-12}$	$0,20 \cdot 10^{-12}$	$2,3 \cdot 10^{-14}$	$0,72 \cdot 10^{-14}$	$0,34 \cdot 10^{-14}$	$3,7 \cdot 10^{-14}$
$S_{н50}$, %	1,3	1,6	1,5	1,7	1,4	1,9	2,1
$S_{т}^2$, мм ² рт. ст.	$7,2 \cdot 10^{-12}$	$4,1 \cdot 10^{-12}$	$0,33 \cdot 10^{-12}$	$13,2 \cdot 10^{-14}$	$4,9 \cdot 10^{-14}$	$2,1 \cdot 10^{-14}$	$39,0 \cdot 10^{-16}$
$S_{т0}$, %	3,0	3,4	1,9	4,0	3,7	4,8	6,9

Из табл. 2 видно, что:

1) при давлении 10^{-4} мм рт. ст. средние значения показаний пяти приборов ВИ-3 больше показаний прибора ТММП-1 на 8,2%;

2) систематическое расхождение показаний пяти приборов ВИ-3 и прибора ТММП-1 имеет максимальное значение при давлениях 10^{-4} — 10^{-5} мм рт. ст., уменьшается с понижением измеряемого давления и достигает значения 2—3% при давлении порядка 10^{-6} мм рт. ст.;

3) средние квадратичные значения случайных погрешностей каждого прибора ВИ-3 ($S_{\text{н10}}$) и прибора ТММП-1 ($S_{\text{т10}}$) одинаковы и не превышают 5—6%.

Таким образом, в результате сличений были установлены систематические расхождения показаний ТММП-1 и группы приборов ВИ-3, причем показания группы приборов ВИ-3 оказались больше показаний ТММП-1. Это расхождение можно объяснить тем, что постоянная приборов ВИ-3 больше расчетного значения ее в среднем на 8%; при этом условии поглощение газа в ионизационных манометрах должно вызвать уменьшение показаний их с уменьшением измеряемого давления и, следовательно, уменьшение расхождений между сличаемыми приборами с уменьшением измеряемого давления, что и было подтверждено экспериментально.

Поступила в редакцию
26/V 1961 г.

А. В. ЕРЮХИН

ВНИИМ

ПРИМЕНЕНИЕ ИОНИЗАЦИОННЫХ МАНОМЕТРОВ В КАЧЕСТВЕ ОБРАЗЦОВЫХ ПРИБОРОВ

Выведено уравнение измерения ионизационного манометра с накалимым катодом. Рассмотрены условия, при выполнении которых возможна градуировка ионизационного манометра по образцовому компрессионному манометру и допустима линейная экстраполяция градуировочной кривой в область более низких давлений. Приведены результаты исследований опытного образца ионизационного манометра, пригодного для применения в качестве образцового.

Пределы измерения низких абсолютных давлений в заводской и научно-исследовательской практике составляют $100 \div 10^{-12}$ мм рт. ст. Применяемые теплоразрядные и электроразрядные вакуумметры требуют градуировки или поверки по образцовым приборам.

Условие взаимозаменяемости двух основных частей вакуумметров — манометрических ламп (обычно называемых просто манометрами) и измерительных блоков — приводит к необходимости их раздельной поверки. Измерительные блоки могут быть поверены на образцовой электрической установке [1, 2], манометрические же лампы требуют поверки на вакуумной установке по образцовым манометрам.

В пределах измерений от нескольких миллиметров до 10^{-4} — 10^{-5} мм рт. ст. образцовыми приборами являются компрессионные манометры. Попытки довести нижний предел измерений этих манометров до 10^{-6} — 10^{-8} мм рт. ст. сопровождаются значительными осложнениями конструкции при одновременном понижении точности измерений. Недостаточно изученные физические явления, имеющие место в компрессионных манометрах при высоком и сверхвысоком вакууме, не позволяют с уверенностью утверждать, что показания этих манометров при давлении ниже 10^{-5} мм рт. ст. свободны от систематических ошибок.

Образцовыми приборами для давлений $10^{-4} \div 10^{-7}$ мм рт. ст. могут служить термомолекулярные манометры, постоянные которых определяются измерениями ряда параметров и последующим расчетом. Однако сложность конструкции и методические трудности препятствуют широкому применению этих манометров в лабораторной практике и поверочном деле.

Поверка рабочих манометров в диапазоне давлений ниже $10^{-4} \div 10^{-5}$ мм рт. ст., таким образом, встречает серьезные затруднения.

В качестве образцового прибора для указанной области измерений может быть применен неабсолютный манометр с верхним пределом измерений $10^{-3} \div 10^{-4}$ мм рт. ст. Этот манометр должен быть проградуирован по существующим образцовым абсолютным приборам в диапазоне $10^{-3} \div 10^{-5}$ мм рт. ст. и допускать экстраполяцию градуировочной кривой в область возможно более низких давлений.

Из большого числа различных электроразрядных манометров, применяемых для измерений высокого и сверхвысокого вакуума, упомянутым условиям наиболее полно удовлетворяет ионизационный манометр с накаливаемым катодом.

Уравнение измерения ионизационного манометра может быть выведено из следующего основного соотношения [3—5]:*

$$I_i = p I_e A b \sum_{j=1}^m \int_{l_j} \alpha_j E(U) dl_j = p I_e K_T, \quad (1)$$

здесь I_i — заряд всех положительных ионов, образуемых в единицу времени в рабочем пространстве манометра;

p — давление в объеме манометра;

I_e — ток первичных электронов (электронов, производящих ионизацию);

A — среднее число пролетов электрона в рабочем пространстве;

b — коэффициент, учитывающий зависимость длины пробега электрона от температуры;

$E(U)$ — эффективность ионизации, т. е. число положительных ионов, образуемых электроном, имеющим скорость, соответствующую потенциалу U , на 1 см пути при давлении 1 мм рт. ст. и температуре 0°C .

Функция $E(U)$ различна для разных газов [6]. Потенциал U точек рабочего пространства манометра определяется формой, размерами и потенциалами электродов. Интеграл в уравнении (1) должен быть взят по всему пути электрона в рабочем пространстве; он дает число положительных ионов, образуемых долей α_j от тока первичных электронов I_e при одном пролете по траектории l_j . В рабочем пространстве возможны различные траектории l_j , поэтому среднее число ионов, образуемых одним электроном, представляет собой сумму из интегралов по всем возможным траекториям l_j .

Величина K_T представляет собой теоретическую чувствительность манометра. Как видно из изложенного выше, значение K_T определяется видом функции $E(U)$ и распределением потенциала U в рабочем пространстве манометра. Следовательно, K_T зависит от рода газа и не зависит от давления. Последнее справедливо до тех пор, пока сохраняется неизменным распределение потенциала. Повышение давления и соответствующее увеличение ионного тока при некоторых условиях приводит к образованию пространственного заряда положительных ионов в объеме манометра и, следовательно, к резкому изменению потенциального распределения. Однако, как показывает опыт, образования заряда можно избежать, уменьшая ток I_e до таких значений, при которых это явление становится невозможным. В дальнейшем значение K_T предполагается постоянным.

Попытки вычисления K_T предпринимались неоднократно [3, 4], однако методика оказывалась чрезмерно сложна, а величины, входящие в расчет,

* Здесь чувствительность K_T представлена в несколько более общем виде, чем в [3] и [4].

слишком неопределенны. Поэтому приходится определять K_T экспериментально.

При измерении давления ионизационным манометром мерой тока I_i служит ток I_k в цепи ионного коллектора, мерой тока I_e — ток в цепи анода или катода манометра. Так как обычно в установках для питания ионизационных манометров измерительный прибор стоит в цепи катода, ток I_a будет в дальнейшем обозначать ток в цепи катода. Этот ток при измерениях поддерживают постоянным.

Ток I_k складывается из тока положительных ионов на коллектор βI_i , где β — доля ионов, собираемых ионным коллектором, и тока фотоэлектронов I_ϕ , испускаемых с поверхности коллектора под действием рентгеновского излучения анода:

$$I_k = \beta I_i + I_\phi \quad (2)$$

Ток I_a состоит из тока первичных электронов I_e , эмитируемых катодом, и тока положительных ионов на катод δI_i , где δ — доля ионов, собираемых катодом,

$$I_a = I_e + \delta I_i \quad (3)$$

В соотношениях (1) — (3) не приняты во внимание рекомбинация ионов и электронов и ионизация молекул газа вторичными электронами и фотоэлектронами, так как влияние этих явлений в рассматриваемом случае пренебрежимо мало [3].

Подстановка значений I_i и I_e из соотношений (2) и (3) в уравнение (1) дает

$$P = \frac{I_k - I_\phi}{K_T [\beta I_a - \delta (I_k - I_\phi)]} \quad (4)$$

здесь ток I_ϕ в знаменателе может быть отброшен, так как во всех случаях применения ионизационных манометров $I_\phi \ll I_a$, тогда уравнение (4) можно представить в следующем виде:

$$P = \frac{1}{\beta K_T} \cdot \frac{I_k}{I_a} \cdot \frac{\left(1 - \frac{I_\phi}{I_k}\right)}{\left(1 - \frac{\delta}{\beta} \cdot \frac{I_k}{I_a}\right)} = C \cdot \frac{I_k}{I_a} \quad (5)$$

Величину C можно считать постоянной при выполнении следующих условий:

$$\frac{\delta}{\beta} \cdot \frac{I_k}{I_a} \ll 1 \quad (6)$$

$$\frac{I_\phi}{I_k} \ll 1, \quad (7)$$

тогда

$$C \approx \frac{1}{K}, \quad \text{где } K = \beta K_T,$$

и

$$P \approx \frac{1}{K} \cdot \frac{I_k}{I_a} \quad (8)$$

здесь K — чувствительность манометра, которая может быть измерена экспериментально, путем градуировки по образцовому манометру. K зависит от величины β , которая должна быть по возможности близкой к единице и сохранять постоянное значение в пределах применимости уравнения (8).

В манометрах с осевым коллектором и открытой конструкцией анода возможно значительное изменение β , обусловленное следующими причинами. Поверхность ионного коллектора у этих манометров очень мала, поэтому большинство ионов, прежде чем попасть на коллектор, совершает около него несколько колебаний. Наличие у иона аксиальной составляющей скорости может привести к тому, что во время этих колебаний ион выйдет за пределы коллектора и будет осажден на стеклянные стенки манометра. Утечка ионов приводит к существенному уменьшению β , причем, как показывает опыт [7], утечка резко уменьшается у верхнего предела измерения манометра вследствие столкновений ионов с молекулами газа. Для устранения утечки ионов анод манометра должен иметь торцевые поверхности, образующие потенциальный барьер, препятствующий выходу ионов из анода, благодаря чему β сохраняется неизменным во всем диапазоне измеряемых давлений.

Подставляя значение I_h из приближенного уравнения (8) в уравнение (5), можно получить

$$C = \frac{1}{K} \cdot \frac{\left(1 - \frac{I_\phi}{pKI_a}\right)}{\left(1 - \frac{\delta}{5} pK\right)}. \quad (9)$$

Условие (6) ограничивает верхний предел справедливости уравнения (8). Согласно соотношениям (9) и (8) оно может быть представлено в виде

$$p_{\max} \ll \frac{\beta}{\delta} \cdot \frac{1}{K} = \frac{1}{\delta K_T}. \quad (10)$$

Отсюда видно влияние на верхний предел доли δ ионов, поступающих на катод, и теоретической чувствительности K_T .

Точная математическая оценка верхнего предела справедливости уравнения (8), как и вычисление значений K_T и δ , входящих в условие (10), представляет весьма сложную задачу, разрешимую только при ряде упрощающих предположений. Поэтому обычно определяют этот предел экспериментально, путем градуировки прибора по компрессионному манометру. Имеющиеся многочисленные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что применение уравнений (8) допустимо при давлениях, не превышающих $10^{-2} \div 10^{-4}$ мм рт. ст., в зависимости от конструкции манометра.

Компрессионный манометр применим до давлений порядка 10^{-5} мм рт. ст., и поэтому постоянная C ионизационного манометра может быть определена путем сличения показаний обоих манометров в той области давлений, где их пределы взаимно перекрываются.

Условие (7) дает нижний предел справедливости уравнения (8). Уравнение (9) позволяет представить его также в виде

$$p_{\min} \gg \frac{I_\phi}{KI_a}, \quad (11)$$

откуда видно влияние тока фотоэлектронов I_ϕ , чувствительности K и анодного тока I_a на нижний предел давления.

Наиболее эффективный путь уменьшения тока I_ϕ — это уменьшение поверхности коллектора, облучаемой рентгеновским излучением с анода. Изготовление ионного коллектора в виде тонкой нити, расположенной вдоль оси анода, позволяет сохранить справедливость уравнения (8) вплоть до $10^{-10} \div 10^{-11}$ мм рт. ст. [8, 9].

Для экспериментального обнаружения тока I_ϕ в ионизационном манометре обычно снимают зависимость $I_h = f(U_{ак})$ при постоянных давлении p и токе I_a . Ток фотоэлектронов с коллектора не зависит от да-

вления в манометре и сильно возрастает с повышением потенциала анода [5, 8]; ток положительных ионов прямо пропорционален давлению и, как показывают приближенные расчеты [3, 4] по формуле (1), перестает увеличиваться или даже уменьшается при возрастании $U_{ак}$ выше некоторого значения, примерно соответствующего максимуму кривой эффективности ионизации. Таким образом, по ходу зависимости $I_k = f(U_{ак})$ можно судить об отсутствии или наличии в токе ионного коллектора составляющей тока фотоэлектронов и таким косвенным путем проверять, выполняется ли формула (8) при низких давлениях.

Изложенные выше соображения позволяют сформулировать основные условия, которым должен удовлетворять ионизационный манометр, предназначенный для применения в качестве образцового.

1. Величина K должна быть постоянна в пределах измерения, определяемых условиями (10) и (11); при этом верхний предел давления, при котором сохраняется постоянство K , должен быть не ниже $10^{-1} \div 10^{-2}$ мм рт. ст.

2. Величина β должна быть постоянной во всем диапазоне измерения манометра и по возможности близкой к единице.

3. Величина I_{ϕ} должна иметь наименьшее возможное значение, обеспечивающее выполнение условия (11) вплоть до возможно низких давлений.

Дополнительное расширение пределов измерений манометра может быть получено путем изменения чувствительности K на разных пределах измерений, так как согласно условию (10) у верхнего предела измерений K должно быть мало, а условие (11) требует возможно большего значения K у нижнего предела измерений.

Изучение существующих конструкций ионизационных манометров показало, что наиболее близко подходит к перечисленным условиям ионизационный манометр с накаленным катодом, описанный в статье [10]. Авторы указывают, что чувствительность K манометра достигала $50 \text{ мм}^{-1} \text{ рт. ст.}$ ($C = 0,02 \text{ мм рт. ст.}$) и увеличивалась более чем в два раза под действием небольшого

продольного магнитного поля, которое создавали с помощью катушки, надеваемой на баллон манометра. Величина β у этого манометра, по-видимому, постоянна во всем диапазоне измеряемых давлений, так как рабочее пространство ограничено со всех сторон сетками, находящимися под большим положительным потенциалом. Третье условие также выполняется, так как при давлениях порядка $10^{-10} \text{ мм рт. ст.}$ кривые зависимости $I_k = f(U_{ак})$ не обнаруживают никаких признаков тока I_{ϕ} .

В лаборатории измерения вакуума ВНИИМ были исследованы два варианта аналогичной конструкции манометра (рис. 1). Анод манометра представлял собой цилиндр из проволочной сетки, торцевые поверхности которого закрыты танталовыми кольцами с отверстиями, затянутыми сеткой. Катод был изготовлен в виде спирали из вольфрамовой проволоки, имевшей примерно такой же диаметр и длину, как и катод лампы ЛМ-2. Это позволило применить для питания манометра тот же стан-

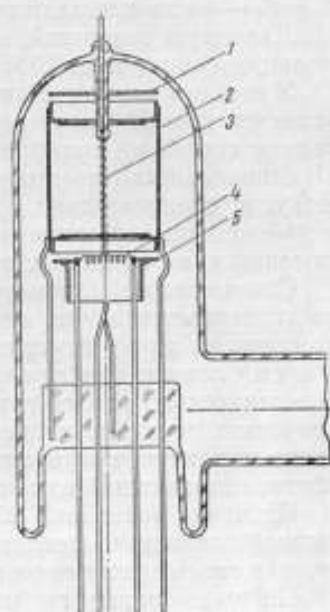


Рис. 1. Опытный образец ионизационного манометра.

1 — отражатель; 2 — анод; 3 — коллектор ионов; 4 — катод; 5 — экранный цилиндр.

дартный источник питания, что и для других манометрических ламп. Катод был расположен в экранном цилиндре против торцевой поверхности анода. С противоположной стороны находилась пластина-отражатель, соединенная с экранным цилиндром. Ионный коллектор был изготовлен из вольфрамовой проволоки, имевшей первоначально диаметр 0,1 мм и стравленной электролитически до формы усеченного конуса с диаметром нижнего основания 90 мк, верхнего — 30 мк. Ввод коллектора был изолирован стеклом.

У первого варианта манометра цилиндр и торцевые поверхности анода были изготовлены из молибденовой сетки с диаметром проволоки 0,2 мм; коэффициент прозрачности сетки был

$$\eta = F_1/F_0 = 0,74,$$

где F_0 — вся площадь, занимаемая ячейкой сетки;

F_1 — часть площади ячейки, не закрытая проволокой.

Диаметры отверстий, закрываемых сетками в торцевых танталовых кольцах, были равны 20 мм.

У второго варианта диаметры отверстий в танталовых кольцах были увеличены до 27 мм; вместо молибденовой сетки эти отверстия были затянуты сеткой из вольфрамовой проволоки диаметром 0,1 мм с $\eta = 0,94$. Предполагалось, что это увеличит долю электронов, пролетающих через сетку, и, следовательно, увеличит среднюю длину пробега электронов в рабочем пространстве манометра, что в свою очередь приведет к увеличению чувствительности.

Описываемые манометры вместе с манометром ЛМ-2 были напаяны на экспериментальную вакуумную установку с последовательно расположенными двумя ртутными двухступенными диффузионными насосами и тремя ловушками для вымораживания паров ртути. Из манометров был тщательно удален газ посредством длительного прогрева их в электрических печах, высокой частотой и электронной бомбардировкой. Питание манометров осуществлялось от специальной электрической установки, позволявшей изменять электрический режим в широких пределах.

Сличение показаний манометров было произведено в режиме непрерывной откачки по методике, исключающей влияние откачивающего действия и газовыделения на показания манометров.

Первый вариант манометра при напряжениях анод—катод $U_{ак} = 200$ в и катод—коллектор $U_{кк} = 50$ в имел примерно такую же чувствительность, как и манометр ЛМ-2, т. е. порядка 20 мм⁻¹ рт. ст. Магнитное поле $H = 150 \div 200$ э увеличивало чувствительность в 2^{1/2}—3 раза, дальнейшее увеличение напряженности магнитного поля ее почти не изменяло.

Чувствительность второго варианта манометра при тех же напряжениях без магнитного поля оказалась практически такой же, как у первого варианта; однако увеличение напряженности магнитного поля до $H = 100$ э приводило к пятикратному увеличению чувствительности. Таким образом, второй вариант манометра оказался весьма перспективен в отношении расширения пределов измерений.

Зависимость тока I_h от разности потенциалов анод—катод $U_{ак}$ при постоянной разности потенциалов катод—коллектор $U_{кк}$ для магнитного поля $H = 0$ и $H = 100$ э представлена на рис. 2. Точки прямого и обратного ходов кривых в пределах точности измерений совпадали; для построения кривых были взяты средние значения. Уменьшение тока I_h при больших разностях потенциалов $U_{ак}$ свидетельствует о том, что при давлении порядка 10⁻⁹ мм рт. ст. сколько-нибудь существенного влияния тока фотоэлектронов на показания манометра не наблюдается.

Выбор рабочего напряжения $U_{ак} = 200$ в, соответствующего максимуму кривой при $H = 100$ э, позволяет получить наибольшую чувствительность при наименьших значениях ошибок, вызванных случайными отклонениями от этого напряжения.

Зависимость тока I_k от разности потенциалов катод—коллектор $U_{кк}$ при постоянной разности потенциалов анод—катод $U_{ак}$ представлена на рис. 3. Из кривых видно, что для $U_{кк} > 20$ в эта зависимость очень слаба при $H=0$ и практически отсутствует при $H=100$ э. Таким образом, выбор напряжения катод—коллектор в значительной мере произволен и ограничен лишь условием $U_{кк} > 20$ в, а отклонение $U_{кк}$ в широких преде-

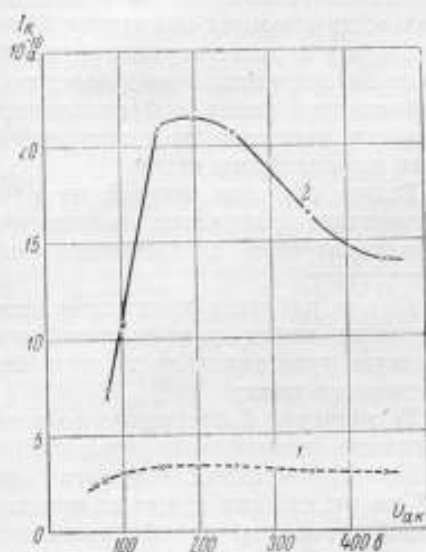


Рис. 2. Зависимость тока на ионный коллектор от разности потенциалов анод—катод. $U_{кк} = 50$ в, $I_e = 5$ ма, $r = 4 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст.
1 — $H=0$; 2 — $H=100$ э.

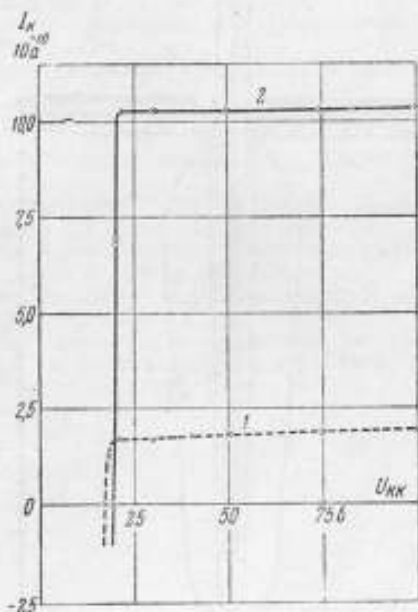


Рис. 3. Зависимость тока на вонный коллектор от разности потенциалов катод—коллектор. $U_{ак} = 200$ в, $I_e = 5$ ма, $r = 2 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст.
1 — $H=0$; 2 — $H=100$ э.

лах от выбранного значения не оказывает существенного влияния на значение чувствительности.

Обращает на себя внимание тот факт, что чувствительность, соответствующая $H = 0$, почти не изменяется при изменении прозрачности сеток, расположенных на торцах цилиндра анода. Это приводит к заключению, что роль торцевых сеток в удлинении пути электронов в манометре сравнительно малая. По-видимому, главное влияние на движение электронов в рабочем пространстве оказывает цилиндрическая сетка. Эти выводы подтверждаются и при рассмотрении примерного расположения эквипотенциальных поверхностей в манометре, приведенном на рис. 4. Потенциал ионного коллектора принят равным нулю, потенциал катода — 50 в, потенциал анода — 250 в. Поле цилиндрического конденсатора, образованного ионным коллектором и анодом, вызывает отталкивание электронов, летящих первоначально вдоль оси манометра, к цилиндрической поверхности анода. Электроны, прошедшие в отверстия цилиндрической сетки, тормозятся электрическим полем, существующим

между сеткой и стеклянными стенками манометра, и возвращаются обратно в рабочее пространство манометра. Часть электронов поглощается сеткой, причем это поглощение тем больше, чем меньше прозрачность сетки.

Продольное магнитное поле вызывает закручивание траекторий электронов, движущихся к цилиндрической поверхности анода, в результате чего пути электронов значительно удлиняются. Магнитное поле взаимодействует только с составляющими скоростей электронов, перпендикулярными оси анода, поэтому пути электронов в манометре оказываются тем длиннее, чем больше радиальная и тангенциальная составляющая

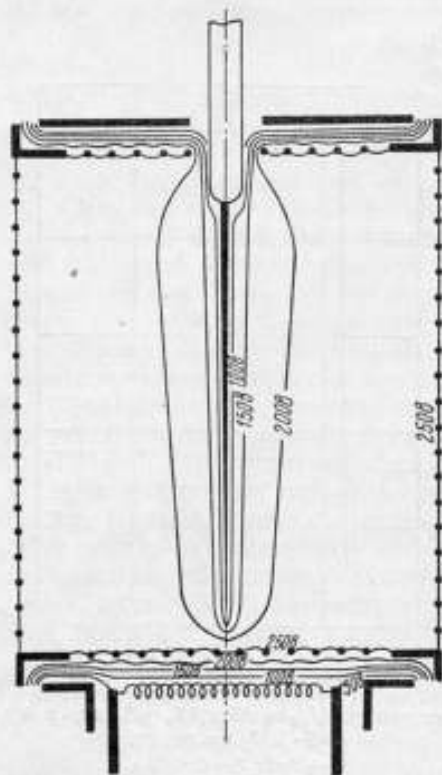


Рис. 4. Схема расположения эквипотенциальных поверхностей в объеме манометра.

скоростей электронов. По-видимому, у второго варианта манометра существенное влияние на появление этих составляющих оказывает большее, чем у первого варианта, провисание эквипотенциальных поверхностей внутрь анода, обусловленное большим расстоянием между соседними проволоками сетки.

Таким образом, второй из рассмотренных вариантов манометра характеризуется следующими особенностями:

1) при работе в магнитном поле манометр имеет в пять раз более высокую чувствительность, чем без магнитного поля;

2) значение β постоянно во всем диапазоне измеряемых давлений.

При давлениях вплоть до 10^{-9} мм рт. ст., как видно из кривых рис. 2, манометр не обнаруживает сколько-нибудь заметного тока фотоэлектронов I_{ϕ} . Ход кривых позволяет предполагать, что ток фотоэлектронов не будет заметен и при более низких давлениях.

Потенциалы на электродах манометра могут быть выбраны согласно кривым рис. 2 и 3 таким образом, чтобы случайные колебания этих потенциалов приводили к наименьшим ошибкам при измерении ионного тока. Следовательно, ионизационный манометр рассмотренной конструкции после проверки постоянства величины K в области высоких давлений и градуировки по образцовым компрессионным манометрам может быть применен в качестве образцового на пределы измерения $10^{-2} \div 10^{-9}$ мм рт. ст. (возможно, и до более низких давлений).

Приведенные выше соображения указывают также на возможность дальнейшего совершенствования конструкции манометра. Для этой цели необходимо выполнение следующих мероприятий:

1. Разработка электронного коллектора (анода), цилиндрическая поверхность которого обладает большей прозрачностью, чем примененная проволочная сетка с $\eta = 0,74$.

2. Создание вокруг анода наружной экранной сетки, с помощью которой можно обеспечить электрическое поле, тормозящее вылетающие

44

за пределы анода электроны и возвращающее их обратно в рабочее пространство манометра.

Выполнение этих мероприятий позволяет предполагать возможность создания образцового ионизационного манометра для давлений до 10^{-10} — 10^{-11} мм рт. ст.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ерюхин А. В., Образцовая установка для поверки измерительных блоков вакуумметров, «Измерительная техника», № 8, 1960, стр. 11—12.
2. Ерюхин А. В., Поверка измерительных блоков ионизационных и термпарных вакуумметров, Труды институтов Комитета, вып. 50 (110), 1961, стр. 70—75.
3. Моргулис Н. Д., Теория ионизационного манометра, «Журнал технической физики», № 1, 1931, стр. 51—63; № 8, 1933, стр. 1276—1281.
4. Хавкин Л. П., К теории ионизационного манометра, «Журнал технической физики», № 10, 1956, стр. 2356—2360.
5. Nottingham W. B., Design and Properties of the Modified Bayard-Alpert Gauge, «Vacuum Symposium Transactions», 1954, p. 76—80.
6. Сена Л. А., Столкновения электронов и ионов с атомами газа, Гостехиздат, 1948, стр. 81.
7. Schulz G. J., Characteristics of the Bayard-Alpert Ionization Gauge at Pressures above 10^{-2} mm Hg, «Journal of Applied Physics», v. 28, № 10, 1957, p. 1149—1152.
8. Alpert D., New Developments in the Production and Measurement of Ultra-High Vacuum, «Journal of Applied Physics», v. 24, № 7, 1953, p. 860—876.
9. Venema A., Baudringa M., The Production and Measurement of Ultra-High Vacuum, «Philips Technical Review», v. 20, № 6, 1958—1959, p. 145—157.
10. Моргулис Н. Д., Марченко Р. И., Некоторые ионизационные методы измерения очень высокого вакуума, «Приборы и техника эксперимента», № 5, 1960, стр. 106—108.

Поступила в редакцию
25/III 1961 г.

А. В. ЕРЮХИН, В. А. РЫЖОВ

ВНИИМ

ДЕПРЕССИЯ РТУТИ В КАПИЛЛЯРАХ КОМПРЕССИОННЫХ МАНОМЕТРОВ

Экспериментально изучены значения депрессии ртути в шлифованных и нешлифованных капиллярах компрессионных манометров. Показано, что капиллярная депрессия является одной из основных причин, ограничивающих точность измерения давления компрессионными манометрами. Предложен метод введения поправок на депрессию в уравнение измерения компрессионного манометра.

При многократных взаимных сличениях образцовых компрессионных манометров были обнаружены систематические расхождения показаний некоторых манометров, лежащие в пределах 1—3% от измеряемого давления [1]. Обработка результатов сличения методами математической статистики показала, что эти расхождения выходят за пределы ошибок, возможных при отсчетах уровней ртути и при определении уровня, соответствующего запаянному концу измерительного капилляра. Нельзя было объяснить их и ошибками определения постоянных манометров, так как измерения начальных объемов сжатия и диаметров капилляров обеспечивали получение постоянных с ошибками не более 0,2—0,4%. Оставалось предположить различие депрессий ртути в измерительном и сравнительном капиллярах, хотя эти капилляры представляли собой две части одной стеклянной трубки со шлифованным каналом.

Элементарная теория, основанная на предположении, что мениск жидкости в капилляре имеет форму сферического сегмента, дает следующее выражение для депрессии δ в тонком капилляре с внутренним диаметром d :

$$\delta = \frac{4\alpha \cos \eta}{\rho g d}, \quad (1)$$

здесь ρ — плотность жидкости;

g — ускорение силы тяжести;

$\eta = 180^\circ - \theta$, где θ — краевой угол между поверхностью жидкости и стенкой капилляра;

α — коэффициент поверхностного натяжения жидкости.

Значения α и θ обычно не могут быть измерены с необходимой точностью. Известно, что для ртути коэффициент поверхностного натяжения α имеет значение, лежащее в пределах $400 \div 500$ дин/см, в зависимости от чистоты поверхности ртути [2]. Краевой угол θ зависит от состояния поверхности стекла и ртути, а также от ряда других причин, недостаточно

изученных. Имеющиеся сведения позволяют предполагать, что значение θ не выходит за пределы $120-180^\circ$. Таким образом, произведение $B = \alpha \cos \eta$ может изменяться от 200 до 500 *дин/см*.

Из уравнения (1) видно, что случайные изменения депрессии в капиллярах компрессионных манометров могут быть обусловлены случайными отклонениями диаметра капилляра d от его среднего значения и случайными изменениями значения B .

Измерения, произведенные на большом числе шлифованных капилляров [1], показали, что средние квадратичные отклонения диаметров от среднего значения не превышают 2 *мк*. Оценка влияния этих отклонений на разброс значений депрессии по уравнению (1) показывает, что разброс депрессии может быть заметен только при диаметрах капилляров менее 1 *мм* (при средней квадратичной ошибке отсчетов порядка 0,02—0,05 *мм*). Следовательно, разброс депрессии ртути в капиллярах манометров обусловлен главным образом случайными изменениями величины B , данные о которых отсутствуют.

Кроме случайных, возможны и систематические изменения депрессии по длине капилляра, обусловленные периодическими или монотонными изменениями значений d и B . Постоянство d обеспечивается шлифовкой и отбором капилляров по диаметру.

Таким образом, вопрос о случайных и систематических отклонениях депрессии в капиллярах не может быть решен теоретически и требует экспериментального исследования.

Для исследования депрессии в капиллярах компрессионного манометра было сконструировано специальное приспособление (рис. 1), позволяющее вести отсчет уровней ртути не только в измерительном и сравнительном капиллярах, но и в параллельной им широкой трубке H с внутренним диаметром 11 *мм*. Высота мениска ртути в этой трубке была равна 0,8 *мм*. В такой трубке при $\alpha = 450$ *дин/см* депрессия должна составлять 0,2 *мм* [2]. Зависимостью депрессии в трубке от коэффициента поверхностного натяжения можно пренебречь по сравнению с депрессиями в капиллярах манометра. Следовательно, депрессии в сравнительном и измерительном капиллярах равны соответственно (см. рис. 1):

$$\delta_c = H - h_c + 0,2 \text{ мм}, \quad (2)$$

$$\delta_n = H - h_n + 0,2 \text{ мм}. \quad (3)$$

Соотношение (3) справедливо только при условии, что разность давлений в измерительном капилляре и широкой трубке манометра пренебрежимо мала по сравнению с точностью отсчетов уровней ртути. Расчет по уравнению измерения компрессионного манометра показывает, что это условие выполнимо для всех манометров при давлениях $P \leq 10^{-6}$ *мм рт. ст.* и разности между уровнем запаянного конца и уровнем ртути в измерительном капилляре $(h_c - h_n) \geq 10$ *мм*. Следовательно, при откачке вакуумной системы манометров до указанных давлений можно измерить депрессию по всей длине как сравнительного, так и измерительного капилляров, за исключением участка последнего,

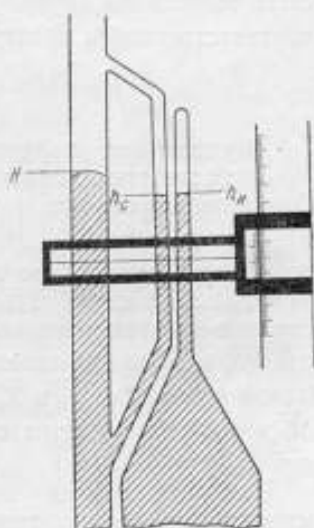


Рис. 1. Приспособление для исследования депрессии в компрессионном манометре. H — уровень ртути в широкой трубке; h_c — то же в сравнительном капилляре; h_n — то же в измерительном капилляре.

отстоящего на расстоянии $(h_0 - h_n) < 10$ мм от запаянного конца h_0 и не участвующего в измерениях. Тем же путем может быть измерена разность депрессий в измерительном и сравнительном капиллярах

$$\Delta \delta = h_n - h_c.$$

Для получения основных параметров распределения перечисленных величин были проведены многократные измерения уровней ртути в манометрах одного набора при давлениях $p < 10^{-6}$ мм рт. ст.

Изменение депрессии по длине капилляров было исследовано методом дисперсионного анализа. Для участков капилляров длиной по 10 мм были вычислены внутрисерийные и межсерийные дисперсии (S_i^2 и S_a^2 соответственно) и критерий F :

$$F = \frac{S_a^2}{S_i^2}.$$

Вычисленные значения F сравнивались с табличными значениями $F_{0,05}$, соответствующими 5%-му интервалу доверительной вероятности. Выполнение условия

$$F < F_{0,05} \quad (4)$$

позволяло считать, что систематические колебания или монотонные изменения депрессии по длине капилляра отсутствуют. Были вычислены средние значения депрессий в измерительном и сравнительном капиллярах ($\bar{\delta}_n$ и $\bar{\delta}_c$ соответственно) и их средние квадратичные отклонения при одном измерении \bar{S}_n и \bar{S}_c , а также средние значения разностей депрессий $\bar{\Delta \delta}$ и соответствующие средние квадратичные отклонения ряда измерений \bar{S}_{Δ} .

Измерения были повторены дважды: после откачки холодных манометров до давления $p < 10^{-6}$ мм рт. ст. и после прогрева печью при непрерывной откачке в течение 4 ч при температуре 250°C и медленного остывания до комнатной температуры также при давлении $p < 10^{-6}$ мм рт. ст.

Таблица 1

№ манометра	d капилляра, мм	Измерительный капилляр				Сравнительный капилляр				Разность депрессий		Условия выполнения измерений
		F	$F_{0,05}$	$\bar{\delta}_n$, мм	\bar{S}_n , мм	F	$F_{0,05}$	$\bar{\delta}_c$, мм	\bar{S}_c , мм	$\bar{\Delta \delta}$, мм	\bar{S}_{Δ} , мм	
1	1,100	1,11	2,21	12,22	0,21	1,34	2,21	11,31	0,13	+0,9	0,04	После откачки холодных манометров, до $p < 10^{-6}$ мм рт. ст.
2	1,931	1,90	3,05	5,30	0,30	2,30	3,05	6,00	0,30	-0,7	0,09	
3	2,511	1,40	3,05	4,56	0,20	1,00	3,05	4,83	0,30	-0,3	0,07	
1	1,100	1,50	3,05	12,00	0,20	1,20	3,05	11,30	0,30	+0,7	0,07	После откачки манометров с прогревом, $p < 10^{-6}$ мм рт. ст.
2	1,931	3,00	3,05	5,21	0,33	2,78	3,05	5,82	0,30	-0,6	0,09	
3	2,511	1,10	3,05	4,50	0,20	1,20	3,05	4,79	0,27	-0,3	0,07	

Результаты измерений приведены в табл. 1. Сравнение F и $F_{0,05}$ показывает, что условие (4) выполняется для всех капилляров и, следовательно, систематические колебания или монотонные изменения депрессии по длине капилляров отсутствуют. Средние квадратичные отклонения одного измерения депрессии составляют 0,2—0,3 мм, что

значительно превышает среднюю квадратичную погрешность, обусловленную нониусным устройством, с помощью которого производились отсчеты уровней ртути, а также отклонениями диаметра капилляра от среднего значения. Следовательно, при диаметрах шлифованных капилляров $d=1-3$ мм случайный разброс депрессии обусловлен, главным образом, случайным разбросом величины B .

Устойчивая средняя разность депрессий в измерительном и сравнительном капиллярах Δb в 5—10 раз превышает средние квадратичные отклонения \bar{S}_d , обусловленные разбросом депрессии, и составляет 0,3—0,9 мм. Эту разность необходимо учитывать при измерении давления.

Введение поправки на депрессию в уравнение измерения приводит к уменьшению систематических расхождений в показаниях 1-го и 2-го манометров при их сличении с 3 до 1%, как это видно из табл. 2.

Таблица 2

Номинальное значение давления, мм рт. ст.	Систематическое расхождение показаний, в % к номинальному давлению	
	без поправки на депрессию	с поправкой на депрессию
$7 \cdot 10^{-4}$	+3,1	+0,9
$8 \cdot 10^{-3}$	+2,0	-0,9
$2,5 \cdot 10^{-2}$	+1,8	-0,1

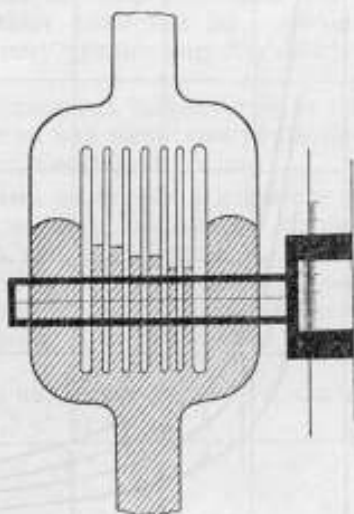


Рис. 2. Приспособление для исследования депрессии в рамке с капиллярами разных диаметров.

При выполнении действительных измерений давления над менисками в сравнительном и измерительном капиллярах будут различны, поэтому необходимо было выяснить влияние давления на депрессию. Для этого были изготовлены рамки с расположенными параллельно капиллярами и широкими трубками. Одна из рамок изображена на рис. 2. Здесь можно было создавать над поверхностью ртути любые давления: от $p < 10^{-6}$ мм рт. ст. до $p = 100$ мм рт. ст.

С помощью методики, аналогичной приведенной выше, были получены средние значения депрессии \bar{b} и соответствующие средние квадратичные отклонения при одном измерении \bar{S} . Перед выполнением измерений рамку прогревали в печи в течение нескольких часов при непрерывной откачке.

Результаты измерений депрессии в шлифованных капиллярах разных диаметров при давлениях $p < 10^{-6}$ мм рт. ст. и $p = 100$ мм рт. ст. приведены в табл. 3.

Сравнение депрессий при двух крайних возможных значениях давления позволяет сделать вывод, что различие давлений в измерительном и сравнительном капиллярах компрессионного манометра не сказывается сколько-нибудь существенно на депрессии. Средние квадратичные отклонения депрессии имеют тот же порядок величины, что и приведенные в табл. 1.

Таким образом, найденные описанным способом значения поправок на депрессию будут справедливы и при действительных измерениях давления.

Для сравнения были измерены также депрессии в нешлифованных капиллярах. Результаты приведены также в табл. 3. Значения депрессий в нешлифованных капиллярах оказались значительно меньше, чем в шлифованных капиллярах такого же диаметра. По-видимому, краевой угол θ имеет в нешлифованных капиллярах меньшие значения, чем

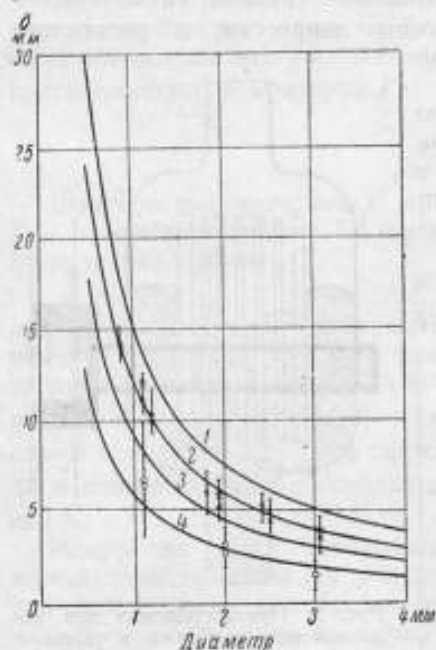


Рис. 3. Зависимость депрессии ртути от диаметра капилляра.

1 — $V = 500$ дин/см; 2 — $V = 400$ дин/см;
3 — $V = 300$ дин/см; 4 — $V = 200$ дин/см.

Таблица 3

d капилляра, мм	$\rho < 10^{-6}$ мм рт. ст.		$\rho = 100$ мм рт. ст.	
	\bar{h}	\bar{S}	\bar{h}	\bar{S}
Шлифованные капилляры, мм				
0,854	14,3	0,3	14,2	0,4
1,198	10,5	0,5	10,6	0,4
1,803	6,0	0,5	5,8	0,3
2,425	5,3	0,3	5,2	0,3
3,062	3,9	0,3	3,6	0,3
Нешлифованные капилляры, мм				
1,1	6,8	1,4	6,5	1,1
2,0	3,2	0,4	2,8	0,3
3,0	1,5	0,3	1,5	0,3

в шлифованных. Из этой таблицы видно также, что средние квадратичные отклонения депрессии \bar{S} резко возрастают при уменьшении диаметра нешлифованных капилляров до 1 мм. Это должно приводить к большому разбросу показаний компрессионных манометров, изготовленных из нешлифованных капилляров такого диаметра, что полностью подтверждается накопленным во ВНИИМ опытом изготовления компрессионных манометров.

Средние значения депрессий из табл. 1 и 3 приведены на рис. 3, где представлено также семейство гипербол уравнения (1) при постоянной плотности ртути $\rho = 13,55$ г/см³ и разных возможных значениях V . Депрессии в шлифованных капиллярах обозначены крестиками, в нешлифованных — кружками. Вертикальные отрезки у каждой точки представляют предельные отклонения депрессии, равные $2,5 \bar{S}$.

Выводы

1. Средние значения депрессии ртути в шлифованных капиллярах лежат между гиперболами, соответствующими значениями $V = \alpha \cos \theta$ 300–500 дин/см, а в нешлифованных — около $V = 200$ дин/см.

2. Средние квадратичные отклонения депрессии в шлифованных капиллярах составляют $\bar{S} = 0,2-0,5$ мм и не обнаруживают сколько-нибудь заметной зависимости от диаметра в пределах изменения последнего $1+3$ мм.

Значения S оказываются значительно больше средних квадратичных погрешностей отсчета уровней ртути и, следовательно, являются одной из основных причин, обуславливающих случайный разброс показаний компрессионного манометра.

3. Средние квадратичные отклонения депрессии в нешлифованных капиллярах диаметром 2—3 мм имеют тот же порядок величины, что и в шлифованных капиллярах; при уменьшении диаметра до 1 мм они резко возрастают, приводя к соответствующему увеличению случайного разброса показаний манометра.

4. Депрессия ртути в капиллярах компрессионных манометров не обнаруживает заметной зависимости от давления над мениском ртути при изменении давления от $p < 10^{-6}$ мм рт. ст. до $p = 100$ мм рт. ст.

5. Разность Δh между средними значениями депрессии в измерительном и сравнительном капиллярах компрессионного манометра составляет $0,3 \pm 1$ мм и должна быть учтена путем введения соответствующей поправки на депрессию в уравнение измерения компрессионного манометра. Введение поправок приводит к уменьшению систематических расхождений между показаниями образцовых компрессионных манометров с 3 до 1%.

6. Измерения по установлению поправок надлежит вести при давлениях $p \leq 10^{-6}$ мм рт. ст. и разностях $(h_0 - h_m) < 10$ мм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуляев М. А., Ерюхин А. В., Рыжов В. А. Наборы образцовых компрессионных манометров ВНИИМ, Труды институтов Комитета, вып. 50 (110), 1961, стр. 62—69.

2. Gould F. A., Vickers T. Capillary Depression in Mercury Barometers and Manometers, Journal of Scientific Instruments, v. 29, № 3, 1952, p. 85—87.

Поступила в редакцию

26/V 1961 г.

С. С. КИВИЛИС, В. Е. ОЛЕЙНИКОВ
ВНИИ

О НЕКОТОРЫХ ПОГРЕШНОСТЯХ ПОПЛАВКОВЫХ ДИФМАНОМЕТРОВ-РАСХОДОМЕРОВ

В статье рассмотрены погрешности поплавковых дифманометров-расходомеров, зависящие от изменения глубины погружения поплавка при заполнении прибора измеряемой (разделительной) жидкостью и от изменения температуры окружающего воздуха.

Расчеты и эксперименты, выполненные в 1957 г. во ВНИИ Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, показали, что у ртутного поплавкового дифманометра, поверенного воздухом в соответствии с Правилами 27—54, стрелка после заполнения прибора водой над ртутью при нулевом перепаде давления устанавливается левее нулевой отметки, перемещаясь вследствие всплытия поплавка на расстояние, соответствующее примерно 2% от предельного номинального перепада давления. Эта систематическая погрешность (со знаком минус) наблюдается во всех точках шкалы (диаграммы) прибора.

Для устранения указанной погрешности при эксплуатации дифманометров были предложены следующие способы:

а) отливание из прибора, заполненного какой-либо жидкостью* над ртутью, некоторого количества ртути, необходимого для возвращения стрелки (пера) на нулевую отметку;

б) принудительная установка стрелки (пера) на нуль после заполнения системы жидкостью.

Рассмотрим в общем виде вопрос о влиянии плотности рабочей жидкости на показания поплавкового дифманометра-расходомера, причем для упрощения расчетов примем, что поплавок имеет цилиндрическую форму.

Уравнение равновесия поплавка, если пренебречь ничтожно малым влиянием изменения уровня уравновешивающей жидкости, обусловленного изменением глубины погружения поплавка при изменении плотности, имеет вид

$$b_0 = l \frac{\rho_y - \rho}{\rho_y - \rho_n}, \quad (1)$$

* Для краткости эта жидкость именуется рабочей

где b_0 — высота части поплавка, выступающей над уравнивающей жидкостью с плотностью ρ_1 ;

l — высота поплавка плотностью ρ ;

$\rho_{ж}$ — плотность рабочей жидкости.

Из уравнения (1) видно, что при изменении плотности рабочей жидкости изменяется и глубина погружения поплавка, в результате чего происходит смещение нулевой точки шкалы прибора и появляется систематическая погрешность показаний. Это обстоятельство играет существенную роль, так как градуировка и поверка дифманометров производятся одной жидкостью (как правило, воздухом*), а при эксплуатации приборы используются для работы с различными жидкостями, плотность которых может значительно отличаться от плотности градуировочной жидкости. Возникающая при этом дополнительная погрешность, например при измерении расхода воды или водяного пара, как отмечалось выше, составляет примерно -2% от предельного номинального перепада давления.**

Однако в процессе эксплуатации прибора возможно и непосредственное изменение плотности рабочей жидкости, связанное с изменением ее состава или концентрации. Такое изменение, как видно из формулы (1), неизбежно приводит к дополнительной погрешности, которая не может быть полностью исключена регулировкой прибора или введением поправки.***

Согласно установившейся в СССР практике поплавковые дифманометры-расходомеры, как и дифманометры других типов, принято градуировать и испытывать при нормальной температуре. В эксплуатационных условиях, когда температура окружающего воздуха отличается от нормальной, возникает некоторая дополнительная погрешность, связанная с влиянием температуры на плотность жидкостей, заполняющих дифманометр, на объемы сосудов прибора и поплавка, на глубину погружения поплавка в жидкость и др.

Следует отметить, что вопросы, связанные с температурной погрешностью поплавковых дифманометров, освещены в литературе недостаточно и к тому же иногда с ошибками. Так, влияние температуры на плотность жидкостей, заполняющих прибор, предлагается учитывать при расчете сужающего устройства путем применения соответствующего коэффициента в уравнении расхода [4—6]. Значения этого коэффициента в зависимости от температуры дифманометра, данные в виде таблицы, вычислены на основании формулы

$$\Delta p = ch_t(\gamma_k - \gamma'), \quad (2)$$

где Δp — перепад давления;

c — коэффициент пропорциональности;

h_t — разность высот столбов уравнивающей жидкости в дифманометре при температуре t ;

γ_k и γ' — удельный вес соответственно уравнивающей и рабочей жидкостей при температуре t .

* Следует отметить, что в последнее время в ФРГ [1, 2], США [3] и в других промышленно развитых странах также наблюдается переход к градуировке и поверке поплавковых дифманометров воздухом.

** В литературе [2] ошибочно указывается, что при заполнении дифманометра водой глубина погружения поплавка в ртуть больше, чем при заполнении воздухом.

*** Влияние отклонения средней плотности рабочей жидкости от значения, принятого для расчета сужающего устройства, работающего в комплекте с данным дифманометром, учитывается в соответствии с п. 124-1 Правил 27—54.

Очевидно, определить величину h_1 непосредственно можно только у трубчатого U-образного манометра. * Для поплавкового дифманометра, который градуируется при нормальной температуре (т. е. известна величина h_{20}), определить величину h_1 невозможно и формула (2) практически неприемлема.

Правилами 27—54 рекомендуется учитывать температуру поплавкового дифманометра путем умножения показаний прибора на поправочный коэффициент

$$K = \sqrt{\frac{\gamma_{yt} - \gamma_{жt}}{\gamma_{y20} - \gamma_{ж20}}}, \quad (3)$$

где γ_{yt} и $\gamma_{жt}$ — удельный вес соответственно уравновешивающей и рабочей жидкостей при температуре t ;

γ_{y20} и $\gamma_{ж20}$ — то же при 20°C .

Коэффициент K получен в предположении, что если показания прибора одинаковы при разных температурах, то одинаковы и соответствующие разности высот столбов уравновешивающей жидкости. В действительности неизменность показания, например, при повышенной температуре дифманометра означает, что поплавок (вследствие всплывания при нулевом перепаде) проделал больший путь, чем при нормальной температуре, т. е. объем перемещенной ртути, а следовательно, и разность высот ее столбов в сосудах прибора больше, чем при нормальной температуре.

Выражение (3) не учитывает теплового расширения сосудов прибора и поплавка, а также изменения глубины погружения поплавка; таким образом, применение коэффициента K не дает требуемого результата.

Выведем уравнение для вычисления температурной погрешности поплавкового дифманометра (при этом выводе частично использованы результаты работы МГИМИП в 1947 г.). Будем исходить из схемы, соответствующей реальным условиям применения дифманометра в комплекте с сужающим устройством, когда поступающий в прибор перепад давления остается постоянным при изменении температуры окружающей среды.

Приняты следующие обозначения:

- V — объем уравновешивающей жидкости в приборе;
- ΔV — объем, показанный на рис. 1 крестообразной штриховкой;
- D и d — внутренний диаметр соответственно поплавкового и сменного сосудов;
- ρ_y и $\rho_{ж}$ — плотность соответственно уравновешивающей и рабочей жидкостей;
- β_y и $\beta_{ж}$ — коэффициент объемного расширения соответственно уравновешивающей и рабочей жидкостей;
- α и α_n — коэффициент линейного расширения соответственно материала сосудов и поплавка;
- ρ — плотность материала поплавка;
- l — высота поплавка;
- b — глубина погружения поплавка в уравновешивающую жидкость;
- $h_{1\max}$ — предельный номинальный перепад давления;
- H_{\max} — ход поплавка, соответствующий перепаду $h_{1\max}$;

* Формула (2) приведена в стандарте по измерению расхода [7], но там четко указано, что она относится лишь к U-образным манометрам.

h' — разность уровней уравнивающей жидкости в сосудах прибора при заполнении его воздухом, соответствующая перепаду давления Δp ;

σ — приведенная температурная погрешность измерения перепада, численно равная суммарному перемещению поплавка (в долях H_{\max}) при изменении температуры.

Условимся также при буквенных обозначениях величин применять индексы 1 и 2 для указания соответственно температуры t_1 и t_2 . При этом

$$\Delta t = t_2 - t_1$$

и

$$\Delta b = b_2 - b_1.$$

На рис. 1 линиями 0—0 и 1—1 обозначены уровни уравнивающей жидкости в дифманометре при температурах соответственно t_1 и $t_2 > t_1$, когда перепад давления в приборе отсутствует. Линии 2—2 и 3—3 соответствуют уровням уравнивающей жидкости в поплавковом сосуде при температурах соответственно t_1 и t_2 , когда к прибору применен перепад давления Δp . Следует заметить, что при $\Delta h < (\Delta h_2 - \Delta h_1)$ уровень 3—3 установится ниже линии 2—2.

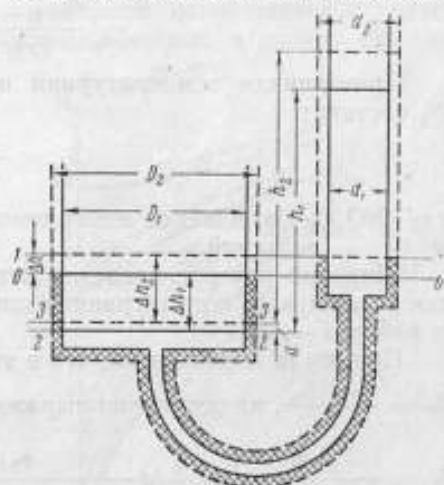


Рис. 1. Влияние температуры на уровень уравнивающей жидкости.
— температура t_1 ; - - - температура $t_2 > t_1$.

На основании рис. 1 и принятых обозначений можно записать следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} a &= \Delta h_2 - \Delta h_1 - \Delta h \\ \frac{\pi (D_2^2 + d_2^2)}{4} \Delta h &= V_2 - V_1 - \Delta V \\ V_2 &= V_1 (1 + \delta \Delta t) \\ \Delta h_1 &= \frac{d_1^2}{D_1^2 + d_1^2} h_1 \\ \Delta h_2 &= \frac{d_2^2}{D_2^2 + d_2^2} h_2 \\ h_2 &= \frac{\rho_{y1} - \rho_{ж1}}{\rho_{y2} - \rho_{ж2}} h_1 \\ h_1 &= \frac{\rho_{y1}}{\rho_{y1} - \rho_{ж1}} h_1' \\ b &= l \frac{\rho_{ж} - \rho}{\rho_{ж} - \rho_{y}} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Так как

$$\delta = \frac{\alpha + \Delta b}{H_{\max}} 100 \%, \quad (5)$$

то решая систему (4) и учитывая, что

$$\Delta V = 2 V_1 \alpha \Delta t, \quad (6)$$

после исключения величин второго порядка малости получим

$$\delta = \frac{100}{H_{\max}} \left\{ \frac{h_1' \rho_{y1} d_1^2}{D_1^2 + d_1^2} \left[\frac{1}{\rho_{y1} (1 - \beta_y \Delta t) - \rho_{ж1} (1 - \beta_{ж} \Delta t)} - \frac{1}{\rho_{y1} - \rho_{ж1}} \right] - \frac{4 V_1 \Delta t (\beta_y - 2 \alpha)}{\pi (D_1^2 + d_1^2) (1 + 2 \alpha \Delta t)} + l_1 \left[(1 + \alpha_n \Delta t) \frac{\rho_1 (1 - 3 \alpha_n \Delta t) - \rho_{ж1} (1 - \beta_{ж} \Delta t)}{\rho_{y1} (1 - \beta_y \Delta t) - \rho_{ж1} (1 - \beta_{ж} \Delta t)} - \frac{\rho_1 - \rho_{ж1}}{\rho_{y1} - \rho_{ж1}} \right] \right\} \% \quad (7)$$

Приведенная температурная погрешность показаний (по расходу) δ_Q составит

$$\delta_Q = \frac{50 \delta}{Q/Q_{\max}} \% \quad (8)$$

где Q/Q_{\max} — отношение измеряемого расхода к верхнему пределу показаний.

Широкий интерес представляет определение температурной погрешности в случае, когда уравновешивающей жидкостью является ртуть, а рабочей — вода.

Принимая во внимание, что в этом случае β_y близко к $\beta_{ж}$, и обозначая $\beta_0 = \frac{\beta_y + \beta_{ж}}{2}$, на основании выражений (7) и (8) найдем

$$\delta_Q = \frac{5000}{Q/Q_{\max} H_{\max}} \left\{ h_1' \beta_0 \Delta t \frac{\rho_{y1} d_1^2}{(\rho_{y1} - \rho_{ж1}) (D_1^2 + d_1^2)} - \frac{4 V_1 \Delta t (\beta_y - 2 \alpha)}{\pi (D_1^2 + d_1^2) (1 + 2 \alpha \Delta t)} + \frac{l_1 \Delta t}{\rho_{y1} - \rho_{ж1}} [\rho_1 (\beta_0 - 2 \alpha_n) - \rho_{ж1} \alpha_n] \right\} \% \quad (9)$$

На рис. 2 прерывистыми линиями представлены графически результаты расчетов по формуле (9) для поплавковых дифманометров со стандартными значениями предельного номинального перепада давления. Повышение температуры до 30°С принято в соответствии с допускаемой ГОСТ 3720—60 наибольшей температурой окружающего воздуха. Начальная температура принята равной нормальной ($t_1 = 20^\circ\text{C}$).

Согласно нормативным документам при градуировке, испытании и поверке дифманометров-расходомеров требуемые значения перепада давления создаются сжатым воздухом. В связи с этим рассмотрим влияние температуры окружающей среды на показания поплавкового дифманометра, заполненного (над уравновешивающей жидкостью) воздухом.

Пренебрегая плотностью воздуха в сравнении с плотностью уравновешивающей жидкости и материала поплавка, из уравнения (7) получим

$$\delta = \frac{100}{H_{\max}} \left[h_1' \beta_y \Delta t \frac{d_1^2}{D_1^2 + d_1^2} - \frac{4 V_1 \Delta t (\beta_y - 2 \alpha)}{\pi (D_1^2 + d_1^2) (1 + 2 \alpha \Delta t)} + b_1 \Delta t (\beta_y - 2 \alpha_n) \right] \% \quad (10)$$

Результаты расчетов по формуле (10) даны на рис. 3. Так как количество ртути, заливаемой в дифманометры на заводе-изготовителе, колеблется (для каждого предельного перепада давления) в среднем от 2,5 до 3,2 кг, значения δ определялись для обоих предельных количеств ртути (на рис. 3 наносились максимальные из этих значений).

Из выражения (10) и рис. 3 видно, что температурная погрешность дифманометра может быть как положительной, так и отрицательной,

причем зависит она не только от предельного номинального перепада давления дифманометра, но и от отношения измеряемого перепада давления к предельному.

Этот вывод опровергает приведенные в литературе [8] расчетные данные, согласно которым относительная температурная погрешность при нагреве прибора одинакова для приборов с разными пределами измерений и для всех точек шкалы, причем всегда имеет положительный знак.

Принципиально ошибочно изложены вопросы, относящиеся к температурной погрешности поплавковых дифманометров, в работе [9], где рассмотрен лишь случай $\Delta p = 0$ и в то же время делается вывод о возможности ликвидации погрешности от температурного смещения нуля.*

В табл. 1 указаны полученные по формуле (10) данные в сравнении с допуском по ГОСТ 3720—54 изменением показаний от повышения температуры.

При рассмотрении табл. 1 и рис. 3 можно вывести заключение, что требование ГОСТ 3720—54 к температурной погрешности дифманометров при их испытании воздухом практически не может быть соблюдено у поплавковых ртутных дифманометров класса I с предельными номинальными перепадами давления 40 мм рт. ст. (в диапазоне 77,5—100% верхнего предела показаний по расходу), 63 мм рт. ст. (96—100% верхнего предела), 160 мм рт. ст. (0—32% верхнего предела), 250 мм рт. ст. (0—45% верхнего предела), 400 мм рт. ст. (0—50% верхнего предела), 630 и 1000 мм рт. ст. (0—55% верхнего предела).

Экспериментальная проверка полученных результатов расчета была произведена на двух поплавковых дифманометрах-расходомерах: класса 1,5 ДПП-280 (показывающий) с предельным перепадом давления 400 мм рт. ст. и ДП-430 (самопишущий) с предельным перепадом 40 мм рт. ст.

Показание дифманометра ДПП-280, стрелка которого при помощи воздушного пресса была установлена на конец шкалы, за время нагрева при температуре 65°C в течение 4 ч практически не изменилось; по расчетным данным изменение показаний должно составлять примерно +0,25%. При нулевом перепаде давления стрелка после нагрева прибора сместилась влево, как и следовало ожидать по данным расчета.

Дифманометр ДП-430 был поверен шесть раз на 97% линии диаграммы при температуре 19°C. Действительный перепад давления, измеренный при помощи прибора ППР-1 для проверки дифманометров-расходомеров системы А. И. Петрова, составил соответственно 515,2:

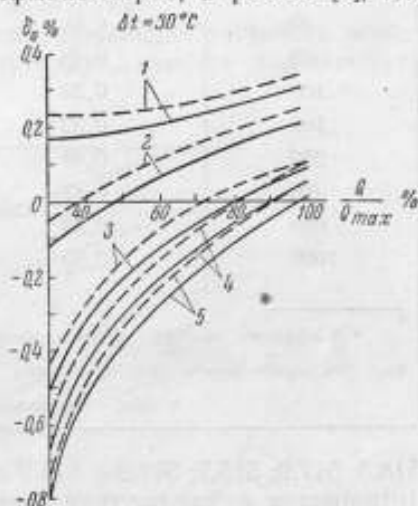


Рис. 2. Температурная погрешность показаний (по расходу) дифманометра при значении h_1 max

1 — 40 мм рт. ст.; 2 — 63 мм рт. ст.; 3 — 160 мм рт. ст.; 4 — 250 мм рт. ст.; 5 — 400 мм рт. ст.
 ————— ртуть — воздух;
 - - - - - ртуть — вода.

* Принятые в работе [9] положения и основанные на них расчеты ошибочны также из-за ряда других ошибок. Так, например, погрешность дана в долях высоты столба ртути в поплавковом сосуде и в формуле для определения глубины погружения поплавка вместо минуса стоит плюс, и т. д.

Таблица 1

Предельный номинальный перепад давления $h_1 \text{ max}$, мм рт. ст.	Абсолютное значение наибольшего изменения показаний в диапазоне 30—100% верхнего предела показаний * при повышении температуры на 30° С $ \delta_{\text{max}} $ в % от $h_1 \text{ max}$		
	расчетное	допускаемое по ГОСТ 3720—54 для класса точности	
		1	1,5
40	0,60	} 0,38	0,56
63	0,43		
100	0,30		
160	0,39		
250	0,44		
400	0,47		
630	0,50		
1000	0,50		

* В диапазоне 30—100% верхнего предела показаний по расходу значение $|\delta_{\text{max}}|$ соответствует 30% точке шкалы (9% предельного перепада) для приборов с $h_1 \text{ max} \geq 100$ мм рт. ст. и 100% — для приборов с $h_1 \text{ max} < 63$ мм рт. ст.

518,3; 517,9; 515,7; 517,9 и 516,9 мм вод. ст., т. е. в среднем 517 мм вод. ст. (отклонение от среднего не более 0,33% от предельного перепада).

Нагрев прибора при температуре 69° С производили в течение 4 ч, после чего была выполнена 10-кратная поверка на 97% линии диаграммы. В этом случае действительный перепад составил в среднем 511,2 мм вод. ст. с отклонением от среднего не более 0,24% предельного перепада.

Таким образом, в результате нагрева до 50° С погрешность показания дифманометра изменилась на 5,8 мм вод. ст., что соответствует примерно +1,1% от предельного перепада давления. Этот результат хорошо согласуется с расчетным * изменением показаний, которое составляет (для предельного перепада давления) +0,96%.

В связи с тем, что в ГОСТ 3720—60 допускаемое изменение показаний дифманометров-расходомеров, вызываемое влиянием температуры окружающего воздуха, выражается в процентах от верхнего предела показаний (по расходу), на рис. 2 представлены (сплошными линиями) графики расчетных значений приведенной температурной погрешности по расходу, полученных по формуле (8).

В табл. 2 проведено сравнение расчетных данных с соответствующим требованием ГОСТ 3720—60.

На основании рис. 3 и табл. 2 можно сделать следующие выводы:

1) для ртутных поплавковых дифманометров с предельными номинальными перепадами давления 40 и 63 мм рт. ст. допускаемое изменение показаний целесообразно снизить в 2^{1/2} раза по сравнению с требованием ГОСТ 3720—60;

2) в ГОСТ 3720—60 необходимо указать, что допускаемое согласно п. 34 температурное изменение показаний распространяется лишь на участок шкалы 30—100% верхнего предела показаний.

* Объем ртути, залитой в дифманометр, определялся взвешиванием.

Как видно из рис. 3, температурная погрешность показаний дифманометра, градуированного при нормальной температуре, ничтожно мало зависит от свойств измеряемой (разделительной) жидкости. В связи с этим при измерении расхода газов и жидкостей температурную погрешность с вполне достаточной точностью можно определять по уравнениям, полученным для системы ртуть — воздух.

Следует отметить, что температурной погрешностью можно пренебречь полностью у приборов с предельным перепадом давления 40 и 63 мм рт. ст., а для остальных предельных перепадов — на участке шкалы от 55 до 100% верхнего предела показаний.

Следовательно, расчет расходомерных сужающих устройств необходимо производить по предельному перепаду давления дифманометра

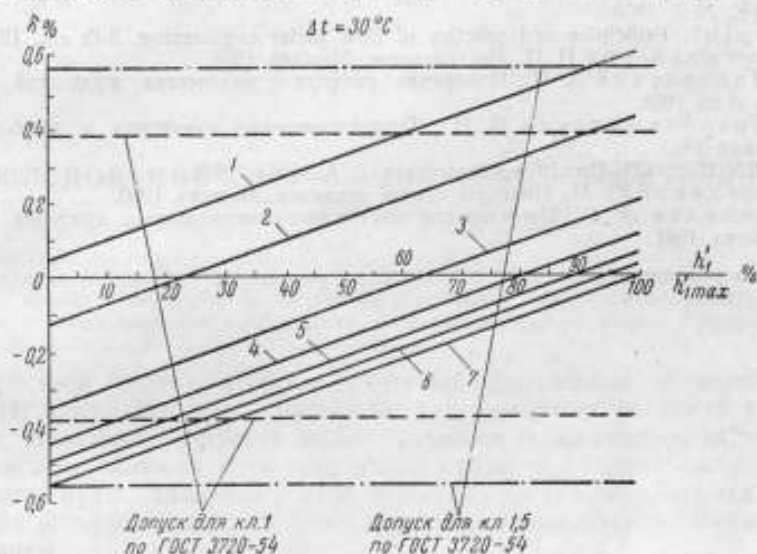


Рис. 3. Температурная погрешность (по перепаду) дифманометра (над ртутью находится воздух) при значениях h_1 max:

1 — 40 мм рт. ст.; 2 — 63 мм рт. ст.; 3 — 100 мм рт. ст.; 4 — 160 мм рт. ст.;
5 — 250 мм рт. ст.; 6 — 400 мм рт. ст.; 7 — 630—1000 мм рт. ст.

Таблица 2

Предельный номинальный перепад давления, мм рт. ст.	Абсолютное значение наибольшего изменения показаний в диапазоне 50—100% верхнего предела показаний при повышении температуры на 30°С ΔQ_{max} в % от Q_{max}	
	расчетное	допускаемое по ГОСТ 3720—60
40	0,30	0,75
63	0,22	
100	0,50	
160	0,65	
250	0,73	
400	0,78	
630	0,83	
1000	0,83	

при нормальной температуре, а дополнительную погрешность измерения расхода, возникающую вследствие эксплуатации прибора при иных температурах, можно учитывать по вышеприведенным расчетным данным. Вместе с тем с достаточной для практических целей точностью влияние температуры окружающего воздуха на результат измерений можно исключить соответствующим выбором предельного перепада давления дифманометра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kretzschmer Fr., Taschenbuch der Durchflussmessung mit Blenden, 6. Ausgabe, 1958.
2. Kretzschmer Fr., Die Eichung von Durchflussmessern und Wirkdruckwandlern, BWK, № 7, 1959.
3. Spink, Principles and practice of flow meter engineering, 8-th ed., 1958.
4. Кремлевский П. П., Расходомеры, Машгиз, 1955.
5. Павловский А. Н., Измерение расхода и количества жидкостей, газов и пара, Машгиз, 1951.
6. Преображенский В. П., Теплотехнические измерения и приборы, Госэнергоиздат, 1953.
7. DIN 1952, VDI-Durchflussmessregeln, 6. Ausgabe, 1948.
8. Богданов Ю. М., Приборы точной механики, Машгиз, 1960.
9. Яковлев Л. Г., Погрешности контрольно-измерительных приборов и датчиков, Машгиз, 1961.

Поступила в редакцию
24/VI 1961 г.

М. С. ПЕДАН
ВНИИМ

ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТНЫХ (ПИТО-СТАТИЧЕСКИХ) ТРУБОК

В статье содержатся результаты экспериментального исследования влияния носика и державки на показания скоростных (пито-статических) трубок, а также приводятся результаты, полученные другими исследователями.

Скоростные (пито-статические) трубки продолжают оставаться самыми распространенными приборами для измерения скорости газовых потоков. Измерение скорости этими трубками основывается на том, что у обтекаемого потоком тела существует точка, в которой скорость потока равна нулю. Давление в этой точке для потока газа при тех скоростях, при которых можно не учитывать его сжимаемость, выражается уравнением

$$p_n = p_0 + \frac{1}{2} \rho v^2,$$

где p_n — полное давление;

p_0 — статическое давление, которое можно определить как давление на поверхность достаточного малого твердого тела, движущегося со скоростью потока;

ρ и v — плотность газа и скорость невозмущенного потока.

Из этого уравнения легко может быть определена скорость потока, если предварительно измерены полное и статическое давления или разность между ними. Измерение полного давления не вызывает особых затруднений. Любая изогнутая трубка, направленная отверстием навстречу потоку, передает к микроманометру полное давление [1]. Значительно сложнее обстоит дело с измерением статического давления. Показания статического давления зависят от расположения приемных отверстий на носике, т. е. от расстояния между отверстиями и державкой, а также зависят от состояния стенок отверстий, их размеров и других причин.

Экспериментальное изучение влияния носика и державки на показания статического давления проводили многие исследователи. Ниже рассмотрены результаты основных исследований. Оуэр и Иогансен [2] исследовали влияние на статическое давление формы головки и положения отверстий для трубки диаметром 16 мм. Опыты производились в аэроди-

намической трубе диаметром 100 мм с закрытой рабочей частью при скоростях воздушного потока 6, 12 и 21 м/сек. Испытано было четыре формы головки: три в виде усеченного конуса с конусностью 1:20, 1:10, 1:5 и одна полусферическая. Показания трубок сравнивались с показаниями образцовой трубки, в качестве которой была применена стандартная трубка английской национальной физической лаборатории. В результате исследований было установлено следующее: 1) показания статического давления зависят в основном от расстояния x_1 между началом цилиндрической части трубки и отверстиями и практически не зависят от формы головки; 2) при расположении отверстий на расстоянии x_1 больше $6d$ (d — диаметр трубки) показания статического давления практически не изменяются. С уменьшением расстояния статическое давление значительно уменьшается; 3) наличие стержня приводит к повышению давления, которое показано на рис. 1.

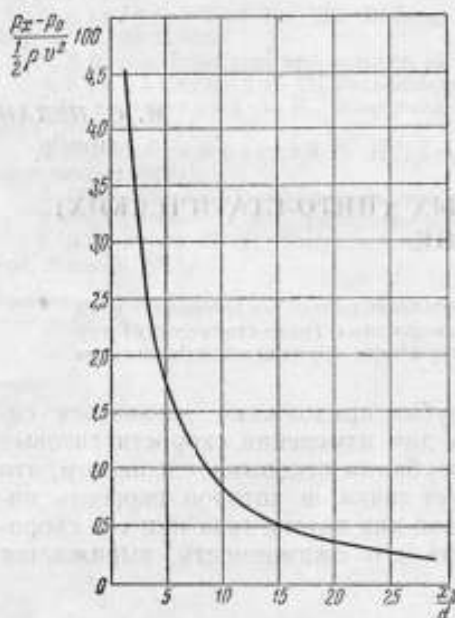


Рис. 1.

Опыты производили в аэродинамической трубе с открытой рабочей частью диаметром 500 мм. В результате опытов было установлено, что влияние носика на отверстия статического давления мало заметно, если они расположены на расстоянии не менее $5d$ от головки. Было также установлено, что при расположении отверстий на расстоянии больше $4d$ от державки статическое давление не зависит от формы сочленения державки с носиком. На основании опытов Мерриам и Сполдинг рекомендовали для трубок с полусферической головкой длину носика $24d$ при отверстиях на расстоянии $8d$ от головки.

Хаберд [4] в своей работе определил влияние державки на показания статического давления в зависимости от угла между осями державки и отверстия. Опыты производились в трубе диаметром 300 мм в потоке воды. В испытываемой трубке статические отверстия находились на расстоянии $11d$ от головки, диаметр трубки 21 мм. В результате опытов установлено, что показания давления изменяются лишь при размещении державки относительно отверстий на расстоянии меньше $6d$.

Согласно Поуп [5] влияние носика и державки на давление представлено на рис. 2, где $\Delta p'$ и $\Delta p''$ обозначают изменение давления в зависи-

от формы головки; 2) при расположении отверстий на расстоянии x_1 больше $6d$ (d — диаметр трубки) показания статического давления практически не изменяются. С уменьшением расстояния статическое давление значительно уменьшается; 3) наличие стержня приводит к повышению давления, которое показано на рис. 1. По оси абсцисс отложено расстояние x_2 между державкой и отверстиями в диаметрах трубки. По оси ординат нанесена разность между наблюдаемым и действительным давлением в процентах скорости напора, т. е.

$$\frac{P_s - P_0}{\frac{1}{2} \rho v^2} \cdot 100.$$

Мерриам и Сполдинг* изучали изменение статического давления у трубки с полусферической головкой диаметром 8 мм в зависимости от положения отверстий.

* Данные Мерриама и Сполдинга взяты из статей Фольсона [3] и Хаберда [4].

мости от расположения отверстий относительно головки и державки соответственно. Для получения действительных значений скоростного напора рекомендуется размещать отверстия статического давления на расстоянии $9d$ от державки и $2,5d$ от головки.

Краузе* на основе экспериментальных данных указывает, что при скоростях до $Ma = 0,6$ трубки с полусферической головкой, у которых отверстия размещены на расстоянии относительно головки от 3 до $7d$, показывают одно и то же статическое давление. Относительно влияния державки Краузе утверждает, что оно является функцией двух величин: расстояния между державкой и отверстиями и отношения диаметра державки к диаметру струи при $5 < \frac{x_2}{x} < 10$. В сравнении с бесконечным потоком в струе ограниченного диаметра трубка дает меньшие показания статического давления.

Ознакомление с приведенными выше исследованиями позволяет отметить расхождение между результатами отдельных авторов. Так, например, если по Краузе показания статического давления не меняются при изменении расстояния между отверстиями и головкой от $3d$ до $7d$, то по Мер-

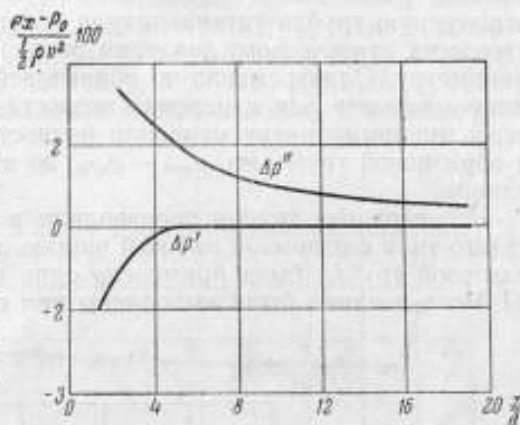


Рис. 2.

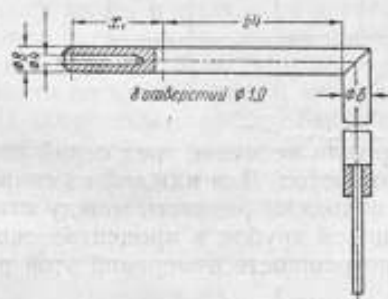


Рис. 3.

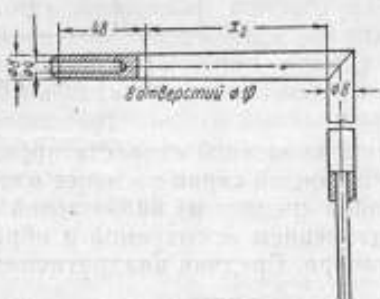


Рис. 4.

риаму и Сполдингу показания практически не изменяются при расстоянии больше $5d$. Хабберд рекомендует размещать отверстия на расстоянии не меньше $6d$ от державки, а Мерриам и Сполдинг рекомендуют делать это расстояние равным $16d$.

Таким образом, по результатам указанных выше работ не представляется возможным установить однозначную зависимость между геометрией и показаниями трубок, и, чтобы уточнить эту зависимость, требовались дополнительные исследования. Такие исследования были выполнены. Для определения влияния носика и державки на величину измеряемого статического давления были изготовлены две партии трубок. У всех трубок первой партии (рис. 3) расстояние между отверстиями и державкой одинаково — $8d$. Трубки отличаются между собой лишь рас-

* Данные Краузе взяты из статьи Фольсома [3].

положением отверстий относительно головки, т. е. размером x_1 . Было изготовлено пять трубок, у которых расстояния x_1 составляет $2d$, $3d$, $4d$, $6d$ и $8d$. У трубок второй партии (рис. 4) расстояния между головкой и отверстиями одинаково — $6d$, а расстояние x_2 между отверстиями и державкой разное и соответственно равно $2d$, $4d$, $6d$, $8d$, $12d$, $14d$, $20d$ и $25d$. Статическое давление, измеряемое испытываемыми трубками, было сравнено с показанием образцовой трубки. Для этого образцовую и испытываемую трубки устанавливали в потоке аэродинамической трубы и отверстия статического давления обеих трубок подсоединяли к микроманометру. Одновременно к образцовой трубке подсоединяли другой микроманометр для измерения скорости потока. В ходе опыта по одному микроманометру измеряли разность давлений между испытываемой и образцовой трубками, $p_{исп} - p_{обр}$, по второму — величину скоростного напора.

Исследование трубок производили в аэродинамической трубе замкнутого типа с открытой рабочей частью диаметром 0,5 м. В качестве образцовой трубки была применена одна из образцовых трубок ВНИИМ [6]. Исследования были выполнены при скоростях потока $10 \div 50$ м/сек.

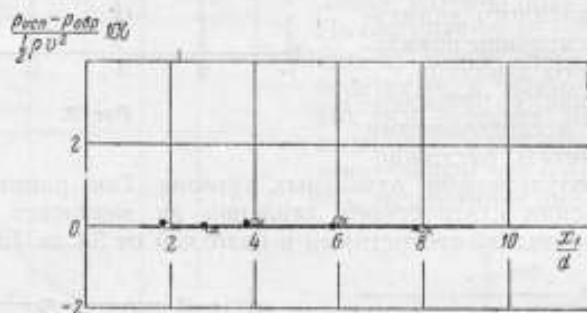


Рис. 5.

при этом на каждой скорости производили не менее трех серий измерений, а в каждой серии не менее пяти отсчетов. Для каждой из скоростей вычисляли среднее из наблюдений и находили разность между статическим давлением испытываемой и образцовой трубок в процентах скоростного напора. Средняя квадратичная погрешность измерений этой разности составляет 0,06% от скоростного напора $\frac{1}{2} \rho v^2$.

Результаты испытания трубок с различным расстоянием x_1 между отверстиями и головкой при скоростях 10, 30 и 50 м/сек даны на рис. 5, где приняты следующие обозначения: ● — 10 м/сек; ○ — 30 м/сек; × — 50 м/сек. По горизонтальной оси отложены расстояния между отверстиями и головкой в диаметрах трубок, т. е. отношения $\frac{x_1}{d}$. По вертикальной оси нанесены разности измеренного статического давления испытываемой и образцовой трубками в процентах скоростного напора. Полученные результаты позволяют отметить следующее: расхождение между показаниями статического давления отдельными испытываемыми трубками весьма невелико и, как правило, находится в пределах точности измерения. Поэтому можно считать, что трубки, у которых расстояние между головкой и отверстиями изменяется от 2 до $8d$, а расстояние до державки остается постоянным ($8d$), имеют одинаковые по-

казания статического давления и в пределах точности опытов равные показаниям образцовой трубки.

Результаты исследования трубок с разными расстояниями x_2 между отверстиями и державкой при скоростях 10, 30 и 50 м/сек представлены на рис. 6, где приняты следующие обозначения: • — 10 м/сек; о — 30 м/сек; × — 50 м/сек. Полученная кривая позволяет отметить следующее: при изготовлении трубок державку не следует размещать на расстоянии меньше $8d$ относительно отверстий. Трубки, у которых отверстия находятся на расстоянии $6d$ от головки и $8d$ от державки, имеют показания статического давления, наиболее близкие с показаниями образцовой трубки в сравнении с показаниями остальных испытанных трубок, у которых расстояние между отверстиями и головкой

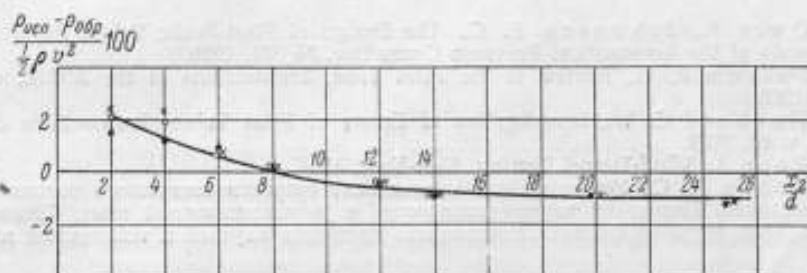


Рис. 6.

также равно $6d$, а расстояние между отверстиями и державкой изменяется от 2 до $25d$.

Если иметь в виду, что погрешность измерения полного давления, а также погрешность статического давления при размещении отверстий на расстоянии от 2 до $8d$ относительно головки можно считать равными нулю, то по кривой рис. 6 возможно оценить общую погрешность показаний скоростных трубок. Такая оценка погрешности была сделана для 9 трубок разных размеров. Одновременно коэффициенты этих трубок были получены путем непосредственного сличения их с образцовой. Полученные значения погрешностей для сравнения приведены в таблице.

Размеры носка			Форма головки	Погрешность определения скоростного напора, %	
$\frac{x_1}{d}$	$\frac{x_2}{d}$	$d, \text{ мм}$		по кривой	по сличению
7,5	5,5	8	Полусферическая	0,7	0,6
5,6	14,0	8	"	-0,8	-0,6
7,0	15,5	8	"	-0,9	-1,2
5,9	14,4	9	"	-0,8	-1,0
5,7	25,0	8	"	-1,0	-0,9
6,0	25,0	8	Скошусностью 1:10	-1,0	-1,2
7,0	9,0	4	Полусферическая	-0,2	0,0
3,8	5,7	6	"	0,6	0,0
2,2	5,9	8	Скошусностью 1:10	0,6	0,0

Из таблицы видно, что для трубок диаметром 8 мм с полусферической головкой погрешности измерения скоростного напора, определяемые по кривой, хорошо совпадают с погрешностями, полученными при сличении трубок. Расхождение между погрешностями составляет 0,1—0,3% скоростного напора или 0,05—0,15% измеряемой скорости.

Выполненные исследования позволяют рекомендовать к изготовлению скоростные (пито-статические) трубки с полусферической головкой и отверстиями на расстоянии $3d$ и $8d$ относительно головки и державки при диаметре 8 мм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zahn A. F. Measurement of Air Velocity and Pressure, Physical Review, v. 17, 1903.
2. Ower E., Johansen F. C., The Design of Pitot-Static Tubes, Reports and Memoranda of the Aeronautical Research Committee, № 981, 1926.
3. Folsom R. G., Review of the Pitot Tube, Transactions of the ASME, v. 78, № 7, 1956.
4. Hubbard C. W., Investigation of Errors of Pitot Tubes, Transactions of the ASME, v. 61, 1939.
5. Pope A., Wind-Tunnel Testing, New-York, 1954.
6. Педан М. С., Установка для определения скорости воздушного потока методом ионизации. Передовой научно-технический и производственный опыт, Сборник 2, тема 34, 1958, Издание филиала Всесоюзного института научной и технической информации.

Поступила в редакцию
7/VI 1961 г.

А. И. ПЕТРОВ
ВНИИК

ПОВЕРКА ОБЪЕМНЫХ СЧЕТЧИКОВ НА ЖИДКОСТЯХ-ЗАМЕНИТЕЛЯХ

В статье рассмотрен вопрос поверки объемных счетчиков на так называемых жидкостях-заменителях. Дана общая теория вопроса и приведены результаты опытных исследований для нескольких типов счетчиков.

Число жидкостей, измерение количества которых производится при помощи объемных счетчиков, весьма велико и характеризуется сотнями наименований. Например, счетчики с овальными шестернями изготавливаются для измерения более чем 700 различных жидкостей.

В связи с большим разнообразием измеряемых жидкостей, в том числе агрессивных, обладающих различными физико-химическими свойствами, которые влияют на показания счетчиков и в ряде случаев могут быть опасными для обслуживающего персонала, возникают большие трудности при поверке счетчиков. Очевидно, при указанных выше условиях применения счетчиков целесообразно при их поверке применять некоторую ограниченную группу жидкостей, которые в дальнейшем мы будем называть жидкостями-заменителями.

Жидкости-заменители должны удовлетворять следующим требованиям:

1. Безвредность и безопасность для обслуживающего персонала.
2. Нейтральность по отношению к материалам, из которых изготовлены детали счетчика.
3. Малая испаряемость.
4. Однородность и постоянство физико-химических свойств во времени в требуемом интервале температур.
5. Возможность быстрой и полной очистки прибора от жидкости после испытания.

Применение жидкостей-заменителей требует методики, позволяющей по погрешностям счетчика, полученным при поверке его на этих жидкостях, оценить погрешности при работе счетчика на жидкости, для измерения которой он предназначен.

Изучение литературных материалов показало, что за границей испытание и поверка счетчиков жидкостей (в том числе применяемых в химической промышленности) производятся либо непосредственно рабочими жидкостями, либо их заменителями: водой, керосином или маслом.

Разработанная методика в принципе применима ко всем типам объемных счетчиков, так как она основана на следующих общих свойствах этих счетчиков: все счетчики жидкостей объемного типа имеют деталь, именуемую рабочим телом или поршнем; эта деталь, совершая под действием разности давлений то или иное колебательное или вращательное движение внутри камеры прибора, за один период своего движения вытесняет объем жидкости, который обычно считается равным объему камеры. Последнее предположение, однако, неточно отражает действительную картину, так как у всех приборов объемного типа (за исключением счетчика с уплотненным цилиндрическим поршнем) между поршнем и камерой существуют неплотности — зазоры, через которые часть измеряемой жидкости протекает, оставаясь неучтенной. Движение поршня под действием почти одного статического давления и частичное протекание измеряемой жидкости через зазоры, которые ввиду их малой ширины могут считаться как бы образованными двумя плоскостями, эти два обстоятельства позволили дать общую теорию счетчиков объемного типа, т. е.: зависимость между погрешностью счетчика, величиной расхода измеряемого потока жидкости, числом оборотов или колебаний поршня и другими параметрами, характеризующими прибор и измеряемую жидкость.

Результат теоретического исследования показал, что переход от кривой погрешностей счетчика $\delta_1(Q; \mu_1; \rho_1)$ при измерении жидкости с вязкостью μ_1 и плотностью ρ_1 к другой кривой погрешностей $\delta_2(Q; \mu_2; \rho_2)$ при измерении жидкости с вязкостью μ_2 и плотностью ρ_2 определяется следующим уравнением:

$$\delta_2(Q; \mu_2; \rho_2) = c_0 - [c_0 - \delta_1(Q; \mu_1; \rho_1)] \frac{(\Delta P_2) \mu_1}{(\Delta P_1) \mu_2}, \quad (1)$$

где Q — расход жидкости;
 ΔP_1 и ΔP_2 — перепады давлений на поршне счетчика;
 c_0 — постоянная счетчика, равная

$$c_0 = 100 \left(\frac{A}{nW} - 1 \right), \quad (2)$$

где A — объем жидкости, отсчитанный счетчиком за один оборот стрелки циферблата;

n — передаточное число, т. е. число колебаний или оборотов поршня, при котором счетчик отсчитывает объем, равный A ;

W — полезный объем камеры прибора, равный объему жидкости, вытесняемой поршнем за один оборот или одно колебание.

Для определения разности давлений ΔP , действующей на поршень, был применен метод теории размерностей.

Разность давлений ΔP на поршне счетчика возникает вследствие сопротивления, которое испытывает поршень при своем движении. Это сопротивление складывается из сопротивления ΔP_1 при движении поршня в жидкости и сопротивления ΔP_2 при скольжении поршня по поверхности камеры с воздействием веса поршня.

Таким образом, общее сопротивление ΔP равно

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2, \quad (3a)$$

причем для ΔP_1 и ΔP_2 имеют место следующие функциональные соотношения:

$$\Delta P_1 = F(V, \rho, \mu, d, r_1, r_2, \dots, r_n); \quad (3b)$$

$$\Delta P_2 = F(V, d, \mu, g, r_1, r_2, \dots, r_n), \quad (4)$$

где U — скорость потока жидкости в счетчике;

- μ — динамическая вязкость жидкости;
 ρ — плотность жидкости;
 d — диаметр поршня счетчика;
 g — вес поршня;
 r_1, r_2, \dots, r_n — безразмерные параметры, характеризующие реометрические особенности прибора.

Размерности величин, входящих в уравнения (3а) и (4), даны в таблице.

Наименование переменных	Обозначения	Формула размерностей
Перепад давления на поршне	ΔP	$ML^{-1} T^{-2}$
Скорость потока в счетчике	v	LT^{-1}
Динамическая вязкость жидкости	μ	$ML^{-1} T^{-1}$
Плотность жидкости	ρ	ML^{-3}
Диаметр поршня	d	L
Вес поршня	g	MLT^{-2}

Введем теперь в уравнение (3б) функции безразмерных величин. Число независимых величин равно трем (L, M, T), поэтому должны существовать зависимости

$$\pi_1 = F(\pi_2, r_1, r_2, \dots, r_n), \quad (5)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \pi_1 &= V^\alpha \Delta P^\beta \mu^\gamma \rho^\delta d^\epsilon \\ \pi_2 &= V^\alpha \Delta P^\beta \mu^\gamma \rho^\delta d^\epsilon \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

причем величины π безразмерны.

Таким же образом, принимая во внимание уравнение (4), получим

$$[\pi]_1 = F([\pi]_2, r_1, r_2, \dots, r_n), \quad (7)$$

где

$$\left. \begin{aligned} [\pi]_1 &= V^\alpha \Delta P^\beta \mu^\gamma g^\delta d^\epsilon \\ [\pi]_2 &= V^\alpha \Delta P^\beta \mu^\gamma g^\delta d^\epsilon \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Для определения показателей $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \lambda, \epsilon$ следует написать условие нулевых размерностей, причем два показателя можно брать произвольной величины. Определяя из указанных условий численные значения величин $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \lambda, \epsilon$ и принимая во внимание формулы (3а), (3б), (4) — (6), получаем следующее уравнение, определяющее разность давлений ΔP :

$$c \Delta P = \frac{Q^2 \rho}{d^4} F_1\left(\frac{Q}{vd}\right) + \frac{g}{d^2} F_2\left(\frac{Qv}{dg}\right), \quad (9)$$

где ν — кинематическая вязкость измеряемой жидкости;
 c — постоянная.

Из уравнения (9) видно, что перепад давления на поршне счетчика зависит от двух безразмерных параметров $Re = \frac{Q}{vd}$ и $\frac{Qv}{dg}$, что позволяет определять значение величины $c \Delta P$ для всех геометрически подоб-

ных счетчиков, если значения функций F_1 и F_2 определены для счетчика одного какого-либо калибра.

Формулы (1) и (9) показывают, что для практического применения разработанного метода необходимо знать величину постоянной счетчика c_0 , а также значение функций F_1 и F_2 . Эти значения функций были определены по кривым погрешностей, полученным для счетчиков СВШ 5 $\frac{16}{40}$ при измерении количества жидкостей с различной вязкостью.

Для определения погрешностей счетчиков применялась образцовая весовая установка ВНИИК, принципиальная схема которой и общий вид даны на рис. 1 и 2.

Установка имеет сливной бак вместимостью 1000 л. Для подогрева жидкости в сливном баке смонтированы трубчатые электронагреватели с герметизированными контактами. В баке помещается приемный клапан с сеткой, присоединенный к всасывающей трубе. Для подачи жидкости в напорный трубопровод имеются два насоса: центробежный для маловязких жидкостей и объемный насос для жидкостей вязкостью более 30÷40 сст. Параллельно основному напорному трубопроводу присоединены фильтр-воздухоотделитель и теплообменники-охладители. Теплообменники представляют собой цилиндрические сосуды с помещенными внутрь испарителями фреоновой холодильной установки. Напорный трубопровод присоединен к стенду для установки счетчиков. Стенд рассчитан на установку счетчиков с диаметром не более 40÷50 мм. Трубопровод за стендом имеет две линии: одну для возврата жидкости в сливной бак, используемую для установления режима потока, и основную линию для подачи жидкости в бак образцовых гидравлических весов ОГВ-1.

Весовой бак имеет двойные стенки. Жидкость поступает по трубе в полость между днищами, поднимается по зазору между боковыми стенками и переливается во внутренний бак через его стенки, которые сделаны несколько ниже стенок наружного бака. Такое устройство бака обеспечивает постоянство расхода жидкости, так как противодавление жидкости в баке остается постоянным. Кроме того, это обеспечивает полное отсутствие аэрации рабочей жидкости.

Для того чтобы во время взвешивания бака отсутствовала жесткая связь между баком и трубопроводом, имеется откидывающийся участок трубопровода с винтовым зажимом. Для регулирования расхода жидкости на трубопроводе за стендом имеется кран со шкалой и стрелкой.

Данная установка позволяет производить измерение объема жидкости, пропущенной через счетчик, с погрешностью, не превышающей 0,05%.

Значения функций F_1 и F_2 , полученные на основании экспериментальных данных, могут быть представлены следующими аналитическими выражениями:

$$F_1(Re) = \frac{165}{Re^{0,72} - 75} \quad \text{при } Re \geq 1000, \quad (10)$$

$$F_1(Re) = \frac{165}{Re^{0,02} - 10,5} \quad \text{при } Re < 1000, \quad (11)$$

$$F_2\left(\frac{Q_v}{dg}\right) = \left(\frac{gd}{Q_v}\right)^{0,25} 1,06 \cdot 10^{-5}. \quad (12)$$

Указанные выражения F_1 и F_2 могут применяться для пересчета погрешностей при измерении количества жидкостей, величины вязкостей

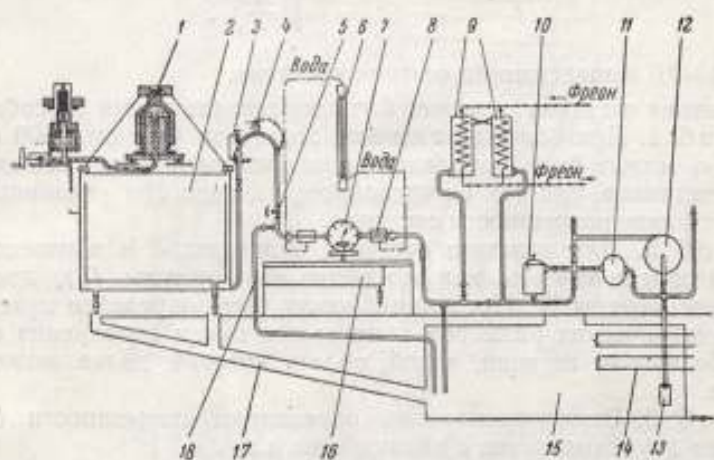


Рис. 1. Схема образцовой установки для испытаний и поверки объемных счетчиков жидкостей.

1 — гидравлические весы; 2 — бак для гидравлических весов; 3 — винтовой зажим; 4 — откидывающийся участок трубопровода; 5 — кран для регулирования расхода; 6 — дифференциальный манометр; 7 — поверяемый счетчик; 8 — разделительный сосуд; 9 — теплообменники-охладители; 10 — фильтр-воздухоотделитель; 11 — насос шестеренный; 12 — насос центробежный; 13 — клапан прерывной; 14 — нагреватели; 15 — бак сананой; 16 — стелд для установки счетчика; 17 — сливной трубопровод; 18 — обратная (пролетная) линия.

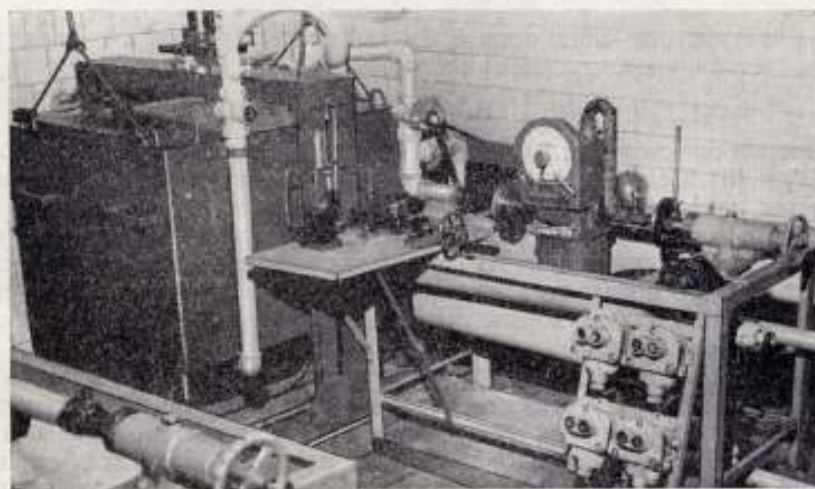


Рис. 2. Общий вид весовой установки ВНИИК.

которых лежат в пределах (0,5—25) *снз*. Для пересчета погрешностей жидкостей, вязкости которых лежат в пределах 25—500 *снз*, формулу (1) следует представить в следующем виде:

$$\delta_2 = c_0 - (c_0 - \delta_1) \left(\frac{\nu_1}{\nu_2} \right)^n, \quad (13)$$

где $n = 0,3 \div 0,6$ в зависимости от типа счетчика.

Постоянная счетчика c_0 может быть определена тремя способами.

Способ 1. При большой вязкости жидкости (порядка 500 *снз*) постоянная c_0 может быть определена непосредственно на установке для поверки счетчиков, так как ее численное значение при указанных условиях будет равно погрешности счетчика.

Способ 2. Для каждого счетчика величины A и n известны, поэтому для определения c_0 , как это видно из формулы (2), достаточно знать объем камеры W . Последний может быть определен путем измерения геометрических размеров камеры или путем заполнения ее жидкостью, свободных от поршня, водой, объем которой далее может быть определен.

Способ 3. Экспериментально определяют погрешности δ_1 и δ_2 счетчика на двух жидкостях с различными μ и ρ .

Подставляя найденные значения δ_1 и δ_2 в формулу (1), можно вычислить постоянную c_0 , так как все величины, кроме c_0 , известны.

На основании полученных результатов представляется целесообразным предложить следующий метод поверки счетчиков на жидкостях-заменителях:

1. Счетчик поверяется на двух жидкостях, одна из которых имеет вязкость $\mu_1 \approx 25$ *снз*, а вторая — вязкость $\mu_2 \approx 1-1,5$ *снз* (такими жидкостями могут быть, например, трансформаторное масло и вода или керосин).

2. На основании полученных данных определяется постоянная счетчика c_0 .

3. Если вязкость жидкости μ , для измерения которой предназначена счетчик, удовлетворяет условию

$$\mu_2 \leq \mu \leq \mu_1,$$

то погрешности счетчика для рабочей жидкости вычисляются по формулам (1) и (9). Если же $\mu > \mu_1$, то погрешность для рабочей жидкости вычисляется по формуле (13).

Разработанная методика была проверена экспериментально на счетчиках СВШ и на счетчиках ДБ (в области вязкости от 25 до 500 *снз*).

На рис. 3—5 показаны кривые погрешностей счетчиков, полученные экспериментально, а также полученные путем пересчета по разработанной методике.

Как видно из приведенных графиков, для жидкостей с большой вязкостью (выше 25 *снз*) имеет место полное совпадение кривых погрешностей, полученных экспериментально с вычисленными кривыми погрешностей. Для жидкостей с вязкостью меньшей 25 *снз* в области измерений с границами от максимального расхода до 15% этого значения имеет место совпадение указанных кривых погрешностей с погрешностью 0,1÷0,15%. В области, лежащей ниже 15% верхнего предела измерений, имеются расхождения до 0,3 ÷ 0,4%.

Отсутствие приборов малых калибров со стабильными характеристиками не позволяет сделать окончательных выводов относительно точности предложенного метода пересчета погрешностей для этих счетчиков.

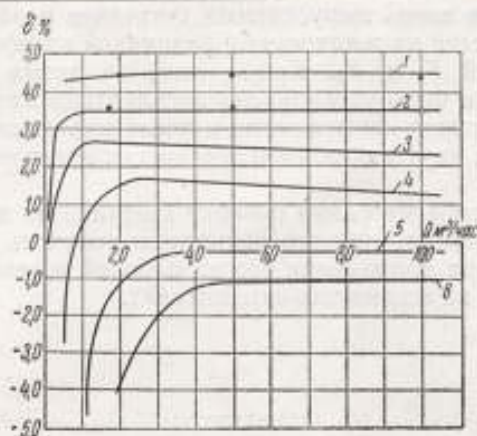


Рис. 3. Кривые погрешности счетчика ДБ № 118.

1 — глицерин $\nu = 516$ сст, $\rho = 1,244$ г/см³; 2 — глицерин $\nu = 58,3$ сст, $\rho = 1,212$ г/см³; 3 — солеровое масло $\nu = 27,3$, $\rho = 0,892$ г/см³; 4 — топливо ТС $\nu = 1,43$ сст, $\rho = 0,782$ г/см³; 5 — вода при $t = 20^\circ$ С; 6 — вода при $t = 40^\circ$.
 * — точки, полученные путем пересчета с кривой погрешности на солеровом масле.



Рис. 4. Кривые погрешности счетчика СВШ $\frac{5}{16}$ № 7729.

1 — глицерин $\nu = 516$ сст, $\rho = 1,244$ г/см³; 2 — глицерин $\nu = 58$ сст, $\rho = 1,212$ г/см³; 3 — солеровое масло $\nu = 27,3$ сст, $\rho = 0,892$;
 * — точки, полученные путем пересчета с кривой погрешности на солеровом масле.

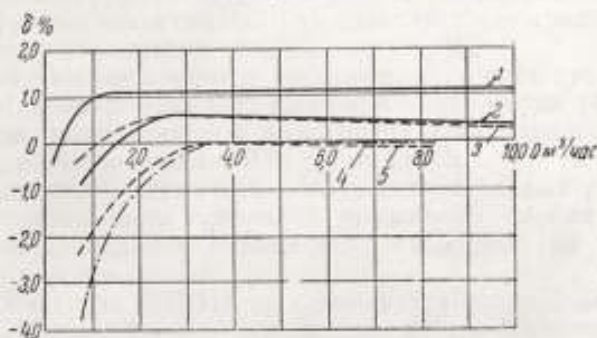


Рис. 5. Кривые погрешности счетчика СВШ $\frac{16}{40}$ № 8593.

1 — масло $\nu = 27,3$ сст, $\rho = 0,876$ г/см³; 2 — вода $\nu = 1,2$ сст, $\rho = 1$ г/см³; 3 — вода (кривая получена путем пересчета с кривой погрешности на масле); 4 — бензин $\nu = 0,9$ сст, $\rho = 0,7$ г/см³ (кривая получена путем пересчета с кривой погрешности на масле); 5 — бензин $\nu = 0,9$ сст, $\rho = 0,7$ г/см³ (кривая получена путем пересчета с кривой погрешности на воде).

При испытании вновь выпускаемых счетчиков необходимо построить кривые погрешностей на жидкостях с различной вязкостью и определить значения функций F_1 и F_2 . Кроме того, во время предварительных испытаний должна быть установлена эксплуатационная стойкость счетчиков. Для этого перед испытаниями и после них строят кривые погрешности счетчика на двух каких-либо жидкостях при одних и тех же условиях.

Изложенная выше методика поверки счетчика на жидкостях-заменителях дает возможность при его испытании получить значение погрешностей счетчика при применении его на рабочей жидкости по погрешностям, полученным на жидкостях-заменителях.

Поступила в редакцию
24/VI 1961 г.



К. И. ХАНСУВАРОВ

ВНИИК

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗЦОВОГО ГРУЗОПОРШНЕВОГО БАРОМЕТРА 1-го РАЗРЯДА

В статье изложены результаты исследования образцового поршневого барометра, основанного на принципе комбинированного уравновешивания атмосферного давления. Средняя квадратичная погрешность барометра в зависимости от условий измерений колеблется от 0,005 до 0,02 мм рт. ст. Прибор может быть использован в качестве образцового барометра 1-го разряда.

Современное положение в области барометрии можно осветить следующим образом.

1. Большинство современных барометров основано на уравновешивании атмосферного давления столбом жидкости (ртути) или упругими силами различного рода пружин.

2. Наиболее точными барометрами являются жидкостные (ртутные) барометры. Так, погрешность ртутного эталонного барометра ВНИИМ составляет около 0,005 мм рт. ст., авиационный ртутный барометр с цифровым отсчетом (США) позволяет непосредственно отсчитывать тысячные доли дюйма (0,025 мм рт. ст.) [1].

3. Высокая чувствительность достигнута лучшими пружинными барометрами. Микробарометр Gb5 фирмы Аскания-Верке (ФРГ) с упругим элементом, выполненным в виде полый геликоидальной пружины, дает точность отсчетов порядка 0,01 мм рт. ст. [2].

4. Громоздкость и сложность обслуживания точных ртутных барометров и нестабильность показаний пружинных барометров привели к необходимости создания барометров, основанных на принципе неуплотненного поршня.

В 1955—1956 гг. во ВНИИК по схеме, разработанной автором совместно с В. Н. Граменицким, был создан ртутно-поршневой барометр с уравновешенным поршнем. Средняя квадратичная погрешность барометра при сличении с эталонным ртутным барометром ВНИИМ составила 0,02 мм рт. ст. Однако вследствие вредного влияния ртути на здоровье человека и ряда других причин применение ртутно-поршневого барометра следует считать нежелательным. Наиболее простой схемой безртутного поршневого барометра является схема барометра с опрокинутым поршнем. Принцип опрокинутого поршня для измерения раз-

режения впервые предложен П. В. Индриком,* а в последнее время применен им и для измерения атмосферного давления [3].

При измерениях атмосферного давления, величина которого непрерывно изменяется, применение только грузов представляет значительные неудобства, поэтому схема описываемого поршневого барометра включает устройство, позволяющее уравновешивать часть атмосфер-

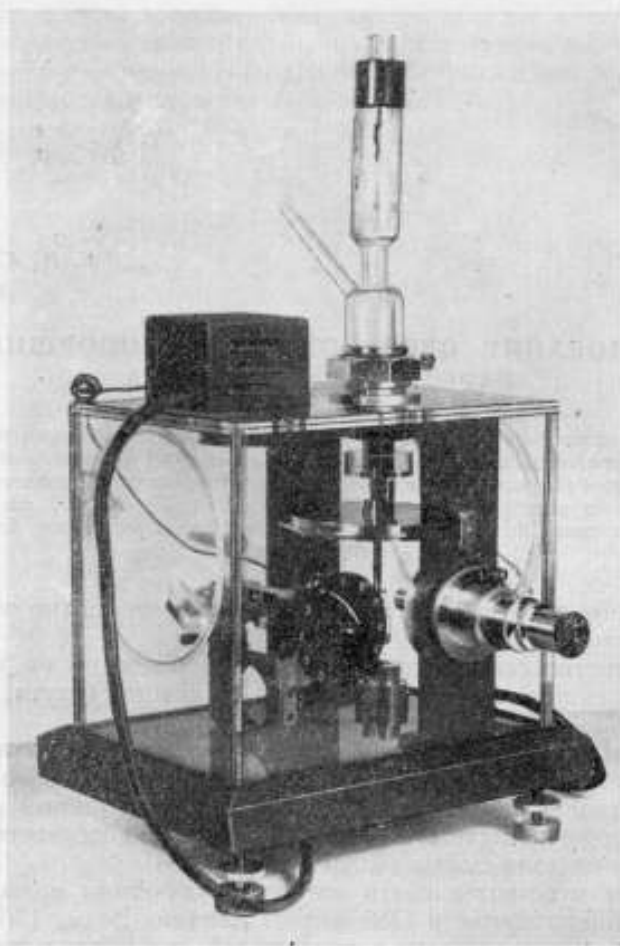


Рис. 1. Общий вид грузопоршневого барометра

ного давления без наложения разновесов. Схема барометра такого типа впервые предложена автором** [4]. Барометр основан на принципе комбинированного уравновешивания атмосферного давления: основная часть веса неуплотненного поршня уравновешивается атмосферным давлением, а остаток — усилием, развиваемым пружинным механизмом.

На рис. 1 показан общий вид грузопоршневого барометра.

* Авторское свидетельство № 63541, 1939.

** Авторское свидетельство № 114788, 1957.

Уравнения измерений

Поршневой барометр с опрокинутым поршнем имеет два основных узла: неуплотненную поршневую пару и устройство, обеспечивающее плавное уравнивание части веса поршня.

Обобщенная схема грузопоршневого барометра представлена на рис. 2. Поршневой барометр состоит из поршня, притертого к цилиндру. Нижний конец поршня опирается на пружину. Если в пространстве над верхним торцом поршня откачан воздух, то уравнение равновесия поршня приводит к следующей формуле, определяющей измеряемое атмосферное давление

$$B = \frac{G - N}{F} + p, \quad (1)$$

где G — вес поршня (в воздухе);

N — усилие, развиваемое пружиной;

B — величина атмосферного давления на уровне верхнего торца поршня (см. рис. 2, $a-a$);

p — величина остаточного давления над верхним торцом поршня;

F — эффективная площадь поршня.

Согласно формуле (1) диапазон изменения атмосферного давления, в пределах которого показания барометра отсчитываются по шкале пружины, равен

$$\Delta B = \frac{\Delta N}{F},$$

где ΔN — диапазон, в пределах которого может изменяться усилие пружины.

Величина усилия развиваемого пружиной, в общем случае определяется формулой

$$N = N_0 + cx, \quad (2)$$

где $c = \frac{\alpha}{L}$; α — угловая «жесткость», L — длина коромысла;

x — перемещение поршня (см. также рис. 2);

N_0 — начальное усилие, развиваемое пружинным механизмом.

Выражения, определяющие жесткость пружины и величину усилия, зависят от типа и конструкции уравнивающего устройства.

Для поршня, свободно плавающего в воздухе (без какого-либо уравнивающего устройства), жесткость обуславливается только изменением давления столба воздуха при перемещении поршня:

$$c = F\rho_a g,$$

где ρ_a — плотность воздуха;

g — ускорение силы тяжести.

Выбор пределов измерения по шкале пружины и величины остаточного давления над верхним торцом поршня определяется их влиянием на погрешность показаний барометра.

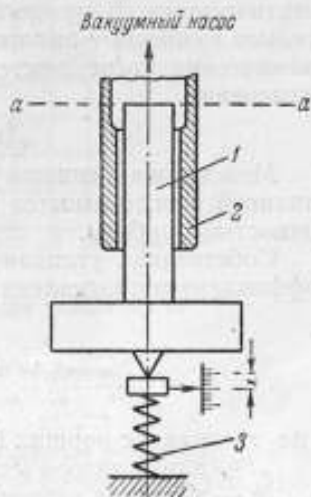


Рис. 2. Схема грузопоршневого барометра.
1 — поршень; 2 — цилиндр; 3 — пружина.

Относительная средняя квадратичная погрешность измерения атмосферного давления согласно формуле (1) равна

$$S_B \approx \sqrt{\left(\frac{G}{G-N}\right)^2 S_G^2 + \left(\frac{N}{G-N}\right)^2 S_N^2 + S_F^2 + \left(\frac{pF}{G-N}\right)^2 S_p^2}, \quad (3)$$

где S_G , S_F , S_N и S_p — относительные средние квадратичные погрешности определения соответственно веса поршня, эффективной площади поршня, усилия пружины и давления над верхним торцом поршня.

Как видно из формулы (3), погрешность измерения уменьшается при уменьшении N и p . Однако при уменьшении N уменьшается диапазон измерения по шкале. Уменьшение остаточного давления p также имеет предел, так как трудно обеспечить идеальную герметичность откачной системы и барометра. Поэтому следует применять наиболее точные уравновешивающие устройства и приборы для измерения остаточного давления.

Предельные погрешности определения веса поршня и эффективной площади поршня, как показал опыт применения поршневых приборов, могут быть доведены до 0,001—0,002%.

Перечисленные выше погрешности по своему характеру являются статическими. В процессе измерения атмосферного давления дополнительно возникают динамические погрешности. Для оценки величины динамических погрешностей необходимо рассмотреть динамику процесса измерения.

Динамические погрешности

Между показаниями любого прибора и измеряемой переменной величиной всегда имеется некоторое несоответствие, вызываемое инерционностью прибора.

Собственная угловая частота k колебаний поршня барометра и коэффициент сопротивления n принимают следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} k &= \sqrt{\frac{c}{\pi r^2} \cdot \frac{g}{B}} \\ n &= \frac{\mu l}{r h} \cdot \frac{g}{B} \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

где r — радиус поршня барометра;

l — длина зазора между поршнем и цилиндром;

h — величина зазора;

μ — динамическая вязкость рабочей жидкости;

c — жесткость пружин;

B — величина атмосферного давления;

g — ускорение силы тяжести.

Если принять, что изменения атмосферного давления с некоторым приближением могут быть описаны гармоническими колебаниями, то с учетом тривиального для измерительных приборов условия $k \approx n$ и согласно теории колебаний коэффициент изменения амплитуды и угол сдвига фаз будут равны

$$\left. \begin{aligned} \lambda &= \frac{1}{1 + \frac{\omega^2}{k^2}} \\ \phi &= \arctg \frac{2 \frac{\omega}{k}}{1 - \frac{\omega^2}{k^2}} \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

где ω — угловая частота колебаний атмосферного давления.

Динамические погрешности будут малы при условии $k \gg \omega$.

Колебания атмосферного давления имеют сложный характер. На медленные изменения, которые протекают в течение нескольких суток, накладываются кратковременные изменения (микрофлуктуации) атмосферного давления [5]. Последние подразделяются на две основные группы. К первой группе относятся короткопериодные микрофлуктуации, вызванные действием ветра в месте измерений. Микрофлуктуации этой группы представляют собой колебания неправильной квазисинусоидальной формы. В зависимости от силы ветра периоды колебаний меняются от 2—3 до 100—120 сек ($\omega = 0,05 \div 3 \text{ 1/сек}$), амплитуды колеблются от нескольких микрон до нескольких сотых миллиметра ртут-

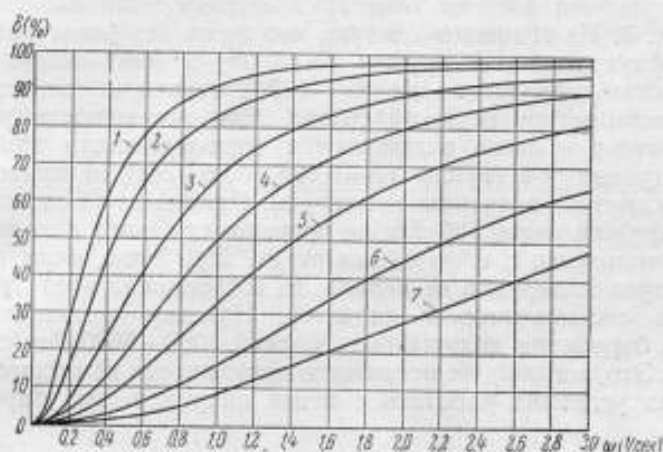


Рис. 3. Относительная погрешность амплитуды при различных частотах.

1 — $c=100$ дин/см; 2 — $c=200$ дин/см; 3 — $c=500$ дин/см; 4 — $c=1000$ дин/см;
5 — $c=2000$ дин/см; 6 — $c=5000$ дин/см; 7 — $c=10\,000$ дин/см.

ного столба. Ко второй группе относятся не связанные с ветром долгопериодные колебания, которые имеют более регулярный характер. Наблюдаются периоды колебаний от 100 сек до 15—20 мин ($\omega = 0,005 \div 0,06 \text{ 1/сек}$), амплитуды доходят до 0,1 мм рт. ст. и более. В большинстве случаев микрофлуктуации обеих групп существуют одновременно. В некоторые промежутки времени (обычно в тихую безветренную погоду) микрофлуктуации с амплитудой колебаний свыше 0,002 \div 0,005 мм рт. ст. вообще отсутствуют.

Таким образом, для того чтобы барометр мог фиксировать все колебания атмосферного давления с амплитудой более нескольких микроп ртутного столба, собственная угловая частота колебаний поршня барометра должна быть порядка 10 \div 20 1/сек.

Из формулы (4) следует, что собственную угловую частоту можно менять, только изменяя жесткость пружин. Однако величина жесткости существенно влияет на точность барометра: чем больше жесткость, тем выше требования к отсчетному устройству, температурному режиму помещения, точности изготовления и юстировке основных узлов барометра. Если влияние упругого последствия и гистерезиса при относительно небольшой продолжительности измерений и правильном выборе диапазона измерений по пружинному механизму не оказывает суще-

ственного влияния на погрешность барометра, то температурное расширение пружины может привести к заметным погрешностям. Так, уже при жесткости пружины 5000 дин/см ($k = 2,24 \text{ 1/сек}$) изменение температуры на $\pm 5^\circ \text{C}$ приводит к погрешности порядка $\pm 0,005 \text{ мм рт. ст.}$ Кроме того, для обеспечения точности отсчета $0,005 \text{ мм рт. ст.}$ потребуется отсчетный микроскоп с 50-кратным увеличением. Поэтому применение пружин с жесткостью свыше $3000 + 4000 \text{ дин/см}$ вряд ли целесообразно, если погрешность барометра должна быть порядка $0,02 + 0,03 \text{ мм рт. ст.}$ Но тогда в соответствии с формулами (5) возникнут погрешности воспроизведения атмосферного давления как по амплитуде, так и по фазе.

Относительная погрешность измерения амплитуды колебаний при жесткости пружины $100 + 10\,000 \text{ дин/см}$ ($k = 0,316 + 3,16 \text{ 1/сек}$) в зависимости от угловой частоты колебаний атмосферного давления приведена на рис. 3. Из графиков следует, что даже без учета угла сдвига фаз микрофлуктуаций 1-й группы ($\omega = 0,05 + 3 \text{ 1/сек}$) могут привести к погрешностям, достигающим до $50 \div 100\%$ величины амплитуды, т. е. до сотых миллиметров ртутного столба. Эти погрешности носят случайный характер и легко исключаются многократными измерениями. Микрофлуктуации 2-й группы ($\omega = 0,005 + 0,06 \text{ 1/сек}$) не приводят к заметному искажению величины амплитуды. Однако из-за сдвига фаз при жесткости пружин менее 500 дин/см погрешности могут достигать до 30% величины амплитуды, т. е. до $0,1 \text{ мм рт. ст.}$ При этом, если продолжительность серии измерений не велика, то погрешности этой группы могут принять систематический характер. Поэтому жесткость пружин поршневого барометра должна быть равной $1000 + 3000 \text{ дин/см}$ ($k = 1 + 1,7 \text{ 1/сек}$). Это, конечно, не исключает возможности при благоприятных атмосферных условиях работать с более инерционными барометрами.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальное исследование метрологических свойств поршневого барометра, погрешность которого не превосходит $0,01 - 0,02 \text{ мм рт. ст.}$, является сложной задачей вследствие отсутствия соответствующих образцовых приборов.

Наиболее точные ртутные барометры не дают возможности производить измерения мгновенной величины колеблющегося атмосферного давления ввиду значительной инерционности.

Приборы, применяемые при исследовании микрофлуктуаций, непригодны для измерения абсолютной величины атмосферного давления. Однако они позволяют исследовать динамические погрешности испытуемого прибора, но и то в определенном диапазоне частот. Поэтому при экспериментальном изучении поршневого барометра были применены оба вида упомянутых приборов. Для оценки динамических погрешностей поршневого барометра его показания сопоставлялись с показаниями пружинного микробарометра Gb5. Этот барометр, обладая малой инерционностью, позволяет фиксировать колебания атмосферного давления при погрешности отсчета около $0,01 \text{ мм рт. ст.}$ Определение постоянной поршневого барометра, т. е. приведенной площади поршня, производили по эталонному ртутному барометру ВНИИМ, высокая точность которого при благоприятных атмосферных условиях позволяет производить измерение атмосферного давления с погрешностью до $0,005 \text{ мм рт. ст.}$ Для исследования стабильности показаний были проведены взаимные сличения двух однотипных поршневых барометров.

Исследование динамических погрешностей

Для исследования динамических погрешностей образцового поршневого барометра был применен метод сличения с пружинным микробарометром Gb5. В качестве чувствительного элемента в микробарометре Gb5 применена полая геликоидальная пружина, свободный конец которой связан с зеркальцем, укрепленным на проволочных растяжках. Поворот зеркальца при изменении атмосферного давления фиксируется автоколлимационным методом. Измерительная система свободна от механического трения, что делает микробарометр достаточно чувствительным к изменениям атмосферного давления. Погрешность отсчета $\sim 0,01 \div 0,02$ мм рт. ст. (в зависимости от скорости изменения атмосферного давления) при цене деления 0,1 мм рт. ст. Ввиду большой жесткости пружины и относительно малой массы микробарометр практически безынерционен.

Показания обоих приборов сопоставлялись в одни и те же моменты времени через определенные интервалы. В табл. 1 приведены резуль-

Таблица 1

№ серии	Дата — ноябрь 1958 г.	Количество измерений в серии	Среднее квадратическое отклонение показаний, мм рт. ст.
1	17	30	0,013
2	18	25	0,012
3	19	30	0,020
4	19	30	0,014
5	20	10	0,014
6	20	10	0,017
7	20	10	0,016
8	21	10	0,008
9	22	10	0,018
10	22	10	0,012
11	24	10	0,008
12	24	10	0,006
13	26	10	0,011
14	27	10	0,014
15	27	10	0,020
16	28	10	0,008
17	28	10	0,007
18	28	10	0,011
19	28	10	0,014
20	28	10	0,012
—	—	—	$S_1 = 0,013$

таты этого сопоставления с интервалом времени между отсчетами, равным 1 мин. Отсчеты производились сериями по 10—30 измерений в период с 17 по 28/XI 1958 г. При определении средних квадратических отклонений в показания микробарометра Gb5 вводилась поправка, равная

разности между средними значениями показаний обоих приборов в данной серии. Определенное таким способом среднее квадратичное отклонение достаточно хорошо характеризует динамические погрешности поршневого барометра (колебания давления с периодом, превышающим 10—15 мин. не оказывают существенного влияния на величину динамической погрешности).

Как видно из табл. 1, среднее квадратичное взаимное отклонение показаний обоих приборов во всех сериях колебалось от 0,006 до 0,02 мм рт. ст. Эти результаты вполне удовлетворительны, если учесть, что по-

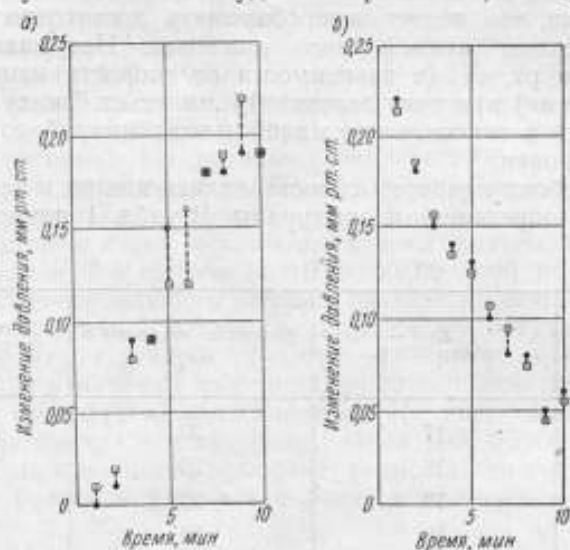


Рис. 4. Результаты сравнений барометра с микробарометром.

грешность отсчета пружинного микробарометра Gb5 составляет $0,01 \div 0,02$ мм рт. ст.

Анализ результатов измерений показал, что величина среднего квадратичного отклонения не зависит от долгопериодных колебаний атмосферного давления и определяется короткопериодными микрофлуктуациями, возникающими при измерениях.

Для иллюстрации этого на рис. 4 изображены две серии измерений. В обеих сериях в среднем скорость изменения атмосферного давления, примерно, одинакова, но для «точек» рис. 4, а среднее квадратичное отклонение составляет 0,02 мм рт. ст., а для «точек» рис. 4, б — 0,007 мм рт. ст. Указанное явление объясняется данными рис. 5, на котором приведены результаты измерения атмосферного давления, когда отсчеты производились через 10 сек. Кривые рис. 5, а соответствуют по времени «точкам» рис. 4, а, кривые рис. 5, б — кривым рис. 4, б. Сравнение кривых показывает, что в первом случае имели место короткопериодные микрофлуктуации с относительно большими амплитудами. Приведенные выше данные получены для поршневого барометра с жесткостью пружин 2000 дин/см ($k = 1,4^1/\text{сек}$). Влияние уменьшения жесткости пружин на инерционность поршневого барометра наглядно показано на рис. 6. В данном случае на барометре были установлены пружины жесткостью 100 дин/см ($k = 0,3^1/\text{сек}$). Как видно из кривых, при этом барометр практически не реагирует на короткопериодные микрофлуктуации атмосферного давления.

Полученные данные полностью подтверждают теоретические предпо-

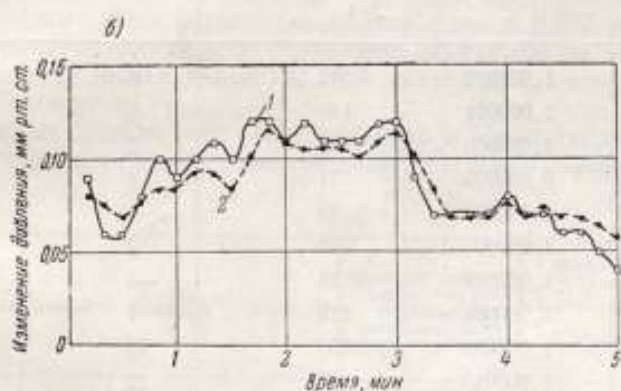
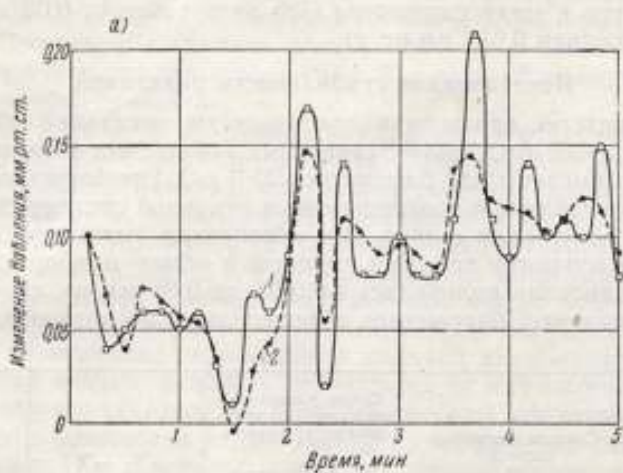


Рис. 5. Результаты сличений барометра с микробарометром.
1 — микробарометр Сб 5; 2 — грузопоршневой барометр.

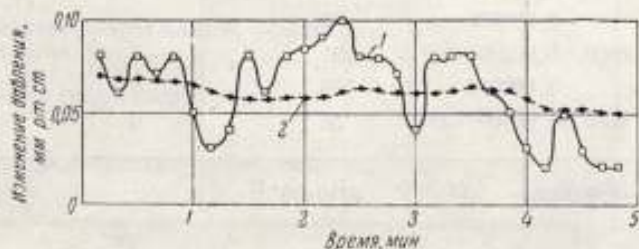


Рис. 6. Результаты сличений барометра с микробарометром.
1 — микробарометр Сб 5; 2 — грузопоршневой барометр.

сылки о погрешностях, связанных с короткопериодными микрофлуктуациями атмосферного давления. Как показал опыт, внутрисерийное среднее квадратичное взаимное отклонение показаний образцового поршневого барометра и микробарометра Gb5 не превышает 0,02 мм рт. ст. и составило в среднем 0,013 мм рт. ст.

Исследование стабильности показаний

Большой интерес для оценки стабильности показаний представляет взаимное сличение показаний однотипных поршневых барометров. Сличения были выполнены для барометров № 1 и 2. Приборы были установлены на одном столике и подсоединены к откачной системе симметрично через общий вакуумный шланг. Это обеспечило равенство остаточных давлений над верхними торцами поршней в обоих приборах. Величина остаточного давления колебалась от 0,03 до 0,08 мм рт. ст. Отношения площадей сличаемых барометров определялись по отношению усилий,

Таблица 2

№ серии	Среднее отношение площадей, \bar{X}_i	Сумма квадратов отклонений от среднего внутри серии, $\sum_{j=1}^5 (\bar{X}_{ij} - \bar{X}_i)^2$	$\bar{X}_i - \bar{X}$	$(\bar{X} - \bar{X})^2$
1	1,000011	339 · 10 ⁻¹²	8 · 10 ⁻⁶	64 · 10 ⁻¹²
2	1,000011	146	8	64
3	1,000006	799	3	9
4	0,999999	181	-4	16
5	0,999999	40	-4	16
6	1,000005	78	2	4
7	1,000000	118	-3	9
8	1,000004	110	1	1
9	1,000018	555	15	225
10	1,000015	46	12	144
11	1,000005	130	2	4
12	0,999994	246	-9	81
13	1,000004	280	1	1
14	1,000000	94	-3	9
15	0,999991	52	-12	144
16	0,999997	292	-6	36
17	1,000003	179	0	0
18	1,000009	34	6	36
$\bar{X} = 1,000003$		3719 · 10 ⁻¹²	—	863 · 10 ⁻¹²
$S_1^2 = 51,6 \cdot 10^{-12};$		$\Theta = \frac{S_2^2}{S_1^2} = 4,91;$		
$S_2^2 = 254 \cdot 10^{-12};$		$S_1 = 7,2 \cdot 10^{-6};$		
$\omega^2 = 40,4 \cdot 10^{-12};$		$\omega = 6,4 \cdot 10^{-6};$		
$D(X) = \omega^2 + S_1^2 = 92 \cdot 10^{-12};$		$S = 9,6 \cdot 10^{-6}.$		

необходимых для их уравновешивания при действующем в момент измерения атмосферном давлении. Стабильность отношения площадей надежно характеризует стабильность показаний сличаемых барометров относительно друг друга. Измерения производились сериями по пять измерений. Промежуток времени между отсчетами составлял 1 мин. Результаты измерений приведены в табл. 2, в которой отношение площадей F_1/F_2 обозначено буквой X .

Как видно из табл. 2, среднее квадратичное отклонение показаний внутри серий колебалось в пределах $0,0003 \div 0,0014\%$ и составило в среднем $0,0007\%$. Генеральное среднее значение отношения площадей равно $1,000003$, а межсерийное среднее квадратичное отклонение $\omega = 0,0006\%$, что указывает на наличие систематических погрешностей в отдельных сериях. Если, как это вытекает из вышеизложенного, величину внутрисерийной средней квадратичной можно объяснить в основном интенсивностью короткопериодных микрофлуктуаций атмосферного давления, то величина межсерийной средней квадратичной обуславливается рядом причин, наиболее вероятными из них являются кратковременные микрофлуктуации, погрешности отсчетов, погрешности определения нулевого положения и др. Однако их влияние на точность измерений невелико. Так, генеральное среднее квадратичное отклонение не превышает $0,001\%$, что соответствует средней квадратичной погрешности в измерении атмосферного давления, равной $0,007$ мм рт. ст. Если принять, что погрешности обоих приборов одинаковы, то каждый из приборов обладает генеральной средней квадратичной погрешностью порядка $0,005$ мм рт. ст.

Полученные данные интересно сравнить с результатами непосредственного сличения эффективных площадей поршней барометров № 1 и 2.

Таблица 3

Наименование параметра	Взаимное сличение барометров (по результатам измерения атмосферного давления)	Метод гидростатического уравновешивания	
		керосин	трансформаторное масло
Количество серий	18	12	13
Генеральное среднее отношение площадей	1,000003	0,999995	0,999999
Доверительная граница, %	0,0005	0,0003	0,0004
Среднее квадратичное отклонение отдельного измерения, %	0,0010	0,0005	0,0007
Внутрисерийное среднее квадратичное отклонение, %	0,0007	0,0004	0,0006
Межсерийное среднее квадратичное отклонение, %	0,0006	0,0003	0,0003

В табл. 3 дана сводка параметров точности, полученных при определении отношения площадей различными способами.

Если принять, что веса приведенных в табл. 3 средних значений обратно пропорциональны квадратам их доверительных границ, то взвешенное среднее отношение площадей будет

$$X = F_1/F_2 = 0,999998.$$

Таким образом была достигнута хорошая сходимость средних значений отношения площадей барометров, определенных различными способами. Следует отметить, что параметры точности, полученные определением отношения площадей при непосредственном сличении, несколько лучше, чем параметры точности, полученные при определении отношения площадей по результатам измерения атмосферного давления. Однако, как видно из табл. 3, последние сопоставимы с погрешностями непосредственного сличения площадей по одному из наиболее точных вариантов метода гидростатического уравновешивания (способ двойного взвешивания с отсчетом положения поршней по микроскопу).

Если учесть, что у обоих поршневых барометров примерно одинакова инерционность, то полученные результаты в первую очередь характеризуют статические погрешности (неточность отсчета, погрешности измерения усилий, стабильность нуля, влияние температуры и пр.).

Результаты сличения поршневого барометра с эталонным ртутным барометром ВНИИМ

Приведенные выше данные достаточно полно характеризуют точность и стабильность показаний поршневого барометра. Однако основная характеристика поршневого барометра — приведенная площадь поршня — может быть определена наиболее точно только в результате его сличения с соответствующим прибором высшего разряда. В этой связи ниже приведены результаты сличения поршневых барометров ВНИИМ с эталонным ртутным барометром ВНИИМ.

Эталонный ртутный барометр ВНИИМ представляет собой разновидность U-образного абсолютного ртутного манометра с ограниченным диапазоном измерений. В верхней и нижней частях корпуса барометра расположены сосуды, площадь поперечного сечения которых в целях сведения к минимуму капиллярной депрессии и получения достаточно ровной поверхности ртути составляет около 50 см². Температура корпуса измеряется при помощи термодпар, расположенных в верхней и нижней частях барометра. Разность уровней в сосудах измеряется интерференционным способом при помощи плоскопараллельной концевой меры, положение которой при совмещении с нижним и верхним уровнями отсчитывается при помощи микроскопа. По данным ВНИИМ средняя квадратичная погрешность измерения давления составляет около 0,005 мм рт. ст.

Методика сличения поршневого барометра с эталонным ртутным барометром ВНИИМ была основана на одновременном измерении обоими приборами величины атмосферного давления.* Постоянная поршневого барометра, приведенная площадь поршня, с необходимой точностью может быть вычислена по формуле

$$F_{20} = \frac{mg - N_0 + C}{H\rho g - p_1 + p_2}, \quad (10)$$

где m — масса поршня и наложенных на него грузов;

N_0 — усилие, действующее на поршень со стороны пружинного механизма при нулевом положении поршня;

* За величину атмосферного давления принималось давление в момент отсчета положения нижнего уровня ртути. Положение верхнего уровня определялось средним значением двух отсчетов, один из них производился до отсчета нижнего уровня, другой — после.

C — суммарная поправка к показаниям поршневого барометра;
 H — высота ртутного столба;
 ρ — плотность ртути;
 p_1 — величина абсолютного давления над верхним торцом поршня;
 p_2 — величина абсолютного давления над верхним уровнем ртути.

Величина суммарной поправки C зависит от положения поршня в момент измерения, температуры поршневого барометра, потери веса поршня и грузов в воздухе, высоты столба воздуха между нижним уровнем ртути и верхним торцом поршня.

Сличение поршневого барометра с эталонным барометром ВНИИМ производилось в лаборатории давления ВНИИМ в период с 4 по 30/VI 1959 г. Результаты измерений приведены в табл. 4 и 5. Каждая серия состоит из пяти измерений, следующих друг за другом с интервалом 2—3 мин. В табл. 4 приведены результаты определения эффективной площади барометра № 1, в табл. 5 — результаты определения эффективной площади барометра № 2. Во время экспериментов температура поршневого барометра колебалась от 19,15 до 21,05° С, температура эталонного барометра — от 18,75 до 20,99° С. При проведении одной серии измерений температура поршневого барометра изменялась на 0,04 ÷ 0,3 град, температура эталонного барометра — на 0 ÷ 0,11 град. Продолжительность каждой серии составляла 10 + 15 мин.

Таблица 4

№ серии	Среднее значение эффективной площади, \bar{F}_i , см ²	Сумма квадратов отклонений от среднего внутри серии, $\sum_{j=1}^5 (F_{ij} - \bar{F}_i)^2$, см ⁴	$\bar{F}_i - \bar{F}$, см ²	$(\bar{F}_i - \bar{F})^2$, см ⁴
1	1,000801	431 · 10 ⁻¹²	14 · 10 ⁻⁶	196 · 10 ⁻¹²
2	1,000768	514	-19	361
3	1,000799	502	12	144
4	1,000785	434	2	4
5	1,000794	682	7	49
6	1,000792	220	5	25
7	1,000769	845	-18	324
8	1,000781	299	-6	36
9	1,000798	807	11	121
10	1,000782	67	-5	25
11	1,000789	443	2	4
12	1,000809	507	22	484
13	1,000783	672	-4	16
14	1,000783	170	-4	16
15	1,000778	510	-9	81
$\bar{F} = 1,000787$		7103 · 10 ⁻¹²	—	1886 · 10 ⁻¹²
$S_1^2 = 118,4 \cdot 10^{-12};$		$\theta = S_2^2 / S_1^2 = 5,7;$		
$S_2^2 = 672 \cdot 10^{-12};$		$S_1 = 10,9 \cdot 10^{-6};$		
$\omega^2 = 111 \cdot 10^{-12};$		$\omega = 10,6 \cdot 10^{-6};$		
$D(F) = \omega^2 + S_1^2 = 229 \cdot 10^{-12};$		$S = 15,1 \cdot 10^{-6}.$		

Таблица 5

№ серии	Среднее значение эффективной площади, \bar{F}_i , см ²	Сумма квадратов отклонений от среднего внутри серии, $\sum_{j=1}^5 (F_{ij} - \bar{F}_i)^2$, см ⁴	$\bar{F}_i - \bar{F}$, см ²	$(\bar{F}_i - \bar{F})^2$, см ⁴
1	1,000758	534 · 10 ⁻¹²	-40 · 10 ⁻⁶	1600 · 10 ⁻¹²
2	1,000800	222	2	4
3	1,000797	606	-1	1
4	1,000771	469	27	731
5	1,000796	210	-2	4
6	1,000772	235	-25	676
7	1,000780	1416	-18	324
8	1,000828	324	30	900
9	1,000801	378	3	9
10	1,000806	305	8	64
11	1,000818	2437	20	400
12	1,000807	1908	9	81
13	1,000806	334	8	64
14	1,000796	218	-2	4
15	1,000806	215	8	64
16	1,000814	378	16	256
17	1,000804	850	6	36
$\bar{F} = 1,000798$		11 059 · 10 ⁻¹²	—	5218 · 10 ⁻¹²
$S_1^2 = 162 \cdot 10^{-12};$		$\theta = S_2^2 / S_1^2 = 10,0;$		
$S_2^2 = 1630 \cdot 10^{-12};$		$S_1 = 12,7 \cdot 10^{-6};$		
$\omega^2 = 295 \cdot 10^{-12};$		$\omega = 17,2 \cdot 10^{-6};$		
$D(F) = \omega^2 + S_1^2 = 457 \cdot 10^{-12};$		$S = 21,4 \cdot 10^{-6}.$		

Средние квадратичные отклонения показаний внутри отдельных серий колебались от $4,1 \cdot 10^{-6}$ до $14,5 \cdot 10^{-6}$ для барометра № 1 и от $7,2 \cdot 10^{-6}$ до $24,6 \cdot 10^{-6}$ для барометра № 2.

В среднем величина средних квадратичных отклонений внутри серий для барометра № 1 составляет $10,9 \cdot 10^{-6}$, для барометра № 2 — $12,7 \cdot 10^{-6}$. Величины межсерийных средних квадратичных отклонений составляют соответственно $10,6 \cdot 10^{-6}$ и $17,2 \cdot 10^{-6}$. Приведенные цифры свидетельствуют о наличии систематических погрешностей, величина которых сопоставима с величинами случайных погрешностей и изменяется от серии к серии. Последнее обстоятельство при большом числе серий позволяет рассматривать эти погрешности как случайные. Тогда генеральное среднее квадратичное отклонение отдельного измерения для барометра № 1 составляет $15,1 \cdot 10^{-6}$, для барометра № 2 — $21,4 \cdot 10^{-6}$. Если даже принять, что отклонения показаний вызываются только погрешностями поршневого барометра, то средняя квадратичная погрешность измерения атмосферного давления составит $0,01 \div 0,02$ мм рт. ст.

Точность определения приведенных площадей барометров № 1 и 2

характеризуется следующими цифрами: предельная погрешность определения приведенной площади барометра № 1 с вероятностью 0,99 составляет $9,1 \cdot 10^{-6}$, барометра № 2 — $13,1 \cdot 10^{-6}$, что примерно соответствует 0,001%. Таким образом, точность определения приведенной площади барометра № 2 несколько ниже, чем барометра № 1. Следует заметить, что температурные условия при измерениях с барометром № 2 были хуже, чем при измерениях с барометром № 1. Сравнение результатов сличений взаимных и со ртутными барометрами показывает, что при последних отклонения показаний вдвое больше. Это обстоятельство может быть объяснено тем, что инерционность ртутного барометра отличается от инерционности поршневого барометра, а также относительной сложностью условий сличения ртутного и поршневого барометров.

Заключение

Созданный грузопоршневой барометр, как показало экспериментальное исследование, характеризуется следующими данными:

1) средняя квадратичная погрешность ряда измерений, вызываемая короткопериодными микрофлуктуациями атмосферного давления, в среднем равна 0,01 мм рт. ст.;

2) длиннопериодные микрофлуктуации атмосферного давления не влияют на показания барометра;

3) суммарная средняя квадратичная погрешность измерения прибором не превышает $0,01 \pm 0,02$ мм рт. ст.

Приведенные данные позволяют применять этот прибор в качестве образцового барометра 1-го разряда.

ЛИТЕРАТУРА

1. ASMF Paver Test Codes, Part 2, Chapters 1 a. 6.
2. Graf A., Barometrische Höhenmesser II, ATM, 224, 1954, S. 197—200.
3. Индик П. В., Грузопоршневой барометр, «Измерительная техника», № 2, 1959, стр. 22—23.
4. Хаисуваров К. И., Образцовый грузопружинный поршневой барометр, «Измерительная техника», № 2, 1959, стр. 24—28.
5. Пасечник И. П., Федосеев Н. Е., Электродинамический микробарограф с гальванометрической регистрацией, Известия АН СССР, серия геофизическая, № 1, 1958, стр. 121—130.

Поступила в редакцию
5/IV 1960 г.

А. А. ЧАСОВНИКОВ
ВНИИМ

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗЦОВОГО МИКРОМАНОМЕТРА I-го РАЗРЯДА ТИПА МКМ-3

В статье рассматривается принцип действия и устройство образцового микроманометра I-го разряда типа МКМ-3 и сообщаются результаты его подробного исследования.

Конструкция микроманометра типа МКМ-1 разработана КБ при ВНИИМ им. Д. И. Менделеева на основе действующего макета, созданного в аэрогидрометрической лаборатории ВНИИМ [1]. Конструкция прибора дважды подвергалась изменениям. Третьему варианту прибора присвоен шифр МКМ-3.

Прибор предназначен служить в качестве образцового микроманометра при поверке микроманометров типов ММ, АДД, «Прайдтля», ЧЛ-1 и др. Микроманометр типа МКМ-1 экспонировался на промышленной выставке в Москве.

Пределы измеряемых прибором разностей давлений $10 \div 400$ кгс/м (мм вод. ст.). Погрешность прибора δ , соответствующая измеряемой разности давлений Δp , приближенно выражается формулой

$$\delta \approx \pm (0,008 + 0,8 \cdot 10^{-4} \Delta p),$$

где δ и Δp выражены в кгс/м².

Принцип действия прибора

В основу прибора положен принцип сообщающихся сосудов. Прибор имеет два сосуда: один неподвижен, а другой может перемещаться вдоль вертикальных направляющих. Сосуды соединены между собой резиновой трубкой. Сущность работы прибора заключается в следующем. В начальном положении, когда давления в неподвижном и подвижном сосудах равны, жидкость, заполняющая их, устанавливается на одном уровне, который точно фиксируется с помощью особого приспособления. Когда к прибору подводится разность давлений, причем к неподвижному сосуду подается большее давление, то уровень жидкости в неподвижном сосуде понижается, а в подвижном сосуде повышается, тогда поднятием подвижного сосуда приводят уровень жидкости в неподвижном сосуде в первоначальное, точно контролируемое положение. В этом случае столб жидкости, равный разности высот уровней жидкости в обоих

сосудах и уравнивающий приложенную разность давлений, является мерой этой разности давлений. Вследствие того, что приложенная разность давлений уравнивается (компенсируется) столбом жидкости так, что уровень жидкости в неподвижном сосуде сохраняется постоянным, микроанометр относится к числу приборов компенсационного типа.

Разность высот уровней жидкости в сосудах может быть измерена тем или другим способом, или может устанавливаться заранее определенная ее величина.

Микроанометры типа МКМ точно воспроизводят определенные, задаваемые концевыми мерами длины, разности давлений, а поэтому они и предназначаются главным образом служить в качестве образцовых приборов при поверке других образцовых микроанометров, точность которых на разряд ниже.

Приборами типа МКМ-2 и МКМ-3 оснащены все институты системы Комитета стандартов, мер и измерительных приборов и многие государственные контрольные лаборатории. Эти приборы являются основными образцовыми приборами в диапазоне измеряемых разностей давлений от 10 до 400 кг/м².

Описание конструкции прибора

Микроанометр типа МКМ-3, схема и общий вид которого представлены на рис. 1 и 2, устроен следующим образом: неподвижный сосуд 33 и подвижный сосуд 15 соединены резиновой трубкой 29. Неподвижный сосуд 33, имеющий штуцер для резиновой трубки, сливной краник 35 и вертикальную трубку 27, укреплен в держателе 37, несущем и микроскоп 31. Держатель 37 жестко соединен с регулировочным механизмом 32. Вертикальная трубка 27 крепится в верхней части к направляющей 30 с помощью кронштейна 26. На кронштейне 26 укреплен тройник 25. Тройник 25 соединен резиновой трубкой с вертикальной трубкой 27 (в серийных приборах трубка 27 оканчивается жестко соединенным с ней тройником). Второй штуцер тройника резиновой трубкой соединяется с поверяемым прибором, а третий штуцер — с источником давления.

Подвижной сосуд 15 снабжен верхним штуцером для подключения меньшего давления, нижним штуцером для трубки 29, индикатором 17 и смонтирован на траверсе 14 так, что ножка индикатора проходит через отверстие в траверсе. Индикатор 17 служит для обеспечения одного и того же давления сосуда на меру или базу.

Для предохранения индикатора от поломки при чрезмерном нажатии ножки на меру или базу на траверсе 14 снизу укреплен резиновый предохранитель, через отверстие в котором проходит ножка индикатора. Когда давление сосуда на меру или базу будет вызывать понижение меры или базы и примет на себя давление и тем самым предохранит индикатор от поломки. Предохранитель на схеме не показан и в опытном образце отсутствует. Траверса 14, жестко связанная со втулками 13 и 28, может перемещаться по вертикали вдоль направляющих 8 и 30. Направляющая 8 пустотелая, внутри ее проходит валик 20, передающий движение от ручного привода или мотора к винту 23.

Механизм перемещения сосуда 15 состоит из следующих частей: подъемного устройства, кинематическая схема которого ясна из рис. 3, траверсы 18, жестко связанной с втулками 13 и 28, ходового винта 23

с микрометрическим винтом тонкой наводки 24, соединенного с траверсой 18 и проходящего через втулку верхней траверсы 19 и гайку-шестерню 21.

При подъеме и опускании сосуда 15 вручную зубчатая муфта 42 (рис. 3) находится в состоянии зацепления, выключатель 39 (рис. 1) стоит в положении «выключено», а переключатель 40 — в положении «вверх». Вращение маховика 2 по часовой стрелке вызывает движение сосуда 15 вверх, против часовой стрелки — вниз. Направляющие 8 и 30 жестко заделаны в литое основание 1, на котором смонтированы колонка регулирующего механизма 32 и базовая площадка 6. На площадку 6

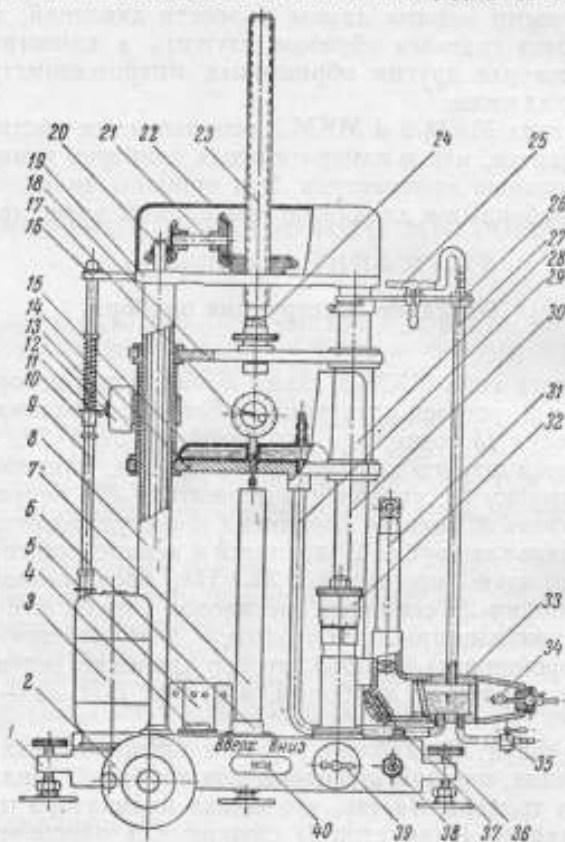


Рис. 1.

устанавливают концевые меры 7. Основание прибора 1 снабжено тремя установочными винтами 36 и двумя уровнями 4.

Перед началом работы прибор включается в трехфазную сеть напряжением 220 в.

Электропривод включается следующим образом. Необходимо оттянуть головку 41 переключающей муфты 42, расположенной в центре маховика 2, повернуть ее на 30—40° и разъединить зубчатую муфту 42. Этим маховик 2 выводится из зацепления. Переключатель 40 поставить в положение «вверх». Достаточно теперь выключатель 39 поставить в положение «включено», чтобы электродвигатель 3 привел в движение подъемное устройство, которое через гайку-шестерню 21 и винт 23 будет поднимать сосуд 15. Подъем будет продолжаться до тех пор, пока рычажок переключателя 12, установленного на втулке 13, не коснется втулки 10

ограничителя хода, смонтированной на стержне 9, и не выключит электродвигатель. Стержень 9 нижним концом заделан в основание прибора, верхний конец его укреплен в кронштейне 16. Пружина 11 предназначена для плавного переключения рычажка переключателя из одного положения в другое. Элементы подъемного устройства, расположенные на

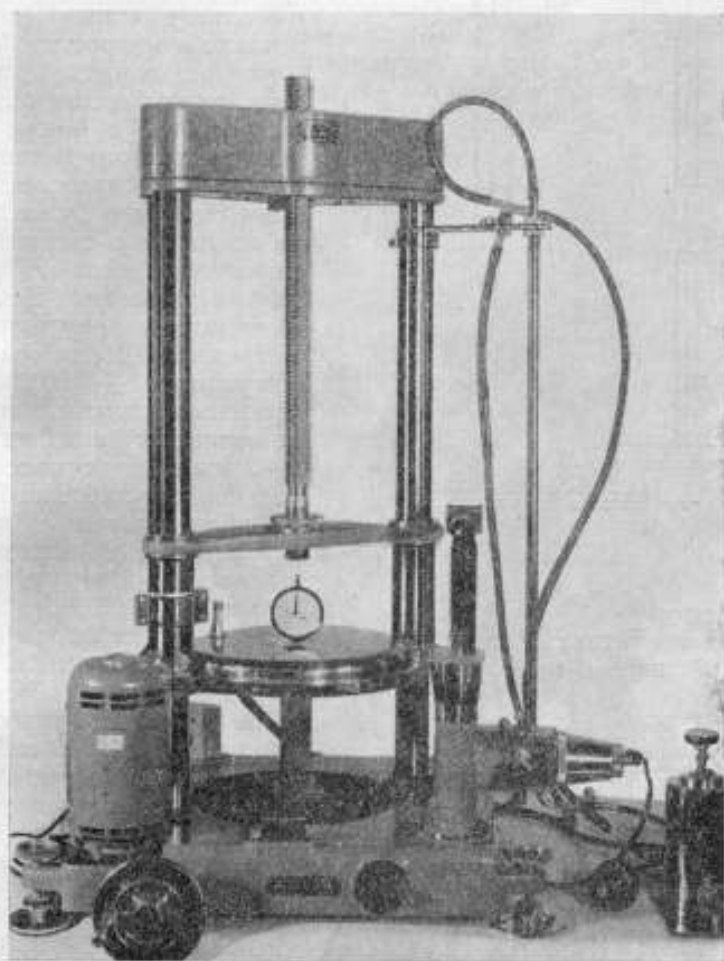


Рис. 2.

верхней траверсе 19, закрыты кожухом 22, через отверстие в котором проходит винт 23.

При переводе переключателя 40 в положение «вниз» электродвигатель приведет в движение подъемное устройство и сосуд 15 будет опускаться. Опускание будет происходить до тех пор, пока рычажок переключателя 12 не коснется втулки нижнего ограничителя хода и не выключит электродвигатель (здесь важно выключатель 39 поставить в положение «выключено», а переключатель 40 в положение «вверх»; когда нужно сосуд 15 опустить из верхнего положения в нижнее сначала убирают меры, а потом переводят переключатель 40 в положение «вниз» — это необходимо во избежание поломок прибора).

Устройство для контроля уровня жидкости состоит из установленной в сосуде 33 металлической нити ($d = 0,010 \pm 0,012$ мм), укрепленной в вилке пробки сосуда, и оптической системы.

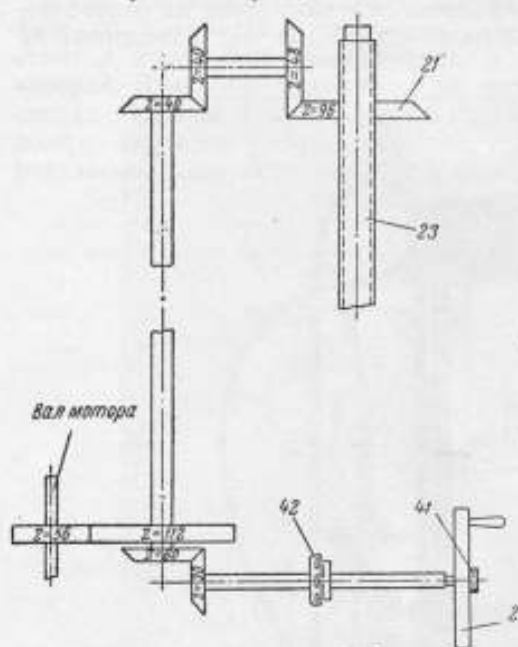


Рис. 3.

Выключатель 38 осветителя 34 смонтирован на основании прибора 1. Схема оптической системы прибора приведена на рис. 4. Увеличение окуляра микроскопа — $10\times$, объектива — $3,5\times$. В прибор заливается 200 ± 250 см³ дистиллированной воды.

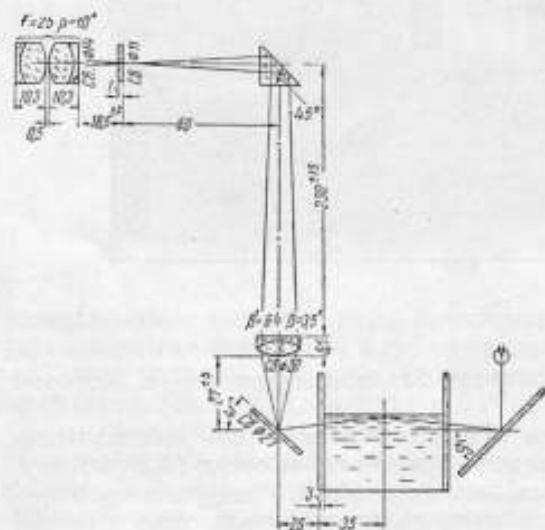


Рис. 4.

Электрическая схема микроанометра типа МКМ-3 представлена на рис. 5, где 1 — асинхронный электродвигатель типа АОЛО 12-4, 1390 об/мин, 200 в, 80 вт; 2 — выключатель пакетный типа ПК-3; 3 — тумблер типа ТП1-2; 4 — тумблер типа ТП1-2 (подвижный); 5 — трансформатор с железным сердечником 220/6,3 в; 6 — тумблер типа ТП1-2; 7 — сигнальная лампа 6,3 в.

Модель микроанометра типа МКМ-2 отличается от модели МКМ-3 отсутствием электропривода подвижного

сосуда, трансформатора для подсветки, тройника, более примитивным устройством подсветки и несколько менее удобной компоновкой некоторых элементов прибора. Модель микроанометра типа МКМ-1 отли-

чается от модели МКМ-2 в основном более примитивной и менее удобной кинематикой подъема подвижного сосуда.

Скорость подъема подвижного сосуда в микроманометре типа МКМ-3 с помощью электропривода больше соответствующей скорости ручного привода в приборе типа МКМ-2 в $7 \div 8$ раз, процесс поднятия или опускания сосуда занимает $12 \div 14$ сек вместо $90 \div 100$ сек. Подъем или опускание подвижного сосуда с помощью ручного привода в приборе типа МКМ-3 осуществляется медленнее в $1\frac{1}{2}$ раза, чем в приборе типа МКМ-2, и при этом приходится прилагать значительно большее усилие.

Однако все три модели имеют одно и то же устройство, измеряющее высоту столба жидкости: базу на основании прибора, на которую ставятся концевые меры, сами меры, индикатор, обеспечивающий одно и то же нажатие сосуда на меры, и приспособление для контроля уровня жидкости в неподвижном сосуде.

Исследование прибора

Теоретическое исследование погрешности микроманометра с концевыми мерами длины произведено Л. П. Степановым [1].

Дополнительно рассмотрен только один источник возможной погрешности — погрешность за счет использования индикатора, служащего для обеспечения одного и того же контролируемого давления сосуда на базу или меры.

В макете индикатор отсутствует. В связи с этим было высказано предположение [2] о неучтенной погрешности за счет некоторой непараллельности полированных поверхностей пластин, между которыми устанавливаются меры. Применение индикатора позволяет учитывать эту погрешность. В работе [2] указана также неучтенная погрешность за счет испарения воды, так как подвижный сосуд имеет сравнительно большую площадь сечения. Однако, как показал опыт, погрешность за счет испарения воды пренебрежимо мала. Уровень жидкости в приборе возвращается в первоначальное положение с погрешностью, не превышающей погрешности установки уровня, которая учитывается дважды.

Сущность теоретическо-расчетного метода определения погрешности показаний исследуемого прибора сводится к определению общей погрешности на основании исследования его частных погрешностей. Рассмотрены и учтены следующие источники и величины погрешностей:

1) погрешность установки уровня жидкости в неподвижном сосуде ($\sim 0,005 \times 2$ кгс/м²);

2) погрешность за счет неперпендикулярности направляющих подвижного сосуда ($\sim 0,001$ кгс/м²);

3) погрешность за счет изменения положения прибора во время работы ($\sim 0,001$ кгс/м²);

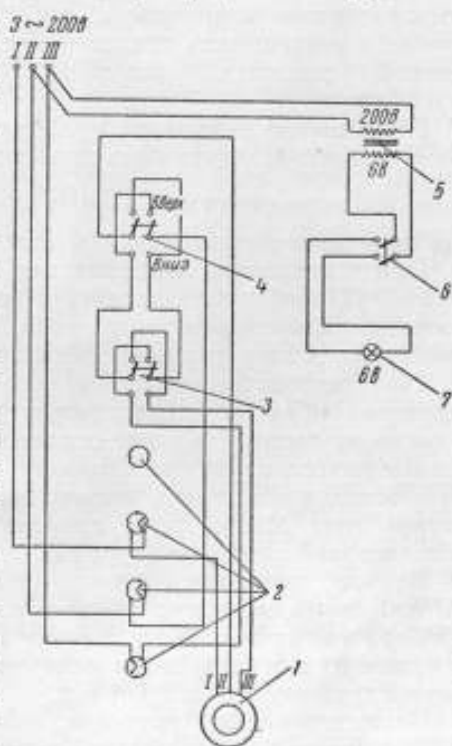


Рис. 5.

4) погрешность за счет деформации резиновой трубки ($\sim 0,002 \text{ кгс/м}^2$);

5) погрешность концевой меры длины за счет изготовления и температуры (при $20 \pm 0,2^\circ \text{C} \sim 0,0025 \text{ кгс/м}^2$);

6) погрешность за счет изменения температуры жидкости в сосуде (при $t = 20 \pm 0,2^\circ \text{C} \sim 0,02 \text{ кгс/м}^2$);

7) погрешность за счет вариации показаний индикатора ($\sim 0,003 \text{ кгс/м}^2$).

Суммарная погрешность на верхнем пределе измерений составляет величину порядка $\pm 0,04 \text{ кгс/м}^2$ (при температуре прибора $t = 20 \pm 0,2^\circ \text{C}$.) На нижнем пределе измерений, вследствие того, что температурная погрешность, погрешность от деформации резиновой трубки и погрешность концевой меры примерно пропорциональны измеряемой разности давлений, погрешность прибора составит $\pm 0,01 \text{ кгс/м}^2$.

Погрешность показаний прибора, соответствующая измеряемой разности давлений, может быть приближенно выражена формулой

$$\delta_{\text{МКМ}} = \pm (8 \cdot 10^{-3} + 0,8 \cdot 10^{-4} \Delta p) \text{ кгс/м}^2,$$

где Δp — измеряемая разность давления, кгс/м^2 .

При температуре концевых мер и жидкости в приборе, отличной от $20 \pm 0,2^\circ \text{C}$, необходимо вводить в показания прибора соответствующие поправки. В микроманометре типа МКМ-3 предусмотрена возможность измерения температуры в подвижном и в неподвижном сосудах.

Теоретикорасчетное определение общей погрешности прибора определенным образом характеризует метрологические качества прибора. Однако экспериментальные исследования прибора полнее выявляют основные качества прибора. Поэтому, по мере появления тех или иных возможностей, проводились экспериментальные исследования микроманометров типа МКМ. Ниже приводятся результаты экспериментальных исследований приборов этого типа.

Первое экспериментальное исследование микроманометров типа МКМ-1 было проведено, когда в распоряжении автора появилось два прибора этого типа: № 1 и 3. Были произведены их взаимные сличения и сличение их с действующим макетом, который для краткости будем именовать прибором типа МКМ-исх.

Отъюстированные приборы, заполненные дистиллированной водой, выдерживались при комнатной температуре (около 20°C) в течение многих часов. Затем были произведены взаимные сличения показаний парно приборов № 1, № 3 и МКМ-исх. в точках: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 150, 200, 250, 300, 250 и 400 мм. Кроме того, тщательно контролировались нулевые положения уровней жидкости в приборах, а также возвращение в исходное положение уровней после сличений. Было произведено несколько серий сличений. Результат сличений таков: во всех точках разность показаний приборов не превышала $\pm 0,02 \text{ кгс/м}^2$. Согласованность показаний приборов, как видно из этих данных, весьма высокая. Исследуемые приборы однотипны, поэтому малые расхождения в показаниях кажутся закономерными. Они больше характеризуют внутренние свойства приборов, качество изготовления деталей, качество сборки и пр. В меньшей степени они говорят о достоверности значений измеряемой разности давлений.

Было произведено также сличение показаний микроманометров типа МКМ-исх. и МКМ-1 № 1 с образцовыми весовыми микроманометрами лаборатории. Лаборатория располагает двумя весовыми микроманометрами:

а) весовой микроанометр № 1 [3] имеет пределы измерений от 0 до 10 кгс/м², погрешность его показаний определяется формулой

$$\delta_{\text{№ 1}} \leq \pm (6 \cdot 10^{-4} + 7 \cdot 10^{-4} \Delta p) \text{ кгс/м}^2;$$

б) весовой микроанометр № 2 [4] имеет пределы измерений от 10 до 100 кгс/м² с погрешностью показаний, определяемой формулой

$$\delta_{\text{№ 2}} \leq \pm (6 \cdot 10^{-4} + 1,5 \cdot 10^{-4} \Delta p) \text{ кгс/м}^2.$$

Формула, приближенно описывающая погрешность показаний исследуемых приборов, приведена на стр. 96. Результаты I—III серий сличений представлены в табл. 1 и 2. Из данных этих таблиц видна хорошая сходимость показаний исследуемых приборов с весовыми микроанометрами. Ни одна из разностей показаний исследуемых приборов и весовых микроанометров не вышла за пределы допускаемых погрешностей показаний обоих приборов. Кроме того, заслуживает быть особо отмеченным то обстоятельство, что хорошая сходимость показаний приборов типа МКМ и весового № 1 имеет место и при малых разностях давлений (1÷10 кгс/м²). Обычно микроанометры типа МКМ используются для проверки приборов на разностях давлений 10÷400 кгс/м². Результаты проведенных исследований дают основание для уверенного использования этих приборов при проверке приборов, измеряющих разности давлений 1÷10 кгс/м². Хорошая сходимость показаний микроанометров типа МКМ и весовых характеризует уже насколько достоверно приборы измеряют разность давления, поскольку приборы разнотипные и работают на различных принципах.

Позднее, когда микроанометр типа МКМ-3 был изготовлен серией в 15 приборов, вся серия приборов подверглась сличениям с микроанометрами типа МКМ-2 и МКМ-исх. Результаты сличений приведены в табл. 3. Данные табл. 3 показывают, что средняя квадратичная погрешность S_1 одного прибора не превышает 0,02 кгс/м². Предельная погрешность, считая ее равной 3 S_1 , — максимальная, она не превышает 0,045 кгс/м². Относительная предельная погрешность на верхнем пределе в 400 кгс/м² составит 0,01%.

Создание и исследование грузопоршневого микроанометра типа МНП-1 с пределами измерений 400÷4000 кгс/м² и погрешностью 0,02% [6] позволило провести дополнительные исследования микроанометров типа МКМ-3 в его верхней части. Каждый из серии в 15 штук микроанометров типа МНП-2 в точке «400» был сличен с показаниями микроанометра типа МКМ-2 № 1 или МКМ-исх. Разность показаний сличенных приборов не выходила за пределы 0,022%. Такую сходимость показаний приборов нужно признать весьма удовлетворительной. Так, если считать погрешность микроанометра типа МКМ-3 равной 0,01%, а прибора МНП-2 равной 0,02%, то максимальная погрешность при сравнении показаний этих приборов не должна превосходить

$$\sigma = \sqrt{0,01^2 + 0,02^2} = 0,022\%$$

что и имело место. Это тем более примечательно, что грузопоршневые микроанометры работали в предельной нижней точке, что нельзя считать нормальным для приборов такого типа.

Кроме того, было произведено определение величины приведенной площади пяти поршневых пар микроанометров типа МНП-2 за № 1, 2, 6 и 8, причем определение площади пары № 2 производилось дважды — с помощью микроанометров типа МКМ-2 № 1 и МКМ-3 № 1.

Таблица 1

Номинальные значения микроанометра МКМ-исх.	Разности показаний весового и исходного микроанометров, кгс/м ²			Погрешности микроанометров, кгс/м ²		
	I	II	III	$\delta_{МКМ}$	$\delta_{в}$	$\sqrt{\delta_{МКМ}^2 + \delta_{в}^2}$
Весовой микроанометр № 1						
1,00	+0,004	-0,004	+0,001	$\pm 0,007$	$\pm 0,001$	$\pm 0,007$
2,00	+0,005	+0,003	+0,002	$\pm 0,007$	$\pm 0,002$	$\pm 0,007$
3,00	+0,005	+0,005	+0,005	$\pm 0,007$	$\pm 0,003$	$\pm 0,008$
5,00	+0,003	+0,004	+0,006	$\pm 0,007$	$\pm 0,004$	$\pm 0,008$
7,00	+0,008	+0,007	+0,006	$\pm 0,008$	$\pm 0,006$	$\pm 0,011$
10,00	0,000	+0,004	-0,001	$\pm 0,008$	$\pm 0,008$	$\pm 0,011$
Весовой микроанометр № 2						
10,00	-0,003	+0,001	-0,001	$\pm 0,008$	$\pm 0,008$	$\pm 0,011$
20,00	+0,003	+0,005	+0,002	$\pm 0,009$	$\pm 0,009$	$\pm 0,013$
30,00	+0,006	+0,009	-0,001	$\pm 0,009$	$\pm 0,010$	$\pm 0,014$
40,00	-0,009	-0,001	-0,005	$\pm 0,010$	$\pm 0,012$	$\pm 0,016$
50,00	+0,001	+0,013	-0,001	$\pm 0,011$	$\pm 0,014$	$\pm 0,018$
60,00	-0,007	+0,005	-0,002	$\pm 0,012$	$\pm 0,015$	$\pm 0,019$
70,00	+0,003	+0,009	-0,001	$\pm 0,013$	$\pm 0,016$	$\pm 0,021$
80,00	+0,001	+0,009	-0,007	$\pm 0,014$	$\pm 0,018$	$\pm 0,022$
90,00	0,000	+0,008	-0,005	$\pm 0,014$	$\pm 0,020$	$\pm 0,024$
100,00	-0,008	+0,006	-0,007	$\pm 0,015$	$\pm 0,021$	$\pm 0,026$

Таблица 2

Номинальные значения микроанометра МКМ-1	Разности показаний МКМ-1 и весовых микроанометров, кгс/м ²			Погрешности микроанометров, кгс/м ²		
	I	II	III	$\delta_{МКМ}$	$\delta_{в}$	$\sqrt{\delta_{МКМ}^2 + \delta_{в}^2}$
Весовой микроанометр № 1						
1,00	+0,001	+0,004	+0,004	$\pm 0,008$	$\pm 0,001$	$\pm 0,008$
2,00	+0,002	+0,002	+0,002	$\pm 0,008$	$\pm 0,002$	$\pm 0,008$
3,00	+0,003	+0,003	+0,003	$\pm 0,008$	$\pm 0,003$	$\pm 0,009$
5,00	+0,008	+0,008	+0,008	$\pm 0,008$	$\pm 0,004$	$\pm 0,009$
7,00	+0,011	-0,002	+0,005	$\pm 0,009$	$\pm 0,006$	$\pm 0,011$
10,00	+0,006	+0,004	+0,011	$\pm 0,009$	$\pm 0,008$	$\pm 0,012$
Весовой микроанометр № 2						
10,00	+0,011	+0,012	+0,002	$\pm 0,009$	$\pm 0,008$	$\pm 0,012$
20,00	+0,007	+0,009	+0,001	$\pm 0,010$	$\pm 0,009$	$\pm 0,013$
30,00	+0,003	+0,006	+0,003	$\pm 0,010$	$\pm 0,010$	$\pm 0,014$
40,00	0,000	-0,005	-0,005	$\pm 0,011$	$\pm 0,012$	$\pm 0,016$
50,00	-0,003	+0,001	-0,003	$\pm 0,012$	$\pm 0,014$	$\pm 0,018$
60,00	-0,005	-0,001	-0,005	$\pm 0,013$	$\pm 0,015$	$\pm 0,020$
70,00	-0,007	+0,012	+0,001	$\pm 0,014$	$\pm 0,016$	$\pm 0,021$
80,00	+0,005	+0,010	-0,001	$\pm 0,014$	$\pm 0,018$	$\pm 0,023$
90,00	+0,004	+0,009	+0,002	$\pm 0,015$	$\pm 0,020$	$\pm 0,025$
100,00	+0,003	+0,007	-0,005	$\pm 0,016$	$\pm 0,021$	$\pm 0,026$

Таблица 3

Номинальное показание, мм	Число исследованных приборов	Число серий	Средняя квадратичная погрешность двух приборов, S_2	Средняя квадратичная погрешность одного прибора, S_1	Предельная погрешность, $3S_1$
Образцовый прибор МКМ-2 № 1					
10	13	39	$8 \cdot 10^{-3}$	$5,7 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-2}$
50	13	39	$8 \cdot 10^{-3}$	$5,7 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-2}$
100	13	39	$9 \cdot 10^{-3}$	$6,4 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$
150	13	39	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$0,9 \cdot 10^{-2}$	$2,7 \cdot 10^{-2}$
200	13	39	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$0,8 \cdot 10^{-2}$	$2,4 \cdot 10^{-2}$
250	13	39	$1,55 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$3,3 \cdot 10^{-2}$
300	13	39	$1,82 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$3,9 \cdot 10^{-2}$
350	13	39	$2,05 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$4,2 \cdot 10^{-2}$
400	13	39	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$4,2 \cdot 10^{-2}$
Образцовый прибор МКМ-н.с.х.					
10	6	15	$3,4 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$7,2 \cdot 10^{-3}$
50	6	15	$6,6 \cdot 10^{-3}$	$4,7 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$
100	6	15	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$7,8 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-2}$
150	6	15	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$3,0 \cdot 10^{-2}$
200	6	15	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$0,7 \cdot 10^{-2}$	$2,1 \cdot 10^{-2}$
250	6	15	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$4,2 \cdot 10^{-2}$
300	6	15	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$3,9 \cdot 10^{-2}$
350	6	15	$2,1 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$4,5 \cdot 10^{-2}$
400	6	15	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$4,2 \cdot 10^{-2}$
Примечания: 1. Средняя квадратичная погрешность одного прибора вычисляется по формуле					
$S_1 = \frac{S_2}{\sqrt{2}}$					
2. Погрешности выражены в мкг/мм ² .					

Полученные значения приведенных площадей были сравнены с такими, полученными с помощью рабочего эталона давления. Результаты испытаний приведены в табл. 4.

Данные табл. 4 показывают, что значения приведенных площадей, определенных с помощью микроанометров типа МКМ, хорошо совпадают со значениями, определенными с помощью рабочего эталона давления. Правда, погрешности приведенной площади, определенной с помощью приборов типа МКМ в $3\frac{1}{2}$ —4 раза, превышают погрешности определения площадей с помощью рабочего эталона давления. Это

Таблица 4

Тип и номер прибора	Значения приведенных площадей		Разность показаний, кгс/м ²		Разность показаний, %		Примечания
	по рабочему эталону	по прибору МКМ*	средняя	максимальная	средняя	максимальная	
МНП-2 № 8	5,0057±0,0005	5,0057±0,0012	0,025	0,080	0,006	0,020	По МКМ-2 № 1
МНП-2 № 6	5,0085±0,0005	5,0085±0,0018	0,030	0,080	0,008	0,020	То же
МНП-2 № 2	5,0066±0,0005	5,0066±0,0014	0,030	0,085	0,008	0,021	.
МНП-2 № 2	5,0066±0,0005	5,0066±0,0015	0,025	0,090	0,006	0,022	По МКМ-3 № 1
МНП-1 № 1	4,9998±0,0005	4,9998±0,0020	0,050	0,090	0,012	0,022	По МКМ-2 № 1

* Даны утренние средние квадратичные значения.

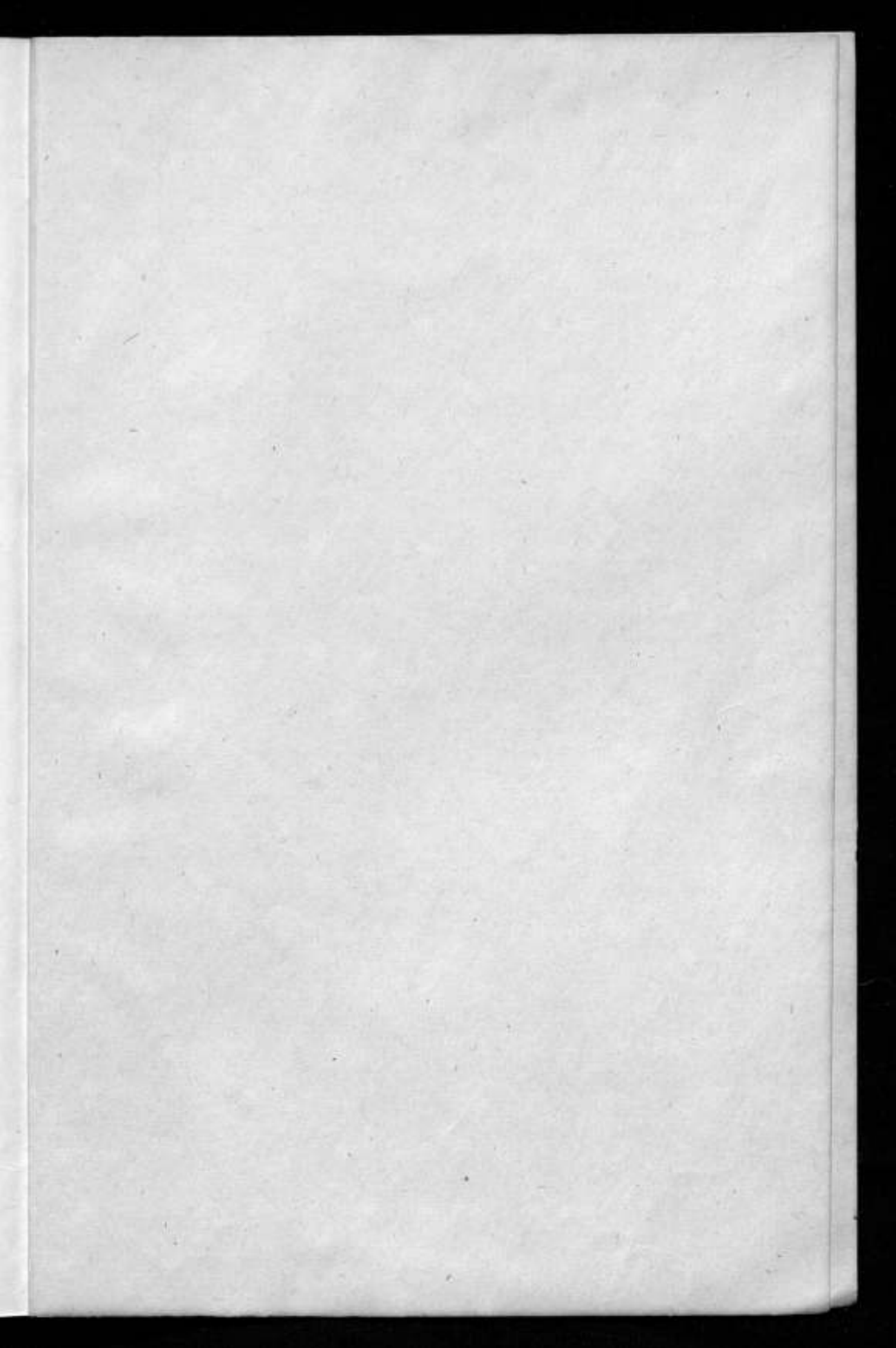
вполне объяснимо. Приборы типа МНП-2 работают в предельной нижней точке и это обстоятельство вызвало значительный разброс показаний.

Произведенные подробные исследования микроанометров типа МКМ-1, МКМ-2 и МКМ-3 показывают высокие метрологические качества этих приборов. Предельная относительная погрешность прибора не превосходит 0,01%. Показания приборов стабильные в пределах измерений от 1 до 400 кгс/м². Хорошая согласованность показаний на нижнем пределе измерений с показаниями весовых микроанометров, а на верхнем — с показаниями грузопоршневых микроанометров дает твердую основу для поддержания единства измерений малых разностей давлений в пределах от значений, близких к нулю, и до 4000 кгс/м².

ЛИТЕРАТУРА

1. Степанов Л. П., Микроанометр с кощевой мерой длины, Труды ВНИИМ, вып. 22 (82), 1954, стр. 108.
2. Белик Н. И., Приборы для измерений малых разностей давлений, Машиз, 1957.
3. Белик Н. И., Эталонные гидростатические весы для измерения малых разностей давлений, Сборник трудов ВНИИМ, вып. 2 (44), 1940, стр. 17.
4. Белик Н. И., Микроанометры, ГИТЛ УССР, Киев, 1953.
5. Методические указания № 171 по поверке микроанометров типа ММ, АД и Прадтля, Комитет стандартов, мер и измерительных приборов, М., 1959.
6. Дмитриев А. С., Часовников А. А., Образцовый микроанометр типа МНП-1 с пределами измерений 400 + 4000 кгс/м², Труды институтов Комитета, вып. 50 (110), 1961, стр. 103.

Поступила в редакцию
7/VI 1961 г.



Year	Production (in thousands of tons)		Consumption (in thousands of tons)		Exports (in thousands of tons)
	Actual	Estimated	Actual	Estimated	
1950	1,200	1,200	1,100	1,100	100
1951	1,300	1,300	1,200	1,200	100
1952	1,400	1,400	1,300	1,300	100
1953	1,500	1,500	1,400	1,400	100
1954	1,600	1,600	1,500	1,500	100
1955	1,700	1,700	1,600	1,600	100
1956	1,800	1,800	1,700	1,700	100
1957	1,900	1,900	1,800	1,800	100
1958	2,000	2,000	1,900	1,900	100
1959	2,100	2,100	2,000	2,000	100
1960	2,200	2,200	2,100	2,100	100

The following table shows the production and consumption of steel in the United States from 1950 to 1960. The production and consumption figures are in thousands of tons. The export figures are also in thousands of tons.

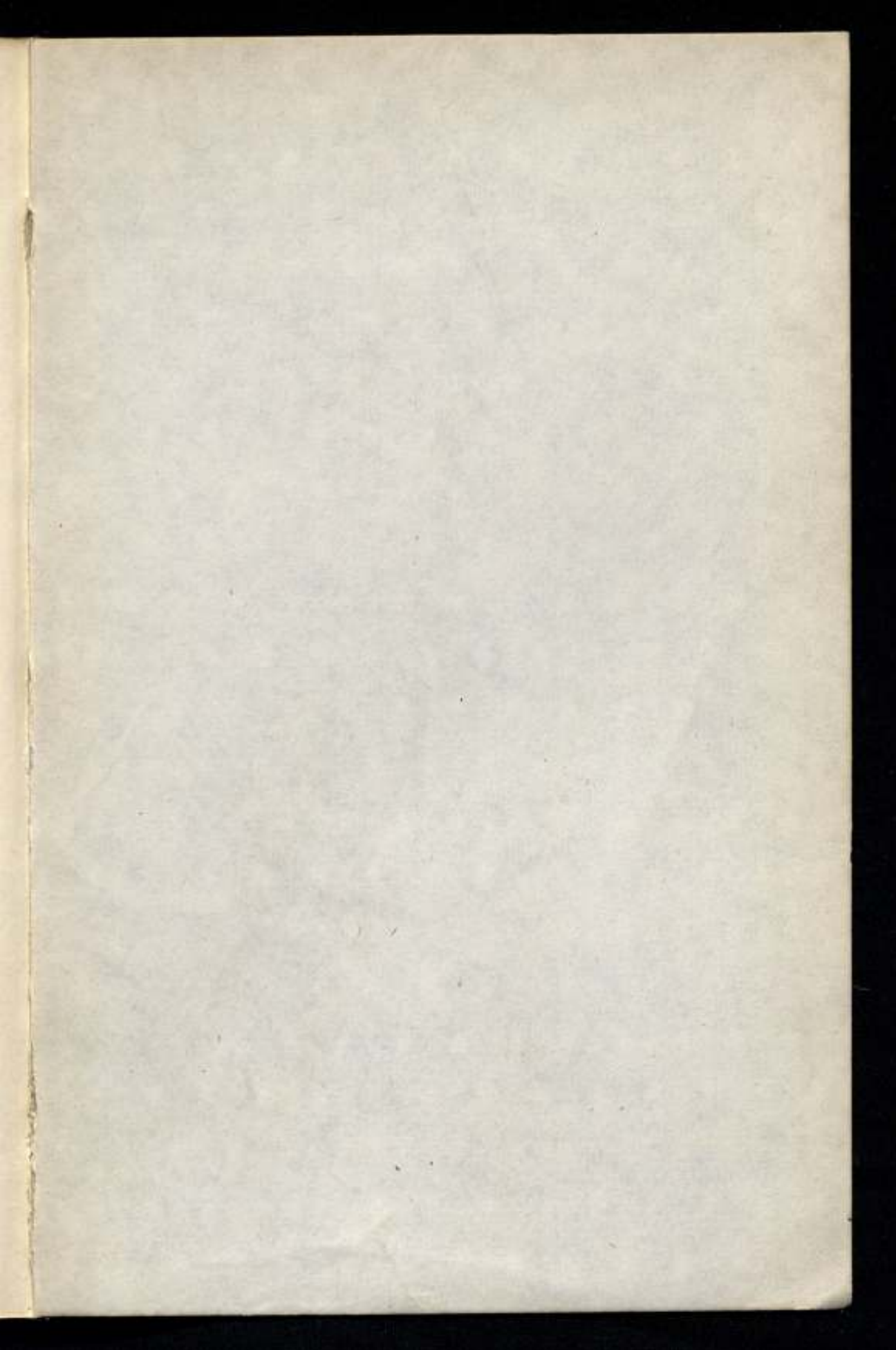
The production of steel in the United States has increased steadily from 1950 to 1960. The consumption of steel has also increased steadily over the same period. The export figures show that the United States has been a net exporter of steel since 1950.

APPENDIX

1. The following table shows the production and consumption of steel in the United States from 1950 to 1960. The production and consumption figures are in thousands of tons. The export figures are also in thousands of tons.

2. The following table shows the production and consumption of steel in the United States from 1950 to 1960. The production and consumption figures are in thousands of tons. The export figures are also in thousands of tons.

3. The following table shows the production and consumption of steel in the United States from 1950 to 1960. The production and consumption figures are in thousands of tons. The export figures are also in thousands of tons.



Цена 65 к.