

ГЛАВА 3. ИЗМЕРЕНИЕ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

3.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

3.1.1 Определение

Атмосферное давление на данную горизонтальную поверхность — это сила, действующая на единицу площади этой поверхности, обусловленная весом вышележащей атмосферы. Давление, таким образом, равно весу вертикального столба воздуха с основанием в единицу площади, простирающегося от рассматриваемой поверхности до внешней границы атмосферы.

Кроме фактического давления следует также определять изменение давления или барическую тенденцию. Барическая тенденция — это характер и величина изменения атмосферного давления за трехчасовой или другой конкретный период времени, заканчивающийся в срок наблюдения. Барическая тенденция состоит из двух частей, а именно: изменение давления и характеристика изменения давления. Значение барической тенденции определяется как разность между показаниями атмосферного давления в начале и конце указанного интервала времени. Характеристика атмосферного давления показывает, как менялось давление за этот период времени, например, падение, затем рост или рост и затем более быстрый рост.

3.1.2 Единицы измерения и шкалы

Основной единицей измерения атмосферного давления является паскаль (Па) — ньютон на квадратный метр ($\text{Н} \cdot \text{м}^{-2}$). Общепринятой практикой является прибавление приставки «гекто» к этой единице при сообщениях давления для метеорологических целей, при этом один гектопаскаль (гПа) равен 100 Па. Это объясняется главным образом тем, что один гектопаскаль (гПа) равен одному миллибару (мбар) — использовавшейся ранее единице. Более подробная информация об обязательном использовании единиц СИ приводится в настоящем томе, глава 1. Обратите внимание, что единицы, используемые для показаний барометра, такие как «мм рт. ст.», «в рт. ст.» или «мбар», не определены в СИ и не могут использоваться для международного обмена данными при сообщении об атмосферном давлении (см. также приложение 3.А к данной главе).

В этой главе используется только единица измерения гПа.

3.1.3 Метеорологические требования

Фундаментальной потребностью науки метеорологии является необходимость иметь проанализированные поля давления. При этом такие поля давления должны быть правильно определены, поскольку они составляют основу для всех последующих прогнозов состояния атмосферы. Измерения давления должны быть настолько точными, насколько это позволяет сделать применяемая технология и реалистичные финансовые ограничения, а измерения и процедуры калибровки должны быть унифицированными как в национальном, так и в международном плане.

Соответствующие комиссии ВМО определили необходимый уровень точности измерений давления для удовлетворения потребностей в интересах различных метеорологических применений; этот уровень описан в настоящем томе, глава 1, приложение 1.А, и является основным эталоном для спецификаций измерений в настоящем Руководстве.

Эти требования должны считаться достижимыми для новых барометров, размещаемых в строго контролируемой среде, такой как среда в должным образом оборудованной лаборатории. Такие лаборатории обеспечивают соответствующую требуемую погрешность барометров перед их установкой в рабочей среде.

Для НМГС практические ограничения потребуют хорошо спроектированного оборудования для поддержания такой погрешности барометров, установленных в окружающей среде. Особого внимания требует не только сам барометр, но и его установка. Тем не менее, характеристики барометра на станции, входящей в оперативную сеть, должны быть не хуже заявленных требований.

3.1.4 Методы измерений и наблюдений

3.1.4.1 Общие принципы измерений

Для метеорологических целей атмосферное давление обычно измеряется электронными барометрами, барометрами-анероидами или гипсотермометрами. Последний класс приборов, основанных на использовании зависимости точки кипения (температуры) воды от атмосферного давления, имеет ограниченное применение, и не будет обсуждаться подробно в настоящей публикации.

Ртутные барометры по-прежнему находятся в эксплуатации, но их больше не рекомендуется применять с учетом Минаматской конвенции о ртути (см. настоящий том, глава 1, п. 1.4.2). НМГС рекомендуется срочно принять надлежащие меры для замены ртутных барометров на современные альтернативы (см. п. 3.1.4.5). Информация о методах наблюдений с использованием ртутных барометров оставлена в приложении 3.А только для того, чтобы проинформировать читателя об этой устаревшей практике.

В большинстве барометров последней конструкции используются датчики, реакция которых преобразуется в соответствующие значения давления. Впоследствии эти значения обрабатываются с использованием соответствующих электрических интегрирующих схем или систем получения данных с соответствующими алгоритмами сглаживания. Для синоптических целей желательна постоянная времени, равная примерно 10 с (и не более 20 с).

Для измерения атмосферного давления существуют несколько общих методов, которые описаны в последующих разделах.

Мембрана из эластичного материала, закрепленная по краям, будет деформироваться, если давление на одной стороне больше, чем на другой. На практике используется запаянная металлическая коробка, полностью или частично вакуумированная, с сильной металлической пружиной для предотвращения разрушения коробки под воздействием внешнего атмосферного давления. Для измерений деформации под воздействием разности давления между внутренней и внешней частями коробки используются механические и электрические средства. Это принцип хорошо известного барометра-анероида.

В настоящее время разрабатываются элементы датчика давления, в которые входят тонкостенные цилиндры из никелевого сплава, находящиеся в вакууме. Опорная резонансная частота этих цилиндров изменяется в зависимости от разности давления внутри цилиндра, которое представляет собой атмосферное давление, и вне цилиндра, сохраняющегося в вакууме. По сути, эти приборы измеряют давление путем определения плотности газа (воздуха) внутри.

Широкое распространение получили датчики абсолютного давления, в которых используется кварцевый кристаллический элемент. Оказываемое через гофрированные мембраны на поверхность кристалла давление вызывает силу сжатия, воздействующую на кристалл. Вследствие пьезорезистивных свойств кристалла при воздействии

давления изменяется баланс активного моста Уитстона. Балансирование моста позволяет обеспечить точное определение давления. Датчики давления такого типа в конечном итоге не подвергаются воздействиям гистерезиса.

3.1.4.2 **Общие требования к размещению**

Важное значение имеет тщательный выбор местоположения барометров на наблюдательных станциях. К основным требованиям относятся хорошее освещение для считывания показаний (в случае их снятия вручную), отсутствие сквозняков, надежное крепление, не допускающее вибрации, а также защита от грубого обращения.

Для предотвращения искусственного воздействия ветра необходимо уделить вопросу размещения особое внимание. Такое воздействие характерно для измерений в помещениях из-за повышения давления снаружи здания, что приводит к появлению ошибок, которые иногда превышают 1 гПа. Более подробная информация приводится в п. 3.1.4.3.2.

3.1.4.3 **Источники погрешностей: общие замечания**

Ошибки при измерении давления могут возникать из-за неправильного размещения прибора. Прибор должен располагаться в среде, где внешние воздействия не приводят к ошибкам измерений. К таким воздействиям относятся ветер, радиация и температура, удары и вибрация, колебания в обеспечении электрической энергией и скачки давления. Важно, чтобы все наблюдатели-метеорологи или технический персонал в полной мере понимали эти воздействия и могли оценить, оказывает ли какой-либо из этих факторов влияние на точность показаний используемого барометра.

В случае снятия показаний вручную прибор (или его дисплей) должен быть легко читаемым. Приборы должны быть спроектированы таким образом, чтобы разрешение их показаний было лучше, чем требуемая погрешность измерений, то есть чтобы ошибка округления не увеличивала существенно погрешность результатов измерений.

3.1.4.3.1 **Воздействие температуры**

Колебания температуры не должны влиять на показания приборов. Приборы пригодны только в том случае, если выполняется хотя бы одно из следующих условий:

- a) конструкцией прибора предусмотрено, что температура не оказывает воздействия на его работу, или это воздействие компенсируется во всем диапазоне температур, что должно быть подтверждено надлежащей калибровкой и испытаниями;
- b) разработаны и применяются процедуры для внесения температурных поправок в показания, которые обеспечивают необходимую погрешность;
- c) элемент, измеряющий давление, располагается в среде, где температура стабилизируется таким образом, чтобы обеспечивать требуемую погрешность.

В большинстве приборов измеряется температура датчика давления с тем, чтобы компенсировать влияние температуры. Необходимо контролировать и проводить калибровку температурной компенсации при проведении стандартной калибровки датчиков давления.

3.1.4.3.2 **Влияние ветра**

Следует отметить, что ветер оказывает воздействие на все типы барометров. Более подробные данные о воздействии ветра можно получить из работы Liu and Darkow (1989).

Барометр не даст точное показание статического давления, если на него оказывает влияние порыв ветра. Его показания будут флуктуировать в зависимости от скорости и направления ветра, величины и знака флуктуации ветра, зависящих от характера открытых проемов помещения и их положения по отношению к направлению ветра. На море ошибка всегда присутствует в связи с движением судна. Аналогичная проблема возникает, если барометр установлен в помещении с кондиционером.

Ветер часто может вызывать динамические изменения давления в помещении, где располагается барометр. Эти изменения накладываются на статическое давление и при сильном и порывистом ветре могут достигать 2 или 3 гПа. Обычно не имеет смысла вводить коррекцию на такие флуктуации, поскольку «накачивающее» воздействие зависит как от направления, так и от силы ветра, а также от местных условий, в которых находится барометр. Таким образом, даже «среднее значение» не представляет собой действительное статическое давление. Поэтому при сравнении двух барометров, находящихся в различных зданиях, необходимо иметь в виду, что возможны различия в показаниях вследствие влияния ветра.

Это влияние можно существенно уменьшить с помощью статической насадки между атмосферой снаружи и входным отверстием барометра. Подробные сведения, касающиеся принципов использования статических насадок, можно найти в различных публикациях (Miksad, 1976; United States Weather Bureau, 1963). Анероидные и электронные барометры обычно имеют простые соединения, позволяющие использовать статическую насадку, которая должна находиться на открытой местности и не подвергаться воздействию расположенных поблизости зданий. Выбор конструкции такой насадки требует особого внимания. Насадки статического давления коммерчески доступны, однако опубликованные данные взаимных сравнений для демонстрации их характеристик скудны.

3.1.4.3.3 Воздействие кондиционирования воздуха

Кондиционирование воздуха может вызвать значительную разность давления внутри и снаружи помещения. Поэтому если барометр устанавливается в помещении, где есть кондиционер воздуха, то следует использовать статическую насадку с барометром, которая соединит его с воздухом снаружи здания.

3.1.4.3.4 Воздействие гистерезиса

Некоторые барометры (в частности, анероидные барометры) подвержены воздействию гистерезиса, который превышает 0,1 гПа. Чтобы продемонстрировать, что любой гистерезис находится в пределах требуемой погрешности измерений, калибровки должны проводиться как при пошаговом повышении, так и при понижении давления.

3.1.4.3.5 Транспортировка и использование в нестабильной среде

Барометры могут быть чувствительны к вибрациям и ударам, что влияет на настройку оборудования. Особое внимание следует уделять тому, чтобы не допускать ударных воздействий при транспортировке, и приборы должны размещаться в среде без вибраций.

3.1.4.4 Уход за приборами: общие положения

Рассмотрим следующие процедуры по техническому обслуживанию приборов:

- a) приборы и особенно входное отверстие приемника давления должны содержаться в чистоте и не засоряться;
- b) необходимо регулярно проверять высоту установки чувствительного элемента и его крепление;

- с) приборы необходимо регулярно калибровать (и при необходимости регулировать); интервал между двумя калибровками должен быть достаточно коротким с тем, чтобы суммарная абсолютная погрешность измерения удовлетворяла требованиям к погрешности;
- д) любые изменения погрешности (долгосрочного или краткосрочного характера) должны быть намного меньше значений, приведенных в настоящем томе, глава 1, приложение 1.А. Если у каких-либо приборов имеется история дрейфа калибровки, эти приборы могут быть пригодны для оперативного использования лишь в том случае, если период между калибровками является достаточно коротким, с тем чтобы обеспечить необходимую погрешность измерения во все сроки;
- е) когда необходимо откалибровать прибор на удалении от места его оперативного использования, способ транспортировки не должен оказывать воздействия на стабильность или точность прибора; к воздействиям, которые могут изменить калибровку прибора, относятся механические удары и вибрация, отклонение от вертикального положения и значительные колебания давления, которые могут возникнуть во время транспортировки воздушным транспортом.

3.1.4.5 ***Последствия Минаматской конвенции с точки зрения измерения давления***

Минаматская конвенция ЮНЕП о ртути вступила в силу во всем мире в августе 2017 года и запрещает любое производство, импорт и экспорт ртутных барометров (см. настоящий том, глава 1, п. 1.4.2). В связи с этим больше не рекомендуется применять ртутные барометры, и настоятельно поощряется принятие надлежащих мер для замены таких барометров на современные альтернативы. Электронные барометры представляют собой экономичную, точную и надежную альтернативу таким опасным ртутным приборам и обеспечивают значительные преимущества в плане хранения данных и отображения информации в режиме реального времени.

3.2 **ЭЛЕКТРОННЫЕ БАРОМЕТРЫ**

В большинстве барометров современной конструкции используются датчики, которые переводят реакцию датчика на изменение давления в электрические сигналы. К ним могут относиться аналоговые сигналы, например напряжение (DC или AC с частотой, связанной с действительным давлением), или цифровые, например пульсация частоты или стандартные протоколы данных связи, такие, как RS232, RS422, RS485 или IEEE488. Аналоговые сигналы могут выводиться на дисплеи разнообразных электронных счетчиков. Для вывода на дисплей цифровых данных или оцифрованных аналоговых данных часто используются мониторы и системы получения данных, подобные тем, которые применяются в АМС.

Для повышения точности измерений и достижения длительной стабильности технологии современных цифровых барометров постоянно совершенствуются. Один из методов состоит в использовании трех независимо работающих датчиков под управлением одного микропроцессора. Еще более высокую надежность и стабильность можно достичь при использовании трех абсолютно независимых барометров, включающих три комплекта датчиков давления и микропроцессоров. В каждом комплекте происходит автоматическая компенсация на температуру за счет встроенных датчиков температуры. Тройное приведение обеспечивает отличную длительную стабильность и точность измерений даже в самых экстремальных условиях. Такие подходы позволяют обеспечивать постоянный мониторинг и проверку характеристик отдельного датчика.

3.2.1 **Емкостные датчики с переменной емкостью на основе интегральных схем**

В емкостных датчиках давления используется электрическое свойство емкости для измерения смещения диафрагмы. Диафрагма представляет собой упругий датчик давления, смещающийся пропорционально изменениям давления. Она действует как одна пластина конденсатора, который фиксирует деформацию из-за приложенного давления и становится переменным конденсатором. Изменение емкости вызывает изменение этого электрического сигнала. Затем он преобразуется и выводится на устройстве, откалиброванном по давлению. Общепринятой технологией является использование металлических, керамических и кремниевых диафрагм. Поскольку значение этого измерения зависит от температуры, также измеряется температура датчика для ее компенсации, чтобы датчик отвечал требованиям точности.

Сегодня в технологии интегральных схем часто применяются датчики с кремниевой мембраной (размером около 1 мкм). В этом методе абсолютное давление измеряется с помощью вакуумной камеры (при давлении менее 10^{-3} гПа).

3.2.2 **Цифровые пьезорезистивные барометры**

Измерения атмосферного давления стали возможными с использованием пьезоэлектрического (пьезорезистивного) эффекта. Общая схема состоит в том, что четыре измерительных сопротивления, помещенные на гибкой поверхности монолитной кремниевой подложки, соединены между собой таким образом, чтобы образовать мост Уитстона.

В цифровых пьезорезистивных барометрах используются датчики, представляющие собой элементы кристаллического кварца с осевой нагрузкой, при этом они являются датчиками абсолютного давления. Кристаллический кварц выбран из-за его пьезоэлектрических свойств, стабильности частотных характеристик, малой подверженности температурным воздействиям и точно воспроизводимых частотных характеристик. Давление, оказываемое на впускное окно, вызывает осевую подъемную силу с помощью подвижных чашечек, в результате чего на кристаллический кварцевый элемент оказывает воздействие сила давления. Поскольку кристаллический элемент представляет собой довольно жесткую мембрану, то при регистрации изменений давления напрягается вся механическая часть барометра, в результате чего устраняется механический гистерезис.

Упомянутый выше действующий мост Уитстона может состоять либо из полупроводниковых датчиков напряжения, либо из пьезорезистивных датчиков. Датчики напряжения либо связаны с тонкой круглой диафрагмой, которая зажата по окружности, либо автоматически преобразуются в кремниевый контур в форме диафрагмы. В диффузных приборах сама кремниевая интегрированная пластина является диафрагмой. Прилагаемое давление представляет собой распределенную нагрузку на диафрагму, которая в свою очередь обеспечивает изгибающие усилия и результирующие напряжения, на которые реагируют тензодатчики и которые создают напряжение, пропорциональное прилагаемому давлению, в результате чего возникает разбалансирование моста. Выходные данные моста пропорциональны изменению давления, действующего на диафрагму.

Этот принцип работы основан на том, что атмосферное давление воздействует на элемент датчика, покрывающий небольшую камеру, из которой откачан воздух. Через нее сопротивления подвергаются силам сжатия и растяжения. Вследствие пьезоэлектрического эффекта величины сопротивления изменяются пропорционально атмосферному давлению. Чтобы избежать ошибок за счет температурных воздействий, прибор часто встраивается в термостат.

Выходной сигнал постоянного тока моста Уитстона преобразуется в стандартный сигнал с помощью соответствующего усилителя. Обычно величина измеряемого давления представляется на светодиоде (СИД) или на жидкокристаллическом мониторе.

В современном варианте пьезоэлектрического датчика давления определяются две резонансные частоты пьезоэлектрического элемента. Путем расчета линейных функций этих частот и применения соответствующего комплекта параметров, полученных после калибровки, с помощью микропроцессора, который не зависит от температуры датчика, рассчитывается давление.

3.2.3 Вибрационно-частотные барометры

В вибрационно-частотных барометрах в качестве измерительного элемента используется тонкостенный цилиндр из никелевого сплава. С помощью электромагнитного поля он поддерживается в режиме вибрации. Изменение давления вызывает изменение опорной резонансной частоты вибрирующей механической системы. Вибрация стенок цилиндра измеряется принимающей катушкой, сигнал которой усиливается и подается на приводную катушку. Давление воздуха измеряется внутри цилиндра, а на его внешней стороне поддерживается стандартный вакуум. Опорная резонансная частота вибрации изменяется пропорционально разнице давлений на стенках цилиндра. Повышение давления вызывает увеличение частоты.

Тонкостенный цилиндр должен иметь достаточную прочность и массу с тем, чтобы выдерживать давление диапазона, в котором он предназначен работать, и находиться на прочном основании. Для метеорологических применений цилиндр помещается в вакуумную камеру, а вход цилиндра соединяется со свободной атмосферой. В связи с тем, что имеется прямая зависимость между опорной резонансной частотой цилиндра и давлением, атмосферное давление можно рассчитывать по измеряемой резонансной частоте. Однако эта зависимость, определенная во время калибровки, зависит от температуры и плотности газа. Поэтому требуется температурная компенсация, и рекомендуется подсушивать воздух до входа в цилиндр.

3.2.4 Деформационные датчики с детекторами смещения

Высокоточные приборы для измерения давления, использующие принцип бесконтактного измерения смещения анероидной коробки, крайне важны в практике метеорологических применений. Применяется широкий диапазон таких датчиков, в том числе емкостные детекторы смещения, потенциометрические детекторы смещения, тензометры, размещаемые в важнейших точках датчика, и рычажные сервосистемы, которые сохраняют размеры датчика постоянными, независимо от давления.

Все чувствительные элементы должны помещаться внутри литого кожуха. Этот кожух следует содержать при постоянной температуре с помощью электронно-управляемого нагревателя, если только конструкцией не предусмотрена соответствующая температурная компенсация. Следует полностью избегать конденсации водяного пара. Эффективным методом предотвращения этого является помещение в литой кожух гигроскопического вещества, такого как силикат, а диффузии водяного пара в кожух можно избежать с помощью присоединения к нему длинной пластмассовой трубки (примерно 25 м) с диаметром отверстия 2 мм или менее между отверстием давления и статической насадкой (см. п. 3.1.4.3.2).

Кожух датчика давления должен быть воздухонепроницаемым и обеспечивать внешнюю связь с отсеком, где должно измеряться давление.

3.2.5 Размещение электронных барометров

Подробные сведения об общих требованиях к размещению приведены в п. 3.1.4.2. Электронные барометры следует устанавливать вдали от источников электромагнитного излучения; если это невозможно, следует экранировать кабельные соединения и кожух.

3.2.6 **Снятие показаний электронных барометров**

С помощью электронного барометра измеряется атмосферное давление окружающего пространства или любого пространства, которое соединяется с ним через трубку. Как правило, барометр следует устанавливать так, чтобы снимать показания на уровне прибора. Однако на борту судна или на наземных станциях, расположенных на небольших высотах, прибор может быть установлен таким образом, чтобы показывать давление, соответствующее СУМ при условии, что разность между давлением на станции и на уровне моря можно считать постоянной.

Электронные барометры дают точные показания на числовой шкале, обычно представленной в гПа, однако в случае необходимости их можно легко перевести и в другие единицы. Как правило, можно обеспечить регистрацию в цифровой форме. Можно также выводить тенденцию изменения давления, если прибор управляется микропроцессором.

К основным датчикам могут присоединяться цепи, которые корректируют основной выходной сигнал на нелинейность датчика и воздействие температуры и переводят выходные значения в стандартные единицы. В состав современного стандартного барометра входят датчик давления, микрокомпьютерное устройство (включая дисплей) и цепь интерфейса для связи с любым регистратором данных или с АМС.

Электронные барометры, имеющие несколько датчиков или чувствительных элементов, обычно рассчитывают средневзвешенное значение по каждому датчику и результирующее выходное значение давления с точностью минимум 0,1 гПа. Во время калибровки каждый чувствительный элемент может быть проверен с точностью минимум 0,01 гПа.

3.2.7 **Источники ошибки**

Точность показаний электронных барометров зависит от погрешности их калибровки, эффективности температурной компенсации (от остаточного давления воздуха в чувствительном элементе, температуры и поправки, качества термостата) и изменения со временем.

3.2.7.1 **Смещение в период между калибровками**

Смещение в период между калибровками представляет собой один из основных источников погрешности барометров. Оно часто является большим, если барометр новый; со временем это отклонение уменьшается. Могут возникать скачкообразные изменения в калибровке.

Чтобы обеспечить надежную работу барометра, поправки калибровки, применяемые к показаниям, должны проверяться сравнительно часто, например, для начала ежегодно, с тем чтобы своевременно обнаруживать и заменять неисправные приборы.

Необходимость частой проверки калибровки электронных барометров ложится дополнительным бременем на НМГС, особенно на те, которые имеют обширные сети барометров. Затраты на эти калибровки должны приниматься во внимание при планировании замены ртутных барометров электронными.

3.2.7.2 **Температура**

Большинство электронных барометров имеют надлежащую компенсацию температуры, что может быть подтверждено во время калибровки или испытаний. В случае, если у электронного барометра нет достаточной температурной компенсации, его следует содержать при постоянной температуре с тем, чтобы сохранялась калибровка. Температура должна быть приближена к температуре калибровки. Электронные

барометры без контроля за температурой обычно подвержены большей погрешности. Большинство из них зависят от точности измерения температуры чувствительного элемента и точности электронной коррекции давления. При этом следует исходить из того, что в чувствительном элементе барометра нет термических градиентов. В тех случаях, когда изменения температуры происходят довольно быстро, возможны временные ошибки при измерении давления за счет гистерезиса.

Изменения в калибровке также могут зависеть от термической истории барометра. Продолжительное воздействие температурных изменений может привести к существенным изменениям в калибровке, как временным, так и постоянным.

Если барометры не находятся при той же температуре, что и температура чувствительного элемента, то возможно также появление ошибок за счет электронной части барометров. Электронные барометры часто применяются в экстремальных климатических ситуациях, особенно при использовании в АМС. При таких ситуациях барометр может испытывать колебания температуры, превышающие пределы, предусмотренные проектом изготовителя и спецификацией калибровки.

3.2.7.3 **Электрические помехи**

Как и все чувствительные электронные измерительные приборы, электронные барометры следует защищать и содержать вдали от источников сильных магнитных полей, таких как трансформаторы, компьютеры, радиолокаторы и т. д. Это не всегда является проблемой, но может привести к увеличению шума, в результате чего понижается точность прибора.

3.2.7.4 **Характер работы**

Заметные изменения в калибровке электронного барометра могут быть вызваны разницей работы барометра во время калибровки и при его оперативном использовании. Барометр, который работает постоянно и поэтому прогреет, будет показывать иное давление по сравнению с барометром, с которого считываются показания методом пульсации каждые несколько секунд.

3.3 **БАРОМЕТРЫ-АНЕРОИДЫ**

3.3.1 **Требования к конструкции**

Основными частями анероида являются закрытая металлическая коробка, из которой полностью или частично выкачан воздух, и сильная система пружин, которая защищает коробку от деформации в условиях внешнего атмосферного давления. При любом определенном давлении будет соблюдаться равновесие между силой внешнего давления и силой противодействия пружины.

Коробка анероида может изготавливаться из материалов (сталь или бериллиевая медь), которые обладают такими эластичными свойствами, что коробка сама может действовать как пружина.

Необходимо какое-то средство для обнаружения и фиксирования деформации коробки. Это может быть система рычагов, которые усиливают деформацию и передвигают стрелку по шкале, проградуированной в единицах давления. В качестве другого принципа действия может использоваться световой луч, отклоняющийся в пределах шкалы. Вместо этих механических средств некоторые барометры снабжены микрометром с ручной настройкой, счетчик которого показывает давление в десятых долях гектопаскаля. Показания снимают в тот момент, когда светящийся индикатор сигнализирует о контакте микрометра с барокоробкой анероида. Анероид этого типа портативен и прочен.

3.3.2 **Достижимая погрешность измерения**

Достижимая погрешность измерения в 0,3 гПа возможна для хорошо спроектированного и сконструированного барометра-анероида. Для достижения такой погрешности, помимо регулярной, частой калибровки для уменьшения дрейфа калибровки (как уже упоминалось в отношении электронных барометров в п. 3.2.7.1), необходимо учитывать следующие правила:

- a) барометр должен компенсировать температурные колебания так, чтобы при изменении температуры на 30 К отсчеты анероида изменялись не более, чем на 0,3 гПа;
- b) ошибки шкалы в любой точке не должны превышать 0,3 гПа и должны оставаться в этих пределах не менее года при нормальной эксплуатации;
- c) гистерезис должен быть достаточно малым, чтобы различие в показаниях перед изменением давления на 50 гПа и после возвращения к первоначальному значению составляло не более 0,3 гПа;
- d) он должен противостоять обычным транзитным рискам и сохранять свои характеристики в пределах указанных допусков.

3.3.3 **Размещение барометров-анероидов**

Подробные сведения об общих требованиях к размещению приведены в п. 3.1.4.2. Выбирать место для установки прибора следует так, чтобы в течение всего дня сохранялась сравнительно постоянная температура. Таким образом, это место должно быть экранировано от прямых солнечных лучей, а также от других источников тепла или холода, которые могут привести к резким и заметным изменениям его температуры.

3.3.4 **Снятие показаний барометров-анероидов**

3.3.4.1 **Точность снятия показаний**

Барометр-анероид должен находиться всегда в том же положении (вертикальном или горизонтальном), в котором он калибровался. Перед отсчетом показаний по барометру необходимо слегка постучать. По возможности, показания необходимо снимать с точностью до 0,1 гПа. Для уменьшения ошибок, обусловленных применением механических рычагов, имеются оптические и цифровые приборы. В отсчеты должны вводиться инструментальные поправки; кроме того, в приборе предусмотрена компенсация на температуру, и нет необходимости в поправке на ускорение силы тяжести.

3.3.4.2 **Приведения, применяемые к барометрам**

Как правило, барометр-анероид должен быть установлен так, чтобы измерять давление на уровне его установки. Однако на борту судна или на наземных станциях, расположенных на небольших высотах, прибор может быть установлен таким образом, чтобы показывать давление, соответствующее СУМ при условии, что разность между давлением на станции и на уровне моря можно считать постоянной.

3.3.5 **Источники ошибки**

3.3.5.1 ***Неполная компенсация на температуру***

Ослабление пружины в барометре-анероиде из-за повышения температуры приводит к завышению показаний давления. Этот эффект обычно устраняется одним из следующих способов:

- a) посредством применения биметаллического компенсатора в системе рычагов;
- b) с помощью некоторого количества газа, оставленного внутри анероидной коробки.

В большинстве обычных барометров-анероидов полная компенсация с помощью этих методов достигается только при каком-то одном значении давления. Желательно, чтобы все барометры-анероиды и барографы, используемые на метеорологических станциях, были хорошо компенсированы на температуру по всему диапазону давления. В цифровых системах считывания, пригодных для автоматизации, такие суммарные поправки могут применяться, как часть электронной системы.

3.3.5.2 ***Погрешности упругости***

Барометр-анероид может подвергаться значительным и быстрым изменениям при воздействии давления. Так, например, при сильном порыве ветра барометр-анероид будет испытывать резкое увеличение давления, после чего последует более плавное возвращение к первоначальному значению. В таких случаях вследствие гистерезиса прибор будет показывать значения давления, несколько отличные от действительных; и может потребоваться много времени, прежде чем эта разница станет незначительной. Но поскольку анероиды и барографы на наземных станциях обычно не подвергаются значительным изменениям давления, их погрешности из-за гистерезиса небольшие.

Существуют также постоянные ошибки из-за медленных изменений свойств металла анероидной коробки. Поправка на этот эффект может быть получена путем сравнения через определенные интервалы времени, например, ежегодно со стандартным барометром. Хороший барометр-анероид должен сохранять точность 0,1 гПа в течение года или более. В целях определения отклонения от этой точности отдельных барометров необходимо установить процедуру регулярной поверки с проведением по необходимости калибровки и корректировки.

3.4 **БАРОГРАФЫ**

3.4.1 **Общие требования**

Из всего многообразия барографов здесь будут подробно рассмотрены только барографы-анероиды. Рекомендуется, чтобы ленты барографов, используемых для синоптических целей, отвечали следующим требованиям:

- a) были проградуированы в гПа;
- b) давали возможность производить отсчет с точностью до 0,1 гПа;
- c) имели масштабный коэффициент 10 гПа на каждые 1,5 см ленты.

Кроме того, желательно, чтобы барографы отвечали следующим требованиям:

- a) в барографе должен использоваться высококачественный anerоид (см. п. 3.4.2);
- b) барограф должен быть компенсирован на температуру таким образом, чтобы при изменении температуры на 20 К, его показания изменялись не более чем на 1 гПа;
- c) ошибки шкалы в любой точке не должны превышать 1,5 гПа;
- d) гистерезис должен быть достаточно малым, таким, чтобы различие в показаниях перед изменением давления на 50 гПа и после возвращения к первоначальному значению было не более 1 гПа;
- e) прибор должен снабжаться устройством для отметок времени, позволяющим делать засечки при закрытой крышке;
- f) держатель пера должен поворачиваться в «вилке», ось которой наклонена таким образом, чтобы перо покоилось на ленте под действием силы тяжести; установка пера в определенное положение должна обеспечиваться регулировочным механизмом.

К морским барографам предъявляются особые требования, которые рассматриваются в томе III, глава 4 настоящего Руководства.

3.4.2 Устройство барографов

Принцип устройства anerоидного барографа аналогичен принципу барометров-анероидов, за исключением того, что вместо стрелки используется пишущее перо. С этим связаны некоторые изменения в конструкции выводной трубы кожуха, и обычно уменьшение и увеличение количества и размера используемых мембран.

«Нормированную» реакцию барографа можно определить как силу, необходимую для перемещения пера на единицу шкалы (1 гПа), т. е. силу, которая требуется для удержания пера на месте при изменении давления на 1 гПа. Эта мера необходима для преодоления влияния трения, чтобы обеспечить детальную запись.

Сила, которая требуется для преодоления движения диафрагмы, когда давление изменяется на 1 гПа, равна $100 A$ ньютонов, где A — действительная площадь поперечного сечения мембраны в квадратных метрах. Если усилие равно X , сила, которая необходима для удержания пера на месте, составляет $100 A/X$ ньютонов и изменяется как A/X . Для определенного типа мембраны и масштаба шкалы значение X в основном не зависит от A , и, таким образом, нормированное перемещение пера барографа можно считать примерно пропорциональным действительной площади поперечного сечения мембраны.

3.4.3 Размещение барографов

Подробные сведения об общих требованиях к размещению приведены в п. 3.1.4.2. Барограф должен располагаться в таком месте, которое недоступно для лиц, не имеющих разрешения пользоваться им. Установка на губчатой каучуковой подушке является удобным способом уменьшения воздействий вибрации. Выбранное место должно быть сухим и чистым. В нем также должно быть как можно меньше таких веществ в воздухе, которые вызывают коррозию и загрязнение механизма.

Важно также разместить прибор таким образом, чтобы его шкала при обычных условиях работы находилась на удобной для снятия показаний высоте с тем, чтобы свести к минимуму явление параллакса. Барограф должен располагаться таким образом, чтобы он равномерно освещался; в случае необходимости следует воспользоваться искусственным освещением.

3.4.4 **Источники ошибки**

Кроме уже упомянутых источников ошибок барометра-анероида (см. п. 3.3.5), для барографа важное значение имеет трение между пером и бумагой. Нормированное перемещение пера зависит, главным образом, от действительного поперечного сечения анероидной коробки. В хорошем барографе трение пера значительно выше, чем общее трение всех осей и опор прибора; поэтому необходимо обращать особое внимание на уменьшение таких ошибок по этой причине, например, за счет применения анероидной коробки достаточно большого размера.

Высококачественный барограф должен иметь погрешность не более 0,2 гПа после внесения поправок и должен сохранять эту точность в течение одного-двух месяцев. Значение барической тенденции такого барографа обычно отсчитывается с этой же точностью.

3.4.5 **Снятие показаний барографа**

Показания барографа снимаются так, чтобы не касаться прибора. Отметка времени и любой осмотр прибора, включающий поднятие крышки и т. п., следует всегда производить после того, как полностью сделан отсчет.

3.4.5.1 **Точность снятия показаний**

Отсчет по ленте прибора должен производиться с точностью до 0,1 гПа. Барическую тенденцию следует отсчитывать с такой же точностью.

3.4.5.2 **Поправки, вводимые в показания барографа**

Перед использованием каждого прибора необходимо проверить его компенсацию на температуру. Масштабный коэффициент регулируется при проверке в вакуумной камере. Если барограф используется только для определения барической тенденции, поправки в его показания обычно не вводят. В этом случае точная установка пера не имеет значения. Если барограф используется для получения абсолютных значений давления, то показания барографа необходимо сравнивать с отсчетами электронного барометра или хорошего барометра-анероида, по крайней мере, один раз в сутки. Искомые значения поправок можно определять методом интерполяции.

3.4.5 **Транспортировка**

Если барограф нужно перевезти на самолете или на большой высоте, держатель пера должен быть отведен от барабана и, кроме того, должны быть приняты меры предосторожности, позволяющие механизму противостоять перегрузке, вызванной превышением обычного диапазона работы прибора.

3.5 **ИЗМЕНЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ И БАРИЧЕСКАЯ ТЕНДЕНЦИЯ**

3.5.1 **Барическая тенденция и характеристика барической тенденции**

На станциях приземных синоптических наблюдений, барическая тенденция и характеристика барической тенденции должны определяться из наблюдений за последние 3 ч (за 24 ч в тропических регионах). В основном характеристика барической тенденции может быть выражена формой кривой, зарегистрированной в течение 3-часового периода, предшествующего наблюдению. В случае ежечасных наблюдений количество и характеристика могут основываться только на четырех наблюдениях,

что может привести к ошибочным толкованиям. Поэтому рекомендуется определять характеристику на основе более частых наблюдений, например, с 10-минутными интервалами (WMO, 1985). Имеется определение девяти типов характеристик барической тенденции (см. WMO, 2011).

3.5.2 Измерение барической тенденции

Станции, проводящие наблюдения, по меньшей мере, каждые 3 часа, могут пользоваться несколькими методами:

- a) цифровые электронные барометры обычно отображают тенденцию изменения давления вместе с фактическим давлением;
- b) тенденцию можно определить напрямую по показанию барографа;
- c) тенденцию можно определить по соответствующим показаниям барометра, приведенным к уровню станции.

Ошибки, возникающие при снятии показаний барометра, при условии его хорошей работы обычно являются случайными. Поэтому при определении значения тенденции, при вычитании двух показаний, ошибки могут складываться. Ошибки частично носят систематический характер, поэтому в течение сравнительно короткого трехчасового периода они должны иметь одинаковый знак и уменьшаться при вычитании.

3.6 ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОСЛЕЖИВАЕМОСТИ И КАЛИБРОВКА

3.6.1 Замечания общего характера

Учитывая необходимость получения точных данных о давлении, особенно для аэронавигационных и синоптических целей, а также подверженность барометров различного рода ошибкам, крайне важное значение имеет обеспечение прослеживаемости и регулярная калибровка барометров. Начиная с 1960-х годов для обеспечения прослеживаемости измерений давления применялась концепция сравнения барометров, которая включала специальные региональные эталонные барометры в каждой региональной ассоциации ВМО. Эта концепция была упразднена решением 36 (ИС-69), принятым Исполнительным советом ВМО на его шестьдесят девятой сессии в 2017 году. В настоящее время сопоставимость измерений атмосферного давления с единицами СИ может быть обеспечена более эффективно и экономично с помощью непрерывной цепочки прослеживаемости, и вместо предыдущей концепции внедряется новая «стратегия обеспечения прослеживаемости» (см. настоящий том, глава 1, приложение 1.B).

Некоторые рекомендации, касающиеся используемого оборудования для проведения калибровки в лабораториях и на передвижных станциях, а также проверок в полевых условиях, даются в последующих разделах. Определения и общие замечания по калибровке приведены в томе V, глава 4 настоящего Руководства; а с руководством по расчету погрешностей калибровки можно ознакомиться в публикации ВМО (WMO, 2015).

3.6.2 Лабораторная калибровка

Лабораторную калибровку барометров необходимо регулярно проводить в лабораториях калибровки, имеющих аккредитацию ИСО/МЭК 17025, или в службе НМУ, имеющей сертификат СВП МКМВ. Если подходящей лаборатории нет, следует обеспечить прослеживаемость до СИ в соответствии со стратегией обеспечения прослеживаемости, описанной в настоящем томе, глава 1, приложение 1.B.

В целом, калибровка может проводиться в разных местах. Для достижения более низкой погрешности калибровку следует проводить в стационарной лаборатории калибровки, расположенной в фиксированном месте. В таких условиях можно использовать более чувствительные абсолютные эталоны, хорошо контролировать условия окружающей среды (например, температуру и влажность) и обеспечить защиту установки от вибраций.

Если приборы, подлежащие калибровке, невозможно регулярно перемещать в стационарную лабораторию калибровки, калибровка может быть выполнена с помощью мобильного калибровочного оборудования на месте в здании на пункте наблюдений или в специально оборудованном автомобиле. Поскольку условия окружающей среды нельзя контролировать настолько же точно, как в стационарной лаборатории калибровки, достижимые погрешности, как правило, будут больше.

3.6.2.1 **Общепринятая установка оборудования**

В большинстве случаев калибровочное оборудование включает в себя контроллер давления в сочетании с контрольным барометром, который прослеживается до СИ. Контроллеры давления регулируют давление в шланге с подключенным прибором, который необходимо откалибровать. К контроллеру давления подключаются вакуумный насос и источник давления. Настоятельно рекомендуется использовать в качестве источника давления баллон с сухим, очищенным сжатым воздухом очень высокой чистоты. Контейнер должен быть оснащен редукционным клапаном. Между редукционным клапаном и шлангом к регулятору давления необходимо подсоединить микрофильтр. В качестве эталонных данных используются данные контрольного барометра, а не данные контроллера. Для некоторых барометров можно также использовать очищенный азот. Однако для барометров, использующих технологию, основанную на измерении плотности воздуха (например, вибрационно-частотные барометры), азот использовать нельзя, поскольку плотность воздуха отличается от плотности азота.

Следует также учитывать следующие аспекты, основанные на руководящих принципах Европейской ассоциации национальных метрологических институтов (EURAMET) (EURAMET, 2017):

- a) все оборудование должно быть защищено от прямого солнечного света и любых источников тепла;
- b) калибруемые приборы должны располагаться как можно ближе к эталонному прибору и на той же высоте;
- c) уровни контроля давления обоих приборов должны располагаться как можно ближе друг к другу. Если есть различия, их необходимо учитывать для внесения поправок и учета погрешностей;
- d) необходимо выделить время на прогрев и акклиматизацию оборудования для достижения теплового равновесия во всей системе;
- e) все барометры измеряют давление с помощью методов, чувствительных к температуре. По этой причине эти приборы имеют температурную компенсацию (механическую или с помощью соответствующего программного обеспечения). Когда барометры используются в более широком диапазоне температур по сравнению с обычной температурой в помещении, они должны быть откалиброваны или испытаны при нескольких температурах, чтобы давать правильные показания для данного конкретного диапазона;
- f) калибровку следует проводить при стабильной температуре окружающей среды с точностью ± 1 °C. Эта температура должна быть репрезентативной для диапазона, используемого в эксплуатационных условиях, и обычно она варьируется в пределах от 18 °C до 28 °C. Температуру следует регистрировать;

- г) обычно калибровка метеорологических приборов для измерения давления выполняется в режиме абсолютного давления, поэтому плотность воздуха не оказывает влияния. Если плотность воздуха влияет на результат калибровки, необходимо регистрировать не только температуру окружающей среды, но и атмосферное давление и относительную влажность;
- h) на рабочем месте должен быть порядок, и оно должно содержаться в чистоте.

3.6.2.2 **Лабораторные эталонные приборы**

Эталонный прибор должен иметь прослеживаемость к национальным или международным эталонам, а его погрешность должна быть лучше, чем у калибруемого прибора. Отношение погрешности калибруемого прибора к погрешности эталонного должно составлять не менее двух, если это практически возможно.

3.6.2.2.1 **Контроллер давления с встроенным контрольным манометром**

Контроллеры давления могут применяться в качестве рабочих эталонов, но только если погрешность измерений находится в требуемых пределах и прослеживается до СИ (WMO, 2010). Эти контроллеры работают в режиме абсолютного давления. Предварительно выбранное давление создается за счет подачи газа, вакуумного насоса и клапанов. Встроенный манометр используется в качестве ориентира и для регулирования давления. Тестируемые устройства подключаются напрямую или через напорный шланг. Может возникнуть небольшое смещение, поэтому контроллер давления необходимо регулярно калибровать повторно. В лабораторию калибровки следует отправлять либо весь контроллер давления, либо только его встроенный контрольный манометр, который можно отсоединить. Возможно добиться погрешности лучше 0,1 гПа.

3.6.2.2.2 **Контроллер давления с внешним контрольным манометром**

В этом случае внутренний контроллер давления имеет пониженную точность или не может быть откалиброван, чтобы иметь прослеживаемость до СИ. В качестве рабочего эталона используется внешний прецизионный манометр. Он подключается к тестируемому устройству параллельно. Внешний контрольный манометр проще обслуживать и калибровать, чем встроенный. Может быть достигнута погрешность лучше 0,05 гПа.

К примерам таких внешних контрольных манометров с высокой стабильностью (менее 0,1 гПа за 10 лет), отличной температурной компенсацией (лучше $0,001 \text{ гПа K}^{-1}$) и без гистерезиса обычно можно отнести высокоточные электрические цифровые барометры на основе технологии, описанной в п. 3.2. Эти типы эталонных барометров высокоэффективны, поскольку их можно использовать в условиях автоматической калибровки, для которой требуется лишь ограниченное вмешательство со стороны персонала. Несмотря на высокую стабильность, рекомендуется ежегодно калибровать этот контрольный манометр с помощью оборудования, отслеживаемого до СИ.

3.6.2.2.3 **Поршневые манометры**

Поршневой манометр представляет собой абсолютный эталон и обеспечивает минимально возможную погрешность и максимальную стабильность. Благодаря сверхнизкому дрейфу повторную калибровку рекомендуется проводить через пять лет. Погрешность составляет около 0,05 гПа или менее. Хотя они являются абсолютными эталонами, их часто используют также в качестве рабочих эталонов.

Существует два принципа, основанных на системе поршень-цилиндр из карбида вольфрама. Эффективная площадь поршня определяется аккредитованной

лабораторией калибровки или НМУ. Температура измеряется с помощью ПТС, и изменение эффективной площади из-за изменения температуры постоянно рассчитывается контроллером поршневого манометра.

В цилиндре поршню придается вращение с помощью двигателя. Поверхность поршня и цилиндра ультрагладкая, очищенная, и между ними нет смазки, кроме молекул используемого газа.

В любом случае необходим дополнительный контроллер давления, поэтому вложения будут самыми высокими.

В режиме абсолютного давления для обеих систем необходимы встроенные вакуумметры. В связи с относительной сложностью калибровки этих вакуумметров рекомендуется использовать внешние вакуумметры. В большинстве случаев вакуумным манометрам присуща проблема дрейфа, поэтому интервалы калибровки будут короче, чем интервал калибровки самого поршневого манометра. Необходимо учитывать погрешность вакуумметра.

Поршневые манометры с динамометрическим манометром

Предустановленное давление создается контроллером давления. Поршневой манометр и тестируемые устройства подключаются параллельно через напорный шланг. Создаваемое давление действует на поршень, который соединен с динамометром, измеряющим силу. В области вокруг динамометра создается вакуум, поэтому существует лишь очень небольшая сила, обусловленная остаточным газом.

Давление рассчитывается при известной скорректированной по температуре эффективной площади и измеренной силе. Вакуум измеряется с помощью вакуумметра. Остаточное давление необходимо учитывать с помощью контроллера поршневого манометра.

Регулярные регулировки нулевой отметки динамометра и градиента выполняются с помощью прецизионных грузов, калибруемых аккредитованной лабораторией калибровки или НМУ.

Поршневые манометры с нагруженным поршнем

Абсолютный эталон такого типа не измеряет давление. Его поршень нагружается грузами, которые калибруются аккредитованной лабораторией калибровки или НМУ. Благодаря отсутствию динамометра манометр такого типа представляет собой базовый манометр с минимально возможной погрешностью. Он непосредственно прослеживается до единиц массы, длины, температуры и времени СИ.

Давление создается известной массой поршня и грузов, местной силой тяжести и скорректированной по температуре эффективной площадью (A на рисунке 3.1), и определяется его значение. Для определения погрешности измерения, помимо других составляющих общей оценки погрешности, должна быть известна погрешность этих трех компонентов. Особое внимание следует уделять местной силе тяжести и связанной с ней погрешности. Необходимо, чтобы такая местная сила тяжести (в месте размещения эталона) определялась квалифицированным персоналом или аккредитованными службами. Обратите внимание, что здание, в котором будет применяться эталон, будет влиять на местную силу тяжести. См. также приложение 3.В об использовании гравиметров.

Для поднятия грузов необходим контроллер давления. На определенной высоте поршень разгоняется с помощью временно подсоединяемого ремня, который приводится в движение двигателем. При определенной скорости вращения ремень отсоединяется, и двигатель останавливается. Из-за чрезвычайно низкого трения молекул азота скорость вращения будет замедляться очень медленно. В зависимости от количества грузов вращение может продолжаться до получаса.

Если поршень вращается, высота поршня незначительно изменяется. Чтобы вернуть поршень на определенную высоту, контроллер давления регулирует давление в области ниже поршня. Затем регулятор контроллер отключается, и его клапаны закрываются. Давление в зоне под поршнем и подсоединенным напорным шлангом создается вращающимся и очень медленно опускающимся поршнем (рис. 3.2).

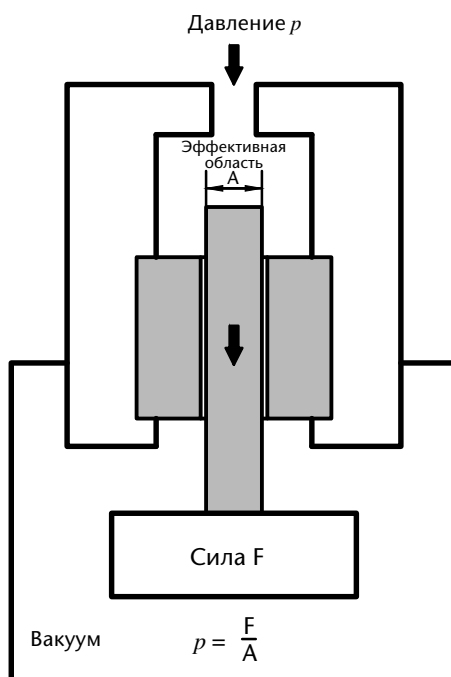


Рисунок 3.1. Поршневой манометр с динамометром

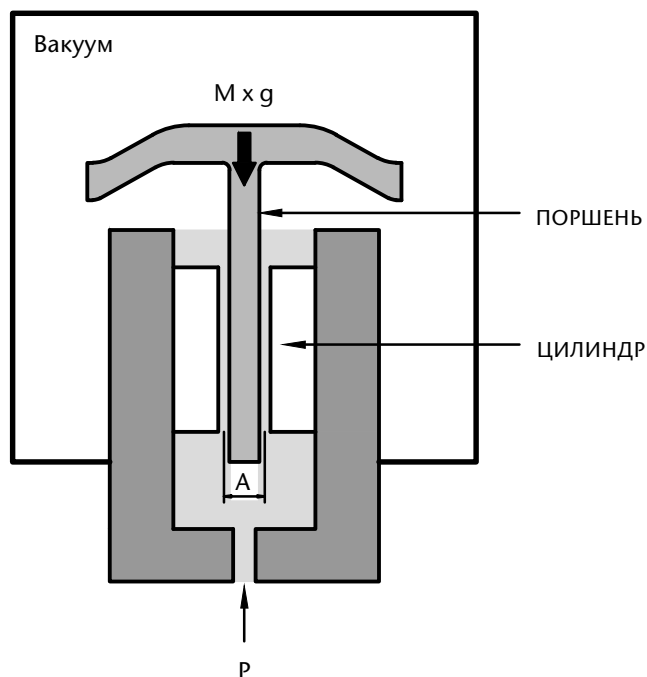


Рисунок 3.2. Нагруженный поршневой манометр

Область над системой поршень-цилиндр закрыта стеклянным колоколом. Давление в колоколе откачивается с помощью мощного вакуумного насоса. Вакуум измеряется с помощью вакуумметра. Остаточное давление необходимо учитывать с помощью контроллера поршневого манометра.

Недостатком поршневых манометров является необходимость замены грузов. Для их замены необходимо создать давление в вакуумированной области и снять стеклянный колокол. После повторной установки стеклянного колокола необходимо снова откачать воздух из этой области. Работа с поршневыми манометрами требует очень больших временных затрат, но для некоторых типов поршневых манометров имеется автоматическая система работы с массой. Обратите внимание, что только хорошо обученные сотрудники могут применять этот метод.

3.6.2.3 **Метод калибровки**

Для достижения требуемой расширенной погрешности измерений необходимо провести комплексную процедуру калибровки. Для этого имеется несколько руководств. Ниже описывается проверенная процедура, которая обычно используется в аккредитованных лабораториях. С ее помощью можно оценить линейность, воспроизводимость и обратимость.

Для калибровки может быть выбран диапазон давления либо от 0 % до 100 % полной шкалы прибора, либо этот интервал может быть уменьшен с учетом потребностей клиента (например, диапазон, ожидаемый во время эксплуатации, такой как 850-1050 гПа). На рисунке 3.3 показан общий процесс калибровки.

Процесс калибровки начинается с получения максимальной и минимальной точек калибровки, что делается последовательно, три раза. Время предварительной загрузки при самом высоком значении и время между двумя предварительными загрузками должно составлять не менее 30 секунд. Изменение давления должно произойти за 30 секунд, а время выдержки должно составлять не менее 120 секунд.

Затем следует провести калибровку в точках калибровки, равномерно распределенных по диапазону калибровки. Необходимо провести цикл измерений, каждое из которых состоит из серии повышений давления и серии понижений давления. Количество точек в серии не должно быть меньше девяти. Время между двумя последовательными шагами нагрузки должно быть одинаковым и не короче 30 секунд. В каждой точке калибровки время ожидания, в течение которого достигается устойчивое состояние, должно составлять не менее 120 секунд.

Процедура А

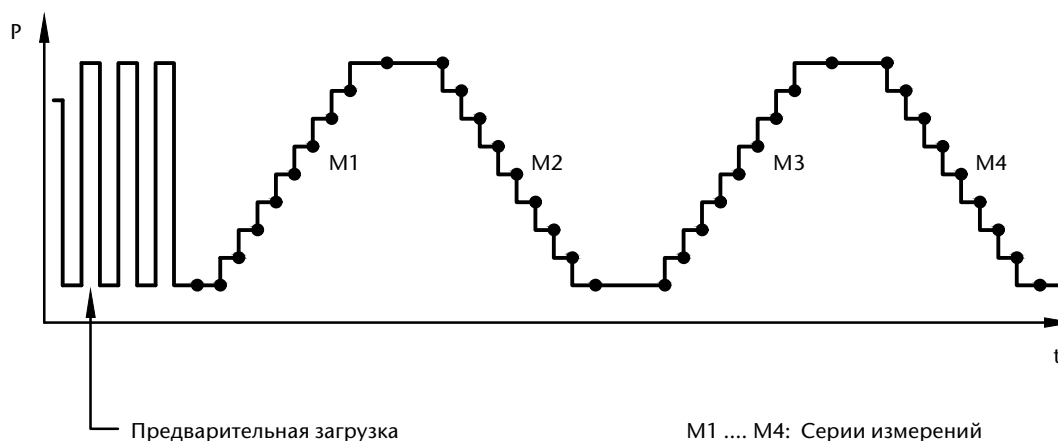


Рисунок 3.3. Процедура калибровки

В течение всей процедуры крепление и соединения не должны меняться.

Для манометров абсолютного давления, таких как барометры, определение отклонения от нулевой отметки обычно опускается и, следовательно, не выполняется корректировка нулевой отметки.

3.6.2.3.1 Расчет повторяемости

Повторяемость рассчитывается по разнице между отклонениями, измеренными в соответствующей серии измерений. Индекс j обозначает номинальную точку давления.

$$b_{up,j} = |\Delta p_{3,j} - \Delta p_{1,j}|$$

$$b_{down,j} = |\Delta p_{4,j} - \Delta p_{2,j}|$$

$$b_{mean,j} = \max\{b_{up,j}, b_{down,j}\}$$

Повторяемость должна учитываться при расчете погрешности.

Пример:

Эталон (гПа)	Δp в серии 1 (гПа)	Δp в серии 2 (гПа)	Δp в серии 3 (гПа)	Δp в серии 4 (гПа)
996,371	-0,002	0,008	0,001	0,007

$$b_{up,j} = |0,001 \text{ hPa} - (-0,002 \text{ hPa})| = 0,003 \text{ hPa}$$

$$b_{down,j} = |0,007 \text{ hPa} - 0,008 \text{ hPa}| = 0,001 \text{ hPa}$$

$$b_{mean,j} = \max\{0,003 \text{ hPa}, 0,001 \text{ hPa}\} = 0,003 \text{ hPa}$$

3.6.2.3.2 Расчет обратимости (гистерезиса)

Обратимость (гистерезис) рассчитывается по разнице между соответствующими отклонениями выходных значений, измеренных при повышении и понижении давления.

$$h_{mean,j} = \frac{1}{4} \{ |\Delta p_{2,j} - \Delta p_{1,j}| + |\Delta p_{4,j} - \Delta p_{3,j}| \}$$

Обратимость необходимо учитывать при расчете погрешности.

Пример:

Эталон (гПа)	Δp в серии 1 (гПа)	Δp в серии 2 (гПа)	Δp в серии 3 (гПа)	Δp в серии 4 (гПа)
996,371	-0,002	0,008	0,001	0,007

$$h_{mean,j} = \frac{1}{4} \{ |0,008 \text{ hPa} - (-0,002 \text{ hPa})| + |0,007 \text{ hPa} - 0,001 \text{ hPa}| \} = 0,004 \text{ hPa}$$

3.6.3 Инспекции в полевых условиях

Во время инспекции в полевых условиях необходимо провести сравнение с переносным эталоном. Это сравнение не является калибровкой, так как в большинстве случаев

выполняется только сравнение в одной точке при фактическом атмосферном давлении. Таким образом, эти проверки могут лишь указать на правдоподобность показаний прибора на месте.

Для инспекций в полевых условиях в качестве переносного эталона следует использовать мобильный электронный манометр, желательно с несколькими датчиками давления (см. п. 3.2). При соответствующей температурной компенсации может быть достигнута погрешность 0,1 гПа или менее. Имеются приборы с перезаряжаемыми батареями, а значения от внутренних датчиков могут отображаться отдельно или в виде среднего значения. Перед проведением сравнения прибор всегда должен быть акклиматизирован к условиям окружающей среды.

Инспекции в полевых условиях следует проводить в погодных условиях с малым градиентом изменения, при стабильном атмосферном давлении и низкой скорости ветра.

Оборудование для инспекций в полевых условиях должно быть откалибровано в аккредитованной лаборатории калибровки, предпочтительно до и после использования в полевых условиях или через соответствующие интервалы калибровки, в зависимости от дрейфа оборудования.

3.7 ПРИВЕДЕНИЕ ПОКАЗАНИЙ БАРОМЕТРА К ЭТАЛОННОМУ И ДРУГИМ УРОВНЯМ

Чтобы сравнить показания барометров различных станций, расположенных на разных высотах, необходимо привести эти показания к одному и тому же уровню. Хотя для этого используются различные методы, ВМО рекомендован стандартный метод, описанный в следующих параграфах.

Более подробно рекомендуемый метод описывается в публикациях ВМО (WMO, 1954, 1964, 1968). В работе ВМО (WMO, 1966) содержится комплексный набор таблиц и формул, которые используются для расчетов, связанных с давлением.

3.7.1 Стандартные уровни

На всех станциях, где это можно сделать с приемлемой точностью, наблюдаемое атмосферное давление должно быть приведено к СУМ (см. настоящий том, глава 1). Если это невозможно, станция должна, по региональному соглашению, сообщить либо геопотенциал согласованного «уровня постоянного давления», либо давление, приведенное к установленному для этой станции исходному уровню. Уровень, выбранный для каждой станции, должен быть сообщаться в Секретариат ВМО для опубликования (т. е. посредством Инструмента анализа и обзора возможностей систем наблюдений ВМО (ОСКАР)/Поверхность, <https://oscar.wmo.int/surface>).

3.7.2 Общая формула приведения

Формула для приведения давления к среднему уровню моря рекомендована для станций, расположенных на высотах ниже 750 м (из публикации ВМО, 1964, стр. 22, уравнение 2):

$$\log_{10} \frac{p_0}{p_s} = \frac{K_p \cdot H_p}{T_{mv}} = \frac{K_p \cdot H_p}{T_s + \frac{a \cdot H_p}{2} + e_s \cdot C_h} \quad (3.1)$$

где p_0 — давление, приведенное к уровню моря в гПа; p_s — давление на уровне станции в гПа; K_p — константа = 0,0148275 К/гп. м⁻¹; H_p — высота станции в гп. м; T_{mv} — средняя виртуальная температура условного столба воздуха ниже уровня станции в К, ($T_{mv} = T_s + (a \cdot H_p)/2 + e_s \cdot C_h$); T_s — температура на станции в К, $T_s = 273,15 + t$;

t — температура на станции в °C; a — принятый градиент в условном столбе воздуха от уровня моря до высоты станции = 0,0065 К гп. м⁻¹; e_s — парциальное давление на станции в гПа; C_h — коэффициент = 0,12 К гПа⁻¹.

Эта же формула часто используется в экспоненциальном виде:

$$p_0 = p_s \cdot \exp \left(\frac{\frac{g_n \cdot H_p}{R}}{T_s + \frac{a \cdot H_p}{2} + e_s \cdot C_h} \right) \quad (3.2)$$

где g_n — стандартное гравитационное ускорение = 9,80665 м с⁻²; R — газовая постоянная сухого воздуха = 287,05 Дж кг⁻¹ К⁻¹.

3.7.3 **Формула приведения для станций, расположенных на небольшой высоте**

На станциях, расположенных на небольшой высоте (а именно, на станциях, расположенных на высоте менее 50 м над СУМ), отсчеты давления должны приводиться к СУМ посредством прибавления к давлению на станции константы приведения C , рассчитываемой по следующей формуле:

$$C = p \cdot H_p / (29,27 T_v) \quad (3.3)$$

где p — наблюдаемое давление на станции в гектопаскалях; H_p — высота станции в метрах; и T_v — среднегодовое нормальное значение виртуальной температуры на станции в К.

Примечание: виртуальная температура влажного воздуха — это температура, которую имел бы при данном давлении сухой воздух той же плотности, что и влажный воздух. В публикации ВМО (WMO, 1966) содержатся значения приращений виртуальных температур насыщенного воздуха при различных давлении и температуре.

Процедура приведения должна использоваться на станциях, расположенных на таких небольших высотах, для которых абсолютные экстремальные значения виртуальных температур эквивалентны T_v в приведенном уравнении; отклонение результата, обусловленное иными аппроксимациями указанного уравнения (используемого для высоты менее высоты стандартного геопотенциала и C , которая должна быть менее p), не принимается во внимание при сравнении.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3.А. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ РТУТНЫХ БАРОМЕТРОВ

Как указано в п. 3.1.4.5, ртутные барометры больше не рекомендуются к использованию. Причины, по которым следует отказаться от их применения, заключаются в следующем: пары ртути являются высокотоксичными; ртуть в чистом виде агрессивна для алюминиевых сплавов, используемых в каркасе; для трубки необходимо специальное свинцовое стекло; барометр является очень хрупким и трудным для транспортировки; трудно осуществлять техобслуживание прибора и очищать ртуть; считывание показаний прибора и применение поправок необходимо производить вручную; в настоящее время общедоступными являются другие барометры эквивалентной точности и стабильности с электронным считыванием показаний.

Это приложение сохранено исключительно для информационных целей.

1. ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ И ШКАЛЫ

Некоторые барометры проградуированы в «миллиметрах или дюймах ртутного столба при стандартных условиях» — (мм рт. ст.)_n и (дюймы рт. ст.)_n соответственно. В тех случаях, когда из контекста ясно, что должны применяться стандартные условия, можно использовать более краткие термины — «миллиметр ртути» или «дюйм ртути». В стандартных условиях столб ртути, имеющий действительную высоту шкалы 760 (мм рт. ст.)_n, оказывает давление 1 013,250 гПа.

Далее будут применяться следующие формулы перевода:

$$\begin{aligned} 1 \text{ гПа} &= 0,750062 \text{ (мм рт. ст.)}_n \\ 1 \text{ (мм рт. ст.)}_n &= 1,333224 \text{ гПа} \end{aligned}$$

При обычной зависимости между дюймом и миллиметром, а именно 1 дюйм = 25,4 мм, получают следующие переводные множители:

$$\begin{aligned} 1 \text{ гПа} &= 0,029530 \text{ (дюйма рт. ст.)}_n \\ 1 \text{ (дюйм рт. ст.)}_n &= 33,8639 \text{ гПа} \\ 1 \text{ (мм рт. ст.)}_n &= 0,03937008 \text{ (дюйма рт. ст.)}_n \end{aligned}$$

Шкалы ртутных барометров, применяемых для метеорологических целей, должны быть проградуированы таким образом, чтобы получать истинные значения давления непосредственно в стандартных единицах, когда весь прибор находится при стандартной температуре 0 °C, а стандартное значение ускорения силы тяжести составляет 9,80665 м·с⁻².

Барометры могут иметь несколько шкал, например, гПа и мм рт. ст. или гПа и дюймы рт. ст., при условии, что барометр правильно откалиброван, скорректирован и скомпенсирован для использования при стандартных условиях.

2. ТРЕБОВАНИЯ К РТУТНЫМ БАРОМЕТРАМ

2.1 Требования к конструкции

Основным принципом работы ртутного барометра является уравнивание давления атмосферы весом столба ртути. В некоторых барометрах столб ртути взвешивается на весах, но для обычных метеорологических целей высота ртутного столба определяется по шкале, проградуированной в единицах давления.

На метеорологических станциях используется несколько типов ртутных барометров, при этом наиболее распространенными являются чашечные барометры и барометры Фортеня. Высота ртутного столба измеряется в них как расстояние между верхней точкой ртутного столба и поверхностью ртути в чашке. Любое изменение высоты ртутного столба сопровождается изменением уровня ртути в чашке. В барометре Фортеня уровень ртути в чашке может быть отрегулирован по контакту с указателем, конец которого находится на нулевой отметке шкалы барометра. В чашечном барометре, часто называемом барометром Кью, ртуть в чашке не регулируется, поэтому шкала барометра нелинейная и нанесена с учетом изменения уровня ртути в чашке.

2.2 Общие требования

Основные требования к хорошим ртутным станционным барометрам состоят в следующем:

- a) их точность не должна изменяться в течение длительного времени. В частности, их гистерезис должен быть незначительным;
- b) отсчет по барометру должен быть легким и быстрым и должен корректироваться поправками на все известные воздействия. Наблюдатели, использующие эти поправки, должны понимать их значение с тем, чтобы правильно их применять и не ухудшать точность отсчетов;
- c) при транспортировке барометры не должны терять свою точность;
- d) внутренний диаметр трубки барометра должен быть не менее 7 мм, но предпочтительнее 9 мм;
- e) трубка должна быть подготовлена и наполнена в вакууме. Важное значение имеет чистота ртути. Она должна быть дважды дистиллирована, обезжирена, многократно промыта и отфильтрована;
- f) температура, при которой предполагается, что шкала дает правильные значения при стандартной силе тяжести, должна быть нанесена на барометре. Желательно, чтобы шкала была откалибрована так, чтобы давать правильные значения при 0 °C;
- g) мениск не должен быть плоским, за исключением случаев, когда диаметр трубки большой (более 20 мм);
- h) для морских барометров погрешность в любой точке шкалы не должна превышать 0,5 гПа.

Инерция ртутных барометров для наземных станций, как правило, достаточно низкая по сравнению с инерцией морских барометров и приборов для измерения температуры, влажности и ветра.

2.3 Размещение ртутных барометров

Общие требования к размещению ртутных барометров изложены в предыдущих разделах. Кроме уже упомянутых требований к размещению ртутных барометров, имеются также дополнительные требования. Всегда предпочтительнее, чтобы ртутный барометр висел на внутренней части стены. Для очень точной работы лучшим является размещение в закрытом и не обогреваемом шкафчике с небольшим электрическим вентилятором, предотвращающим любую стратификацию температуры.

Для получения однородного освещения при снятии показаний барометра рекомендуется использовать искусственное освещение для всех наблюдений. Для этой цели годится осветитель, который может обеспечивать светлый и слегка светящийся фон для ртутного мениска и, если необходимо, для начальной точки отсчёта. Если источник света не используется, то следует уделять особое внимание тому, чтобы мениск и начальная точка имели светлый фон, для чего можно использовать такие средства, как кусочки матового стекла, белого целлулоида или кусок белой бумаги. Искусственное освещение должно быть обеспечено также при отсчетах по шкале барометра и термометру-атташе. Однако необходимо принять меры против нагревания барометра от искусственного света при снятии отсчетов.

Барометр должен быть установлен в таком месте, где нет вибрации, желательно на твердой стене. Прибор должен быть установлен вертикально. Ошибки за счет отклонения от вертикального положения чаще возникают у несимметричных барометров. Такие барометры должны устанавливаться с учетом вертикальности их наибольшей оси. Это можно обеспечить такой установкой барометра, при которой правильное положение поверхности ртути по отношению к начальной точке остается точным даже после отклонения прибора от вертикали.

Для защиты барометра от неосторожного обращения, пыли и воздушных порывов прибор рекомендуется поместить в шкафчик с навесной дверцей и обеспечить достаточную вентиляцию, предотвращающую стратификацию воздуха внутри.

При транспортировке ртутного барометра следует проявлять большую осторожность. Самым надежным способом является перевозка барометра вверх чашкой в деревянном ящике с ремнем. Если барометр не может сопровождаться ответственным лицом, то он должен перевозиться в удобной таре, снабженной пружинами, в таком положении, чтобы его чашка всегда была вверх. Барометр не должен подвергаться резким толчкам, и переворачивать его необходимо очень медленно. При переворачивании некоторых типов барометров должна соблюдаться особая предосторожность.

3. ИЗМЕРЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ РТУТНЫХ БАРОМЕТРОВ

3.1 Стандартные условия

Принимая во внимание, что высота ртутного столба барометра зависит, кроме атмосферного давления, от других факторов, особенно от температуры и силы тяжести, необходимо определить стандартные условия, при которых барометр теоретически должен давать правильные показания. В международных соглашениях по барометрам предусматриваются следующие стандарты.

3.1.1 *Стандартная температура и плотность ртути*

Стандартной температурой является значение 0 °C, к которому приводятся отсчеты ртутных барометров с целью предотвращения погрешностей, связанных с изменением плотности ртути в зависимости от температуры.

Стандартная плотность ртути при 0 °С берется равной $1,35951 \cdot 10^4 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, а для целей расчета абсолютных значений давления с помощью гидростатического уравнения ртутный столб барометра условно рассматривается как несжимаемая жидкость.

Плотность неочищенной ртути отличается от плотности ртути очищенной. Поэтому барометр, в котором используется неочищенная ртуть, будет показывать ошибочные значения давления, поскольку давление пропорционально плотности ртути.

3.1.2 **Стандартная сила тяжести**

Показания барометра должны приводиться от ускорения силы тяжести в данном месте к стандартному (нормальному) ускорению. Стандартное ускорение силы тяжести (g_n) обычно является константой, $g_n = 9,806\,65 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$.

Примечание: необходимость принятия некоторого стандартного значения ускорения силы тяжести объясняется в публикации ВМО (WMO, 1966). Это значение не соответствует истинному значению, измеренному или теоретически рассчитанному в конкретных условиях, например, на уровне моря на широте 45°, поскольку такие величины уточняются по мере появления новых экспериментальных данных.

3.2 **Отсчет показаний ртутных барометров**

При наблюдении давления с помощью ртутного барометра вначале следует отсчитать показания укрепленного термометра. Это следует сделать как можно быстрее, так как из-за присутствия наблюдателя температура термометра может повыситься. Для того чтобы поверхности ртути стабилизировались, следует легко постучать несколько раз пальцем в двух местах: в районе мениска и около чашки. Если барометр принадлежит к типу приборов с незакрепленной чашкой, то его следует отрегулировать так, чтобы привести ртуть в чашке в соприкосновение с риской нулевого отсчета. И, наконец, следует установить нониус барометра на мениске ртути, после чего можно снять показания. Нониус считается точно установленным, когда его горизонтальный нижний край касается самой высокой части мениска; при использовании увеличительного стекла должна быть видна чрезвычайно узкая полоса света между нониусом и вершиной поверхности ртути. В любом случае нониус не должен «срезать» верхнюю часть мениска. Глаз наблюдателя нужно располагать таким образом, чтобы нижние края нониуса, ближний и дальний, находились на одном уровне зрения.

3.2.1 **Точность отсчета показаний**

Отсчеты должны производиться с точностью до ближайшей 0,1 гПа. Обычно невозможно снять показания нониуса с лучшей точностью.

Для улучшения отсчетов по ртутным барометрам разработаны оптические и цифровые системы. Хотя эти системы обычно облегчают наблюдения, они могут вызвать новые источники ошибок, если они не спроектированы и откалиброваны тщательным образом.

3.2.2 **Изменение в инструментальной поправке**

Любое изменение значения инструментальной поправки, выявленное во время инспекции, следует тщательно проанализировать, учитывая следующее:

- a) историю барометра;
- b) опыт инспектора в работе по сравнениям;
- c) величину выявленного изменения;

- d) стандартное отклонение вычисленных разностей;
- e) наличие запасного барометра на станции, точность поправки которого известна;
- f) поведение переносных стандартных барометров во время перевозки;
- g) согласованность или несогласованность значений давления на станции и на соседних станциях, определяемых по ежедневной синоптической карте, в случае принятия изменения;
- h) был ли прибор почищен до начала сравнений.

Изменения в инструментальной поправке стационарных барометров, называемые отклонением, вызываются следующими причинами:

- a) изменениями капиллярной депрессии поверхности ртути вследствие ее загрязнения. В районах с сильным загрязнением атмосферного воздуха от промышленных источников загрязнение ртути может представлять серьезную проблему, связанную с необходимостью сравнительно частой очистки ртути и чашки барометра;
- b) подъемом воздушных пузырьков через ртутный столб в пространство выше столба.

Ошибки могут быть случайными или систематическими — положительными или отрицательными в зависимости от причины.

Изменения инструментальной поправки могут быть обусловлены также следующими причинами:

- a) ошибкой наблюдателя, вызванной тем, что наблюдатель не постучал пальцем по барометру перед снятием показаний, неправильно установил нониус или точку отсчета;
- b) отсутствием температурного равновесия у стационарного барометра или у переносного эталона;
- c) неодновременностью снятия показаний при быстро изменяющемся давлении.

В барометрах типа Фортеня такие погрешности могут вызываться случайным смещением регулируемой шкалы, а также уменьшением или увеличением расстояния между опорными точками.

3.2.3 ***Допустимые изменения в инструментальной поправке***

Изменения в инструментальной поправке следует воспринимать следующим образом:

- a) изменение поправки в пределах 0,1 гПа может не приниматься в расчет, если оно непостоянно;
- b) изменение поправки более чем на 0,1 гПа, но менее чем на 0,3 гПа можно принять временно, до следующей поверки, уточняющей выявленные изменения;
- c) изменение поправки, превышающее 0,3 гПа, можно временно принять, если барометр находился в чистке, а запасной барометр с известной поправкой не был задействован; этот барометр должен заменяться сразу же, как только появляется правильно откалиброванный барометр.

Барометры с изменениями в инструментальной поправке, определяемыми в пунктах (b) и (c) выше, требуют особого внимания. Они должны быть вновь откалиброваны или заменены при первой же возможности.

Наряду со стационарными барометрами такие же критерии изменений в инструментальной поправке относятся и к переносным эталонам. Изменение в поправке менее 0,1 гПа можно не принимать во внимание, если оно не является постоянным. Более значительное изменение в поправке должно подтверждаться и приниматься только после неоднократных сравнений. Инструментальные поправки переносного эталона «до» и «после» перемещения не должны различаться более чем на 0,1 гПа. Поэтому в качестве переносных эталонов должны использоваться только барометры с длительной историей соответствующих поправок.

3.3 **Приведение показаний барометра к стандартным условиям**

Для того чтобы показания барометра, снимаемые в различные сроки и в разных местах, перевести в действительные значения атмосферного давления, следует внести следующие поправки:

- a) инструментальную поправку;
- b) поправку на силу тяжести;
- c) поправку на температуру.

Для большинства оперативных метеорологических применений можно получить приемлемые результаты, следуя инструкциям изготовителя барометра, при условии, что эти процедуры обеспечивают получение показаний давления с требуемой погрешностью. Однако если эти результаты не удовлетворяют потребителя или требуется получить более высокую точность, то подробные процедуры, в соответствии с которыми следует вносить поправки на вышеуказанные факторы, можно найти в приложении 3.B.

3.4 **Ошибки и погрешности ртутных барометров**

3.4.1 **Неточности в температуре прибора**

Температура, определяемая по термометру при барометре, как правило, не соответствует средней температуре ртути, шкалы и чашки. Возникающую вследствие этого погрешность можно уменьшить, если разместить барометр в подходящем месте и использовать соответствующую процедуру наблюдения. Обращается внимание на частое возникновение значительного устойчивого вертикального градиента температуры в помещении, которое может вызывать значительные различия в температуре верхней и нижней частей барометра. Такого распределения температуры можно избежать с помощью электрического вентилятора, однако при этом существует опасность изменения местного давления. Вентилятор следует выключать перед началом наблюдения. При обычных условиях погрешность, связанная с уменьшением температуры, не превышает 0,1 гПа, если приняты такие меры предосторожности.

3.4.2 **Недостаточный вакуум**

Обычно предполагается, что внутри откалиброванного прибора имеется идеальный вакуум или незначительное количество газа над ртутным столбом, которым можно пренебречь при проведении калибровки. Любое изменение этих условий вызовет погрешность отсчетов давления. Грубую проверку на присутствие газа в трубке барометра можно провести, опрокинув барометр и прослушав щелчок, когда ртуть достигнет конца трубки, или проверяя запаянный конец барометрической трубки на наличие пузырька,

диаметр которого при наклонном положении барометра не должен превышать 1,5 мм. Таким способом нельзя обнаружить наличие водяного пара, поскольку он конденсируется, когда объем пространства уменьшается. Согласно закону Бойля, погрешность из-за наличия воздуха и ненасыщенного водяного пара над столбиком ртути будет обратно пропорциональна объему пространства над ртутью. Единственным приемлемым путем преодоления этой погрешности является повторная калибровка всей шкалы или, если погрешность значительна, трубку барометра следует заменить или наполнить вновь.

3.4.3 ***Капиллярная депрессия поверхности ртути***

В конкретной трубке высота мениска и капиллярная депрессия¹ могут изменяться из-за изнашивания стеклянной трубки, загрязнения ртути, колебаний давления и положения ртути в трубке. Желательно, чтобы средняя высота мениска определялась во время первой калибровки и отмечалась в сертификате барометра. При отклонении высоты мениска от первоначальной никаких исправлений делать не следует, а эту информацию нужно использовать только как указание о необходимости тщательной проверки или повторной калибровки барометра. Изменение высоты мениска на 1 мм (от 1,8 до 0,8 мм) для 8-миллиметровой трубки может вызвать погрешность в отсчетах давления около 0,5 гПа.

Следует отметить, что значительные изменения угла соприкосновения ртути и стенки чашки в чашечном барометре могут вызвать небольшие, но заметные погрешности при измерении давления.

3.4.4 ***Нарушение вертикальности***

Если основание свободно подвешенного чашечного барометра обычной длины (около 90 см) переместится на 6 мм от вертикального положения, то определяемое давление повысится примерно на 0,02 гПа. Такие барометры, как правило, висят более вертикально, чем сифонно-чашечные.

Для сифонно-чашечного барометра этот источник погрешностей, однако, является более важным. Если, например, указатель исходной точки в чашке отклонен от оси примерно на 12 мм, то перемещение чашки только на 1 мм от вертикали вызовет погрешность в 0,02 гПа.

3.4.5 ***Общая точность исправленных отсчетов давления***

Стандартное отклонение отдельного исправленного показания барометра, установленного на обычной метеорологической станции, должно быть в пределах 0,1 гПа. Эта погрешность обычно является результатом неизбежной неточности инструментальной поправки, недостоверной температуры прибора и погрешности из-за наличия колебательного эффекта поверхности ртути.

4. **МЕРЫ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РТУТИ**

Ртуть используется довольно в больших количествах в барометрах и, являясь ядовитой, требует осторожного обращения. При температурах и давлениях, наблюдаемых на поверхности Земли, ртуть представляет собой жидкость. Там, где существует жидкая ртуть, в воздухе образуются пары ртути. Ртуть как в жидком, так и в газообразном состоянии может проникать в организм через кожу, а также при дыхании. Ее свойства описаны Саксом (1975). Во многих странах меры предосторожности при ее использовании предписываются

¹ Капиллярная депрессия представляет уменьшение высоты мениска жидкости, содержащейся в трубке, где жидкость (такая как ртуть) не смачивает стенки трубки. Мениск имеет выпуклую форму в верхней части.

правилами обращения с опасными веществами. Минаматская конвенция о ртути ЮНЕП вступила в силу в августе 2017 г. и оказывает значительное воздействие на использование ртути в метеорологических применениях.

В больших дозах ртуть может вызвать острое отравление; кроме того, она также может накапливаться в твердых и мягких тканях тела, поэтому воздействие в течение длительного времени даже малых доз может вызвать долгосрочные повреждения органов или даже смерть. Она поражает, главным образом, центральную нервную систему, рот и десны с такими симптомами, как боль, потеря зубов, аллергические реакции, тревоги и психические расстройства.

При применении барометров основной риск возникает в лабораториях, где барометры часто освобождаются от ртути или заполняются ею. Проблемы могут также возникнуть на метеорологических станциях, если в замкнутом помещении, где работают люди, какое-то количество ртути, например от разбитого барометра, остается в местах, где она может постоянно испаряться.

Опасность существует, даже если ртуть должным образом закрыта и если она тщательно удалена после пролива. При использовании ртути следует иметь в виду следующее:

- a) емкости, содержащие ртуть, должны быть хорошо упакованы для предотвращения утечки или разбивания и должны регулярно проверяться;
- b) пол помещения, где ртуть хранится и используется в больших количествах, должен иметь плотное непроницаемое и не растрескавшееся покрытие из материала, такого, как ПВХ. Небольшие трещины в полу, например между половыми досками, будут удерживать капли ртути. Предпочтительнее, чтобы покрывающий пол материал был загнут у стены примерно на 10 см с тем, чтобы не оставалось стыков между полом и стенами;
- c) ртуть не следует хранить в металлическом контейнере, поскольку она реагирует с большинством металлов, за исключением железа, образуя амальгаму, которая также может быть опасной. Ртуть не должна соприкасаться ни с какими другими металлическими предметами;
- d) ртуть не следует хранить вместе с другими химическими веществами, особенно с аминами, аммиаком или ацетиленом;
- e) хранить ртуть в больших количествах и работать с ней всегда следует в хорошо проветриваемом помещении. С первичным материалом следует работать в вытяжном шкафу хорошего качества;
- f) ртуть никогда не следует хранить вблизи любого источника тепла, поскольку она имеет сравнительно низкую точку кипения (357 °C) и может выделять опасные концентрации токсичного пара, особенно во время пожара;
- g) при работе с ртутью помещение, в котором она используется, и персонал, работающий с ней, должны регулярно проходить освидетельствование на определение содержания опасных количеств ртути.

В соответствии с Минаматской конвенцией импорт и экспорт ртути будут отныне запрещены. В этом контексте производство, импорт и экспорт продуктов с добавлением ртути, таких как термометры, будут приостановлены к 2020 г. Согласно Конвенции (статья 4), «ни одна Сторона не разрешает посредством принятия соответствующих мер производство, импорт или экспорт продуктов с добавлением ртути, перечисленных

в части I приложения А [Конвенции] после наступления предусмотренного для этих продуктов срока поэтапного вывода из обращения» (ЮНЕП, 2013 г.). В частности, данный перечень включает (цитата):

«перечисленные ниже неэлектронные измерительные устройства, кроме неэлектронных измерительных устройств, установленных на крупногабаритном оборудовании или используемых для высокоточного измерения, если отсутствуют приемлемые безртутные альтернативные решения:

- a) барометры;
- b) гигрометры;
- c) манометры;
- d) термометры;
- e) сфигмоманометры».

4.1 **Разливы и удаление ртути**

Существует два общепринятых метода удаления разливов ртути: с использованием соответствующей системы всасывания, описываемой ниже, или же путем адсорбции/амальгамации ртути в порошок.

В случае разлива ртуть должна удаляться незамедлительно. Наблюдатель (поверитель) должен быть в полиэтиленовых перчатках или рукавицах, иметь защитные очки, а при значительных разливах иметь также респиратор с фильтром, не пропускающим пары ртути. В зависимости от того, насколько велик разлив, ртуть вначале можно собрать с помощью вакуумной системы, а затем с помощью набора средств адсорбции для очистки от небольших капель. Использование набора средств адсорбции является обязательным, поскольку во время разлива десятки небольших капель диаметром менее 0,02 мм прилипают к поверхности, и их невозможно эффективно счистить с помощью вакуумной системы.

Во всасывающей системе ртуть поступает через пластиковую трубку небольшого диаметра в стеклянный флакон с водой, при этом отверстие трубки находится ниже уровня воды (примерно 3 см) во флаконе. Один конец пластиковой трубки более крупного диаметра помещен в воздушное пространство выше уровня воды во флаконе, а другой присоединен к пылесосу или вакуумному насосу. Вода не позволяет парам или каплям ртути поступать в пылесос или насос. Затем суспензию помещают в пластиковый контейнер с четкой надписью «На удаление».

При использовании поглощающих материалов для поглощения или амальгамации ртути можно использовать целый ряд соединений. К ним относятся цинковый или серный порошок или активированный уголь. Для ликвидации разливов ртути существуют специальные коммерческие наборы. Порошок распыляется на разлив и адсорбирует или амальгамирует ртуть. Полученный порошок сметается и помещается в пластиковый контейнер с четкой надписью «На удаление».

Собранную ртуть можно либо удалить, либо же восстановить. Более подробную информацию о том, каким образом удалять ртуть, можно получить от местных властей и/или поставщика. Поставщик может также проинформировать о способе восстановления и очистки ртути.

4.2 **Пожар**

Ртуть не горит, однако при пожаре выделяются значительные концентрации токсичных дымов. После пожара пары ртути конденсируются на ближайших холодных поверхностях, заражая большие площади, а также адсорбируются на открытых поверхностях, таких,

как обгоревшее дерево. Во время пожара следует покинуть место пожара, при этом стараться не попадать в дымные струи. Сообщить противопожарным учреждениям о местоположении и количестве имеющейся ртути.

4.3 **Транспортировка**

Транспортировка ртути или приборов, в которых содержится ртуть, воздушным транспортом регулируется Международной ассоциацией воздушного транспорта. По требованию авиакомпании предоставляют специальные условия для такой транспортировки. Транспортировка по железной дороге или автотранспортом в каждой стране обычно регулируется положением о перевозке опасных веществ.

Как правило, металлическая ртуть должна быть упакована в стеклянный или пластиковый контейнер. Упаковку контейнеров следует проводить чрезвычайно осторожно, чтобы не допустить их разрывов, и на них должны быть наклейки с четкими надписями. Приборы, содержащие ртуть, должны упаковываться в прочные коробки с амортизирующим материалом, которые являются непромокаемыми и непроницаемыми для ртути.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3.В. ПРИВЕДЕНИЕ ПОКАЗАНИЙ РТУТНОГО БАРОМЕТРА К СТАНДАРТНЫМ УСЛОВИЯМ

Инструментальная поправка

Остаточные погрешности в градуировке шкалы барометра должны быть определены путем сравнения со стандартным прибором. Они могут включать ошибки из-за неточного положения деления шкалы, капиллярности и низкого вакуума. В сертификатах с данными о сравнении со стандартным барометром должны указываться инструментальные поправки не менее чем в четырех точках шкалы, например через каждые 50 гПа. В хорошем барометре эти поправки не должны превышать несколько десятых долей гектопаскала.

Поправки на силу тяжести

Показания ртутного барометра при данном давлении и температуре зависят от значения силы тяжести, которая, в свою очередь, изменяется с широтой и высотой. Барометры для метеорологических применений градуируются так, чтобы давать правильные значения давления при стандартном ускорении силы тяжести, равном $9,806\,65\text{ м с}^{-2}$, а их отсчеты при других значениях ускорения силы тяжести должны быть исправлены. Рекомендуется следующий метод для приведения таких барометрических показаний к стандартному ускорению силы тяжести. Пусть B — наблюдаемый отсчет по ртутному барометру, B_t — отсчет по барометру, приведенный к стандартной температуре и исправленный инструментальной поправкой, но не приведенный к стандартному ускорению силы тяжести, B_n — отсчет по барометру, приведенный к стандартному ускорению силы тяжести и стандартной температуре и исправленный инструментальной поправкой, B_{ca} — климатологическое среднее B_t на станции, $g_{\varphi H}$ — местное ускорение силы тяжести (в м с^{-2}) на станции при широте φ и высоте над уровнем моря H , и g_n — стандартное ускорение силы тяжести $9,806\,65\text{ м с}^{-2}$.

Подходящими соотношениями будут следующие:

$$B_n = B_t \left(g_{\varphi H} / g_n \right) \quad (3.A.1)$$

или:

$$B_n = B_t + B_t \left[\left(g_{\varphi H} / g_n \right) - 1 \right] \quad (3.A.2)$$

Приближенное уравнение 3.A.3 можно использовать при условии, что результаты, полученные с его помощью, не отличаются более чем на 0,1 гПа от результатов, которые получены с помощью уравнения 3.A.2:

$$B_n = B_t + B_{ca} \left[\left(g_{\varphi H} / g_n \right) - 1 \right] \quad (3.A.3)$$

Местное ускорение силы тяжести $g_{\varphi H}$ должно вычисляться по процедуре, описанной в следующем разделе. Значение, полученное таким образом, соответствует Международной гравитационной стандартной системе 1971 г. (IGSN71).

Определение местного ускорения силы тяжести

Для того чтобы определить местное значение ускорения силы тяжести на станции с удовлетворительной точностью, необходимо использовать один из двух методов. Эти методы включают, в первом случае, использование гравиметра (прибора для измерения разности между значениями ускорения силы тяжести в двух точках), а во втором случае — так называемых аномалий Бугера. Предпочтение следует отдать методу с использованием гравиметра. Если нельзя применить ни один из этих методов, можно рассчитать местное значение ускорения силы тяжести, используя простую модель Земли.

Использование гравиметра

Предположим, что g_1 — известное местное ускорение силы тяжести в определенном пункте O . Обычно это установленная геодезической организацией базовая станция для измерения силы тяжести, на которой g_1 определяется в системе IGSN71. Предположим далее, что g — неизвестное местное ускорение силы тяжести в метеорологической гравитационной системе в некотором другом пункте X , для которого нужно определить значение g . Пусть Δg — разность ускорений силы тяжести в двух пунктах, определенных с помощью гравиметра. То есть Δg равно значению в пункте X минус значение в пункте O в соответствующей системе. Тогда g находится по уравнению 3.A.4:

$$g = g_1 + \Delta g \quad (3.A.4)$$

Использование аномалий Бугера

Если гравиметра нет, то для определения значения g в данной точке можно использовать проинтерполированные аномалии Бугера (A_B). Необходимо получить контурную карту этих аномалий из геодезической организации или с сети гравитационных станций, плотность расположения которых в окрестностях данного пункта составляет, по меньшей мере, одна станция на 10 000 км² (расстояние между станциями не более 100 км).

В качестве основы можно использовать гравитационную сеть с меньшей плотностью при условии, что геодезическая организация считает, что этот метод должен дать более надежные результаты по сравнению с результатами, полученными с использованием гравиметра.

Аномалии Бугера (A_B) получают из уравнения 3.A.5:

$$g_s = (g_{\varphi,0})_s - C \cdot H + A_B \quad (3.A.5)$$

где $(g_{\varphi,0})_s$ — теоретическая величина ускорения силы тяжести на широте φ на уровне моря, полученная с помощью формулы, фактически используемой для вычисления аномалии Бугера. Эта формула выражает значение как функцию широты в некоторой системе. H — высота станции (в метрах) над уровнем моря, на которой измеряется g_s , g_s — наблюдаемая величина ускорения силы тяжести (в м с⁻²), A_B — аномалия Бугера (в м с⁻²) и C — коэффициент поправки высоты, используемый при вычислении аномалии Бугера (например, при использовании удельной силы тяжести 2,67 для земной коры этот коэффициент составляет 0,000 001 968 м с⁻²).

Когда требуется значение g для данной станции, а измерить его нельзя, значение g_s следует вычислять по уравнению 3.A.5, при допущении, что соответствующее значение A_B для станции можно найти путем интерполяции на вышеупомянутых картах изолиний или получить по данным аномалий Бугера, построенным на основании измерений на гравитационной сети, как определено выше.

Вычисление местного ускорения силы тяжести

Если ни один из предыдущих методов не может быть применен, то местное значение можно вычислить менее точно, используя простую модель. В соответствии с Геодезической справочной системой 1980 г. теоретическое значение $(g_{\varphi,0})$ ускорения силы тяжести при СУМ на географической широте, φ , вычисляется с помощью уравнения 3.A.6:

$$g_{\varphi,0} = 9,806\,20 \left(1 - 0,002\,644\,2 \cos 2\varphi + 0,000\,005\,8 \cos^2 2\varphi \right) \quad (3.A.6)$$

Значение ускорения силы тяжести в данной точке поверхности суши на наземной станции вычисляется с помощью уравнения 3.A.7:

$$g = g_{\varphi,0} - 0,000\,003\,086\,H + 0,000\,001\,118(H - H') \quad (3.A.7)$$

где g — местное расчетное значение ускорения силы тяжести в м·с⁻² в данной точке;
 $g_{\varphi,0}$ — теоретическая величина ускорения силы тяжести в м·с⁻² на СУМ на географической

широте φ , вычисленная по уравнению 3.А.6 выше; H — фактическая высота данной точки в метрах над СУМ; и H' — абсолютная величина в метрах разницы между высотой данной точки и средней высотой действительной поверхности суши, заключенной в круг радиусом 150 км и с центром в данной точке.

Значение ускорения силы тяжести в данной точке при ее высоте H над СУМ не более 10 км вычисляется с помощью уравнения 3.А.8:

$$g = g_{\varphi,0} - 0,000\,003\,086\,H - 0,000\,006\,88(D - D') \quad (3.А.8)$$

где D — глубина моря в метрах ниже данной точки; и D' — средняя глубина моря в метрах в пределах круга радиусом около 150 км и с центром в данной точке.

На станциях или в точках на морском побережье местное значение ускорения силы тяжести должно рассчитываться настолько это возможно с использованием в пропорциональном отношении уравнений 3.А.7 и 3.А.8, взвешивая последний член уравнения 3.А.7 в соответствии с относительной площадью суши в пределах определенного круга, а последний член уравнения 3.А.8 в соответствии с относительной площадью моря в пределах круга. Алгебраически суммируя полученные таким образом значения, получаем поправку, которую можно применить к конечному члену правых сторон обоих уравнений так, как это показано в уравнении 3.А.9:

$$g = g_{\varphi,0} - 0,000\,003\,086\,H + 0,000\,001\,118\,\alpha \\ (H - H') - 0,000\,006\,88(1 - \alpha)(D - D') \quad (3.А.9)$$

где α — доля суши, приходящаяся на заданную площадь, а H' и D' — фактические площади суши и водной поверхности соответственно.

Поправки на температуру

Показания барометра должны быть приведены к значениям, которые можно получить, если ртуть и шкала имеют стандартную температуру. Стандартной температурой для ртутных барометров является 0 °С. В том, что касается шкал, то в некоторых барометрах шкала показывает точные значения при этой температуре, а в некоторых — точные показания получают при температуре 20 °С.

Поправка на температуру, которая требуется для барометров с регулируемой чашкой (барометры типа Фортеня), отличается от поправки, которая требуется для барометров с фиксированными чашками, хотя основные причины, связанные с необходимостью введения поправок на температуру, одинаковы для обоих типов, а именно: коэффициент объемного теплового расширения ртути отличается от коэффициента линейного теплового расширения шкалы. Таким образом, для каждого типа ртутных барометров требуется определенная поправка.

Для барометра с фиксированной чашкой требуется дополнительная поправка. Причина состоит в том, что увеличение температуры прибора вызывает увеличение, как объема ртути, так и площади поперечного сечения чашки (железной), а также трубки (стеклянной). Вследствие этих изменений площади увеличение объема ртути в результате повышения температуры будет меньше, чем если бы площади сохранялись неизменными. Это происходит вследствие того, что в результате расширения чашки и трубки некоторая часть ртути барометра стремится занять дополнительную площадь.

У барометра с фиксированной чашкой по ряду причин следует проверять градуировку шкалы, сверяя барометр с основным стандартным барометром с регулируемой чашкой. Некоторые изготовители уменьшают объем ртути на такую величину, что показания испытываемого барометра согласуются с показаниями стандартного барометра при 20 °С. Можно составить таблицу поправок для шкал барометров с фиксированными чашками, используя показания основного стандартного барометра, шкала которого является точной, когда в качестве стандартной температуры используется 20 °С.

Температурные поправки для ртутных барометров

Исследователи провели обширные изучения температурных поправок для ртутных барометров, результаты которых приведены ниже:

- 1 (a) Шкала правильная при 0 °С $C_t = -B(\alpha - \beta) \cdot t$
и дополнительно
(b) объем ртути правильный при 0 °С $C_{t,V} = -B(\alpha - \beta) \cdot t - (\alpha - 3\eta) \cdot t \cdot 4V/3A$
- 2 Шкала правильная при 0 °С и объем ртути правильный при 20 °С $C_{t,V} = -B(\alpha - \beta) \cdot t - (\alpha - 3\eta) \cdot (t - 20) \cdot 4V/3A$
- 3 (a) Шкала правильная при 20 °С $C_t = -B[\alpha \cdot t - \beta \cdot (t - 20)]$
(b) объем ртути правильный при 0 °С $C_{t,V} = -B[\alpha \cdot t - \beta \cdot (t - 20)] - (\alpha - 3\eta) \cdot t \cdot (4V/3A)$
(c) объем ртути уменьшается на величину, эквивалентную 0,36 гПа $C_{t,V} = -B(\alpha - \beta) \cdot t - (\alpha - 3\eta) \cdot t \cdot (4V/3A)$
- 4 Шкала правильная при 20 °С и
(a) объем ртути правильный при 20 °С $C_{t,V} = -B[\alpha \cdot t - \beta \cdot (t - 20)] - (\alpha - 3\eta) \cdot (t - 20) \cdot (4V/3A)$
(b) объем ртути уменьшается на величину, эквивалентную 0,36 гПа $C_{t,V} = -B(\alpha - \beta) \cdot t - (\alpha - 3\eta) \cdot (t - 20) \cdot (4V/3A)$

где:

C_t = поправка на температуру;

$C_{t,V}$ = дополнительная поправка для барометров с фиксированной чашкой;

B = снятое показание барометра;

V = общий объем ртути в барометре с фиксированной чашкой;

A = эффективная площадь поперечного сечения чашки;

t = температура;

α = объемное тепловое расширение ртути;

β = коэффициент линейного теплового расширения шкалы;

η = коэффициент линейного теплового расширения чашки.

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Всемирная метеорологическая организация, 2011 (обновлено в 2018 г.): *Наставление по кодам*. (ВМО-№ 306). Том I.1. Женева.
- , 2014: *Руководство по системам метеорологических наблюдений и распространения информации для метеорологического обслуживания авиации* (ВМО-№ 731). Женева.
- Программа ООН по окружающей среде, 2013: *Минаматская конвенция о ртути*. Женева, ООН.
- Brock, F.V. and S.J. Richardson, 2001: *Meteorological Measurement Systems*. New York, Oxford University Press.
- European Association of National Metrology Institutes, 2017: *Guidelines on the Calibration of Electromechanical and Mechanical Manometers*. Calibration Guide No. 17 (Version 3.0). Braunschweig, Germany, EURAMET.
- Liu, H. and G. Darkow, 1989: Wind effect on measured atmospheric pressure. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 6(1):5–12.
- Miksad, R., 1976: An omni-directional static pressure probe. *Journal of Applied Meteorology*, 15:1215–1225.
- Sax, N.I., 1975: *Dangerous Properties of Industrial Materials*. Van Nostrand Reinhold Co., New York.
- United States Weather Bureau, 1963: *Manual of Barometry* (WBAN). 1, US Government Printing Office, Washington DC.
- World Meteorological Organization, 1954: *Reduction of Atmospheric Pressure: Preliminary Report on Problems Involved*. Technical Note No. 7 (WMO-No. 36, TP. 12). Geneva.
- , 1964: *Note on the Standardization of Pressure Reduction Methods in the International Network of Synoptic Stations: Report of a Working Group of the Commission for Synoptic Meteorology*. Technical Note No. 61 (WMO-No. 154, TP. 74). Geneva.
- , 1966: *International Meteorological Tables* (S. Letestu, ed.) (1973 amendment). (WMO-No. 188, TP. 94). Geneva.
- , 1968: *Methods in Use for the Reduction of Atmospheric Pressure*. Technical Note No. 91 (WMO-No. 226, TP. 120). Geneva.
- , 1985: “Pressure tendency” and “discontinuity in wind” – discussion of two algorithms used in Swedish automatic weather stations (L. Bergman, T. Hovberg and H. Wibeck). Paper presented at the Third WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-III). Instruments and Observing Methods Report No. 22 (WMO/TD-No. 50). Geneva.
- , 1992: *The WMO Automatic Digital Barometer Intercomparison* (J.P. van der Meulen). Instruments and Observing Methods Report No. 46 (WMO/TD-No. 474). Geneva.
- , 2010: *Guidance on Instrumentation for Calibration Laboratories, Including Regional Instrument Centres* (D. Groselj) (WMO/TD-No. 1543). Instruments and Observing Methods Report No. 101. Geneva.
- , 2012: *A Laboratory Intercomparison of Static Pressure Heads* (E. Lanzinger and K. Schubotz). In: Papers and Posters presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECO 2012), Brussels, 16–18 October, poster P1(15). Instruments and Observing Methods Report No. 109. Geneva.
- , 2014: *Guide to Meteorological Observing and Information Distribution Systems for Aviation Weather Services* (WMO-No. 731). Geneva.
- , 2015: *Guidance on the Computation of Calibration Uncertainties* (J. Duvernoy). Instruments and Observing Methods Report No. 119. Geneva.
-