

МЭМС-ДАТЧИКИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ

АНТОН ГРИГОРЬЕВ, менеджер по развитию, «Русская Ассоциация МЭМС»,
grigorev@mems-russia.ru

Статья подготовлена на основе материалов исследований, проведенных специалистами SensorTechnics (группа компаний First Sensor). Сравнительные экспериментальные исследования проводились для того, чтобы определить уровень опасности, представляемый пылью. Установка для проведения экспериментов была спроектирована и построена таким образом, чтобы обеспечить воспроизводимые и контролируемые условия для проведения справедливого сравнительного анализа тестируемых датчиков.

ВВЕДЕНИЕ

Датчики низкого давления серии LBA с рабочими диапазонами от 25 Па позволяют вычислять перепады давления воздуха или газов путем измерения дифференциального давления от слабых (порядка нанолитров в секунду) потоков газов через воздушный канал датчика с высоким сопротивлением потоку. Преобразователь давления представляет собой термоанемометр, выполненный на основе микроэлектромеханических систем (МЭМС) и размещенный на кристалле монокристаллического кремния. Технология Rejutor (программируемые резисторы) в сочетании с КМОП обеспечивает работу интегрированной на чипе аналоговой электроники для компенсации и обработки сигнала. Принципиальная схема измерения объема воздушного потока с применением датчика дифференциального давления показана на рисунке 1.

РИСК ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПЫЛЬЮ

Когда речь идет о системах вентиляции и кондиционирования, где в

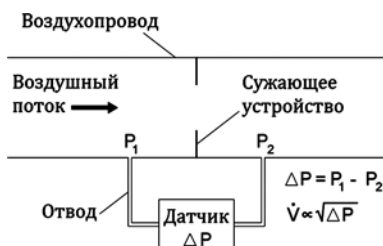


Рис. 1. Принципиальная схема измерения объема воздушного потока с применением датчика дифференциального давления

рабочем потоке воздуха могут присутствовать частицы пыли, часто возникает вопрос, может ли подобное загрязнение представлять угрозу для надежной работы расходомеров на основе термоанемометров. Поскольку использование дифференциальных датчиков давления подразумевает пропускание потока воздуха через внутренний канал, весьма вероятно, что этот поток занесет частицы пыли внутрь устройства. Таким образом, существует гипотетическая опасность следующих негативных последствий:

- изменение (увеличение) внутреннего сопротивления потоку и, следовательно, изменение (уменьшение) калиброванной чувствительности датчика, что может проявляться в виде снижения выходного напряжения датчика при каждом данном значении измеряемого дифференциала давления, а также как потеря калибровки;
- полная закупорка внутреннего канала датчика (функциональный сбой);
- осаждение пыли на чувствительные микроструктуры, составляющие измерительный элемент внутри канала датчика, что также может привести к изменению калибровки.

В общем случае наличие в измеряемых потоках воздуха пыли может представлять опасность с точки зрения надежности, однако степень этой опасности определяется показателем сопротивления потоку (пневматического импеданса), свойственным данному датчику.



**Оптоэлектронные детекторы
и датчики давления:
от пластин до законченных
изделий**



Кремниевые фотодиоды:
pin, лавинные, квадрантные,
позиционно-чувствительные



Линейные массивы
и матрицы
фотодетекторов



Кристаллы датчиков
давления: абсолютного,
относительного
и дифференциального



Модули
и преобразователи
всех видов давления



Датчики потока, уровня
и расхода для жидкостей
и газов

Индивидуальные
решения по ТЗ
заказчика



SOVTEST
ВАШ ПАРТНЕР ПО КАЧЕСТВУ

тел.: (4712) 54-54-17 8-800-200-54-17
www.sovtest.ru info@sovtest.ru

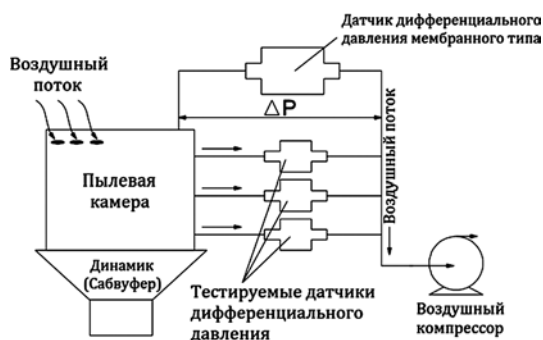


Рис. 2. Схема горизонтальной конфигурации

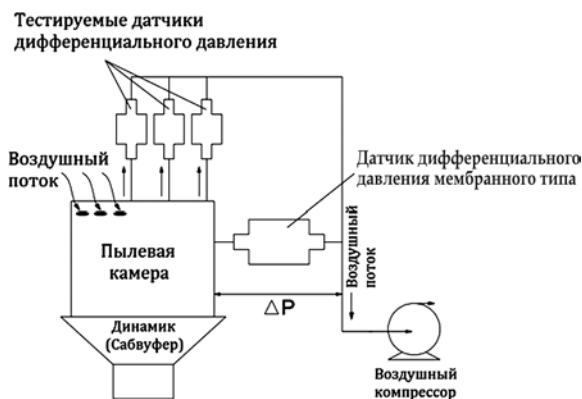


Рис. 3. Схема вертикальной конфигурации

ФАКТОРЫ РИСКА

Количество пыли и скорость движения воздуха

Количество частиц пыли, которые воздушный поток переносит ко входу датчика, зависит от объема воздуха, проходящего через датчик, и от скорости потока воздуха. Количество частиц пыли, перемещающихся во внутреннем канале датчика, зависит от количества частиц пыли, которые поступили на его входной порт, и от скорости потока воздуха в канале.

Скорость воздушного потока к датчику характеризуется другим очень важным эффектом, кроме простого влияния на объем воздуха, проходящего через датчик. Если скорость воздушного потока достаточно низка, то пыль не остается в воздухе, что еще больше повышает иммунитет датчика к загрязнению пылью. Если же скорость воздушного потока на датчик достаточно велика, то вся пыль остается во взвешенном состоянии и, как правило, ухудшает характеристики датчика при пылевом загрязнении.

Примечание: сопротивление потоку, оказываемое датчиком, напрямую влияет на скорость входящего воздушного потока. Таким образом, высокое сопротивление потоку в датчике одновременно уменьшает объем воздуха, проходящего через канал датчика, и уменьшает скорость потока, потен-

циально позволяя пыли осесть, а также уменьшая механические силы, действующие на частицы, уже присутствующие на входе датчика.

Тип и концентрация пыли

Очевидно, перенос больших и тяжелых частиц пыли через воздухопровод к датчику менее вероятен, чем малых и/или легких. Кроме того, размер частиц пыли влияет на то, сможет ли пыль физически блокировать прохождение воздуха во внутреннем проточном канале, и смогут ли частицы пыли в принципе попасть внутрь датчика.

Концентрация пыли, достигающей датчика, зависит от концентрации пыли в основном потоке газа.

Подключение датчиков к основному каналу потока

Как показано на рисунке 1, чем больше внутренний диаметр подводящего воздухопровода, тем ниже будет линейная скорость загрязненного пылью потока газа по направлению ко входу датчика. Кроме того, чем длиннее соединительные трубки, тем больше будет сопротивление потоку с их стороны, а это, в свою очередь, влияет на линейную скорость потока. Кроме того, наличие пылесборников (например, гравитационных ловушек) и пылефильтров может обеспечить определенный уровень защиты датчика от пыли.

Примечание: целью этого эксперимента является оценка и сравнение иммунитета к пылевому загрязнению непосредственно самих датчиков. Устройства и методы внешней фильтрации и прочей дополнительной защиты от пыли оставлены за рамками настоящего исследования.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПЫЛЬЮ

Для того чтобы определить уровень опасности, представляемый пылью, были проведены сравнительные экспериментальные исследования. Установка для проведения экспериментов была спроектирована и построена таким образом, чтобы обеспечить воспроизводимые и контролируемые условия для проведения справедливого сравнительного анализа тестируемых датчиков. С этой целью наборы дифференциальных датчиков, основанных на принципе термоанемометра, подвергались одинаковому перепаду давления.

В каждом эксперименте два или более датчика, зачастую имевших различные сопротивления потоку, были соединены параллельно так, что общий перепад давления оказывал одинаковое влияние на все датчики.

ПЫЛЬ, ПРИМЕНЯЕМАЯ В ИСПЫТАНИЯХ

Источник пыли в воздухе был подключен ко входящему порту датчика. Использовался коммерческий образец тестовой пыли «Тонкодисперсная тестовая пыль категории А2 в соответствии с ISO 12103-1». Размер частиц у продукта варьировался в диапазоне от <1 мкм (<3,5% по объему) до ~100 мкм с приблизительно равномерным распределением по объему между ~5 мкм и ~40 мкм.

Химический состав тестовой пыли:

- SiO₂ 68–76%;
- Al₂O₃ 10–15%;
- Fe₂O₃ 2–5%;
- Na₂O₃ 2–4%;
- CaO 2–5%;
- MgO 1–2%;
- K₂O 2–5%;
- TiO₂ 0,5–1%.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

В первой конфигурации тестовой установки (см. рис. 2) тестируемые датчики были расположены горизонтально, на одном уровне с пылевой камерой.

Во второй конфигурации (см. рис. 3) тестируемые датчики были расположены вертикально, таким образом, чтобы воздух с пылью поднимался вверх от пылевой камеры. В данном случае ожидалось, что действие силы тяжести

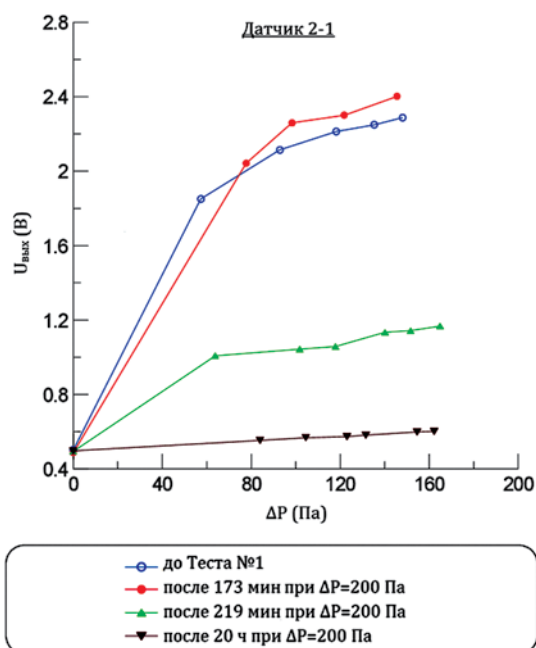


Рис. 4. Результаты теста № 1 для датчика 2-1 (горизонтальная ориентация)

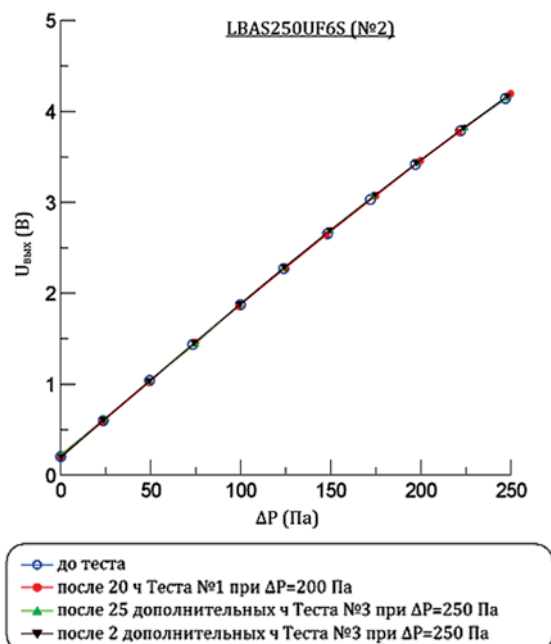


Рис. 5. Результаты точного снятия характеристик LBAS250UF6S (№2)

будет задерживать и уменьшать поток частиц в направлении тестируемых датчиков, тем самым обеспечивая им некоторую защиту от попадания пыли.

В ходе эксперимента были приложены все необходимые усилия, чтобы избежать турбулентного режима течения, который может искусственно искажать распределение пыли в потоке.

УСЛОВИЯ ИСПЫТАНИЯ

В каждой конфигурации тестируемые датчики были соединены параллельно с датчиком давления мембранного типа, откалиброванным производителем (не подвержен влиянию пыли). Следует отметить, что общий перепад давления обязательно применялся к каждому тестируемому датчику и небольшой (~13 см) соединительной трубке до датчика диаметром 31 мм.

С целью создания воспроизводимой концентрации пыли в воздухе небольшой объем пыли (~10 см³) был помещен в камеру, имеющую объем в несколько сотен куб. см. На камеру постоянно подавались колебания в 20 Гц в виде механических импульсов с амплитудой ~1 мм с использованием обычного низкочастотного динамика (сабвуфера). В камере с пылью имелись вентиляционные отверстия для притока воздуха при атмосферном давлении в камеру и сквозь нее ко входным портам тестируемых датчиков.

Регулируемый воздушный компрессор генерировал всасывающее усилие на выходе каждого датчика в процессе тестирования. Это отрицательное давление «прогоняло» воздух из пылевой

камеры через все подключенные датчики одновременно. Величина потока воздуха, проходящего через каждый отдельный датчик, обратно пропорциональна сопротивлению потоку каждого датчика.

ТЕСТИРУЕМЫЕ ДАТЧИКИ

Для сравнительных испытаний было взято несколько доступных на рынке датчиков:

1. Датчики серии LBA, производитель — SensorTechnics (в настоящий момент относится к группе компаний First Sensor, Германия) с диапазоном измерения 0...250 Па, сопротивлением потоку ~80 кПа/(мл/с), преобразователем аналогового сигнала с выходным напряжением 0,5...4,5 В.
 - Наименование образца: LBAS250UF6S (№1);
 - Наименование образца: LBAS250UF6S (№2).
2. Датчики серии LBA, производитель — SensorTechnics с диапазоном измерения 0...50 Па, сопротивлением потоку ~30 кПа/(мл/с), преобразователем аналогового сигнала с выходным напряжением 0,5...4,5 В.
 - Наименование образца: LBAS050UF6S.
3. Датчики производителя №1 с диапазоном измерения 0...±20 Па, сопротивлением потоку ~15 Па/(мл/с), аналоговым сигналом без усиления ±70 мВ.
 - Наименование образца: датчик 1-1;
 - Наименование образца: датчик 1-2.
4. Датчики производителя №2 с диапазоном измерения 0...200 Па, сопротивлением потоку ~15 Па/(мл/с), пре-

образователем аналогового сигнала с выходным напряжением 0,5...4,5 В. Эти датчики имеют специальное микроразрешение для отделения пыли внутри воздушного канала датчика.

- Наименование образца: датчик 2-1;
 - Наименование образца: датчик 2-2;
 - Наименование образца: датчик 2-3.
5. Датчики производителя №3 с диапазоном измерения -20...500 Па, сопротивлением потоку ~300 Па/(мл/с), преобразователем аналогового сигнала с выходным напряжением 0,25...4,25 В.
- Наименование образца: датчик 3-1.
 - Наименование образца: датчик 3-2.

ПРОЦЕДУРА ИСПЫТАНИЯ

Датчики сравнивались группами от 2 до 4 шт. при одинаковом значении дифференциального давления, прилагаемого к датчикам каждой группы. Оно, как правило, устанавливалось близко к верхней границе чувствительного диапазона датчика с самым большим диапазоном из группы. В то время как компрессор протягивал воздух с пылью через датчики, постоянно отслеживались и записывались следующие показатели:

- выходное напряжение датчика дифференциального давления на основе мембраны (использовался в качестве контрольного);
- выходное напряжение от каждого тестируемого датчика.

Примечание: в случаях, когда чувствительные диапазоны датчиков не были равны, и когда создаваемая разность давления была установлена на

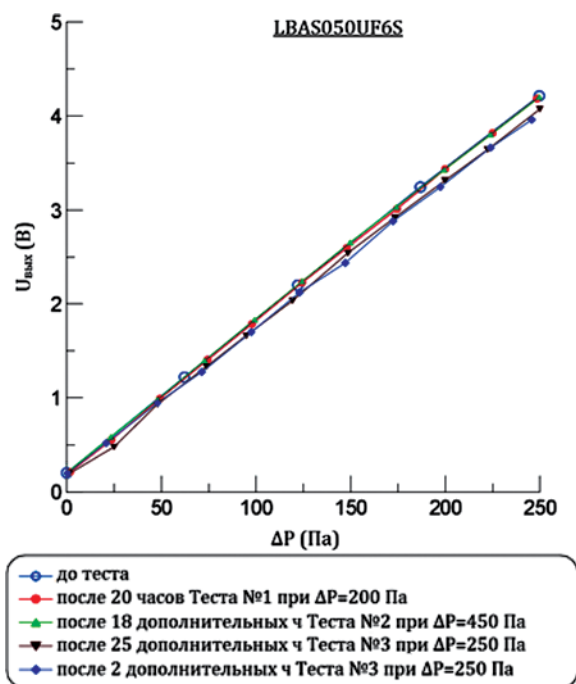


Рис. 6. Результаты точного снятия характеристик LBAS050UF6S

верхней границе диапазона датчика с наибольшим диапазоном, выходное напряжение датчика с более узким диапазоном было перенасыщено, и его невозможно было эффективно контролировать, не прерывая теста для уменьшения потока. Таким образом делалось, как правило, несколько перерывов в течение каждого теста.

Для каждого тестируемого датчика отношение выходного напряжения к дифференциальному давлению было приблизительно определено с использованием вышеописанной установки путем создания с помощью компрессора различных перепадов давления на каждом датчике. Это приблизительное определение характеристик проводилось до начала теста через различные интервалы времени в процессе тестирования, а затем по окончании испытания.

Кроме того, для каждого датчика серии LBA зависимость выходного напряжения от измеряемого дифференциала давления была точно измерена до начала испытания и потом еще раз по окончании тестирования, чтобы подтвердить результаты приблизительных измерений, а также определить накопленный эффект от воздействия пыли на датчики, чье выходное напряжение было перенасыщено во время непосредственных испытаний.

ТЕСТ №1

В первом тесте датчики LBAS250UF6S (№2), LBAS050UF6S, и 2-1 были подсоединены параллельно к пылевой камере в первой конфигурации, показанной на рисунке 2 (горизонтальное расположение на одном уровне с пылевой камерой). Испытание проводилось в

течение 20 ч. при постоянном значении разницы давлений в 200 Па.

Результаты грубого определения характеристик для датчика 2-1 показаны на графике на рисунке 4. Результаты точного измерения показателей до и после теста для двух датчиков серии LBA приведены на рисунках 5 и 6.

Из графика на рисунке 4 видно, что калибровка датчика 2-1 резко изменилась (уровень выходного сигнала сократился более чем на 50%) после 219 мин и практически полностью пропала к концу 20 ч. воздействия пыли.

Очевидно также, что графики чувствительности датчиков серии LBA остаются неизменными после 20 ч. при 200 Па. Резкое различие между датчиком 2-1 и датчиками серии LBA не удивительно, т.к. их сопротивления потоку различаются в 1000 раз, т.е. через датчик 2-1 прошел более чем в тысячу раз значительный объем воздуха. Это означает также, что скорость потока загрязненного воздуха по направлению к датчику 2-1 была в 1000 раз выше.

Необходимо отметить, что несколько сантиметров прозрачного соединительного шланга к датчику 2-1 имеют видимые следы значительного осаждения пыли изнутри, в то время как на соединительных шлангах к датчикам серии LBA пыли оказалось существенно меньше.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ТЕСТ №1А

В подтверждение результатов предыдущего испытания дополнительный 20-ч. тест был проведен с датчиком 2-3 вместе с другим образцом LBAS250UF6S того же типа, что и в тесте №1. Графические результаты были

очень похожи на описанные выше (см. рис. 4 и 5). Выходной сигнал датчика 2-3 резко сократился после нескольких часов и упал практически до нуля после 20 ч воздействия пыли. И снова сигнал образца серии LBA фактически не изменился по завершении всех 20 ч испытания.

После этого 20-ч испытания оба образца были вскрыты, чтобы найти причину отказа датчика 2-3 и сравнить состояние внутренних механизмов устройств. Большое количество слипшихся частиц пыли было обнаружено в корпусе датчика 2-3, в т.ч. значительное количество непосредственно во входном устье воздушного канала датчика.

Корпус тестируемого датчика серии LBA был также вскрыт, при этом не было обнаружено никаких следов пыли на входном порте, сквозь который воздух проходит к чувствительному элементу.

ТЕСТ №2

Во втором тесте датчики LBAS250UF6S (№1), LBAS050UF6S, 1-1 и 3-1 были подключены параллельно к пылевой камере по первой конфигурации, показанной на рисунке 2 (с датчиками, расположенными горизонтально на одном уровне с пылевой камерой). Испытание проводилось в течение 18 ч. при постоянном значении перепада давлений в 450 Па. Этот приложенный дифференциал был близок к верхней границе диапазона датчика 3-1 и вне диапазонов всех остальных датчиков, так что их выходное напряжение было перенасыщено во время испытания.

Результаты примерного определения характеристик показаны на рисунках 7, 8, 9. Результаты точного определения характеристик до и после теста для образцов серии LBA приведены на рисунках 10 и 6.

Как видно из результатов, представленных на рисунке 7, датчик 1-1 значительно изменил свою калибровку уже после 1 ч, а после 2 ч воздействия загрязненного пылью воздуха его выходной сигнал снизился более чем на 50%. Отметим, что после 2 ч испытательный также изменился нулевой уровень сигнала.

Как видно из результатов, приведенных на рисунке 8, датчик 3-1 фактически полностью потерял работоспособность в период между 2 и 18 ч. воздействия пыли.

Рисунок 9 показывает, что кривая отклика датчика LBAS250UF6S (№1) является относительно неизменной через 1, 2 и 18 ч. Кроме того, сравнение характеристик до и после теста, приведенное на рисунке 10, подтверждает, что отклик этого датчика действительно не изменяется после всех 18 ч воздействия.

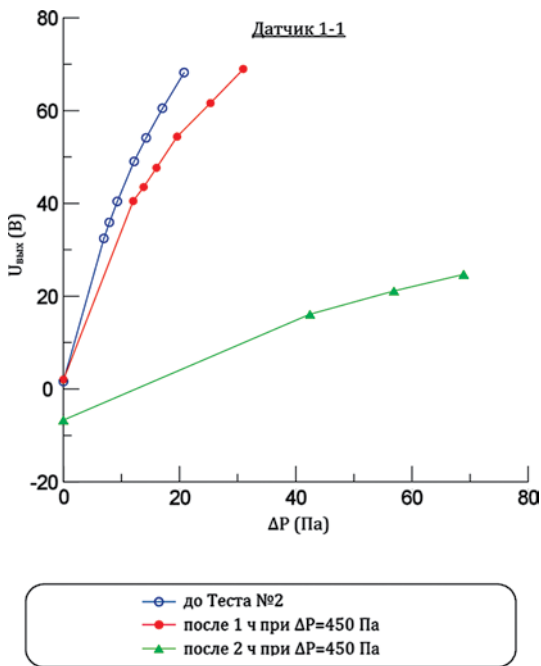


Рис. 7. Результаты теста №2 датчика 1-1 (горизонтальная ориентация)

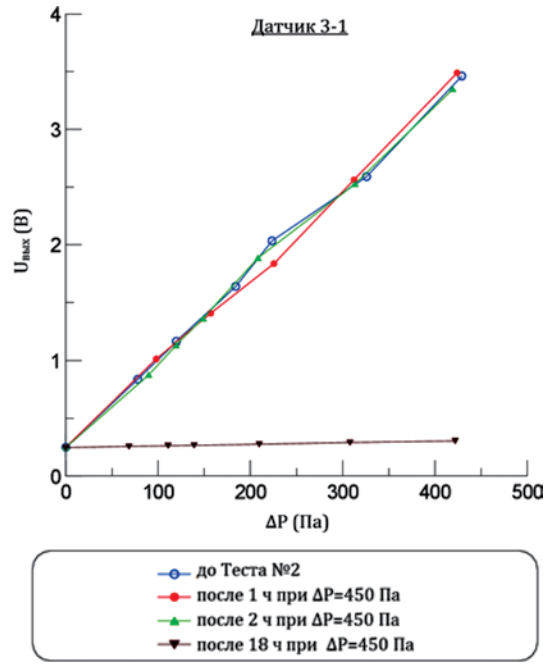


Рис. 8. Результаты теста №2 датчика 3-1 (горизонтальная ориентация)

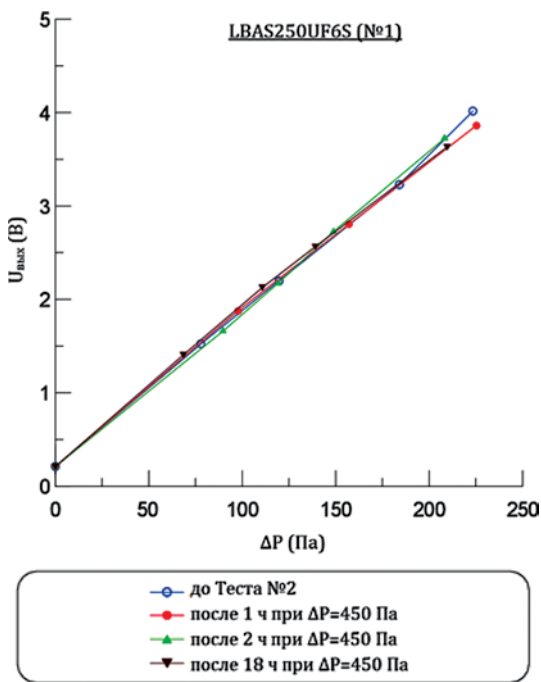


Рис. 9. Результаты теста №2 для LBAS250UF6S (№1) (горизонтальная ориентация)

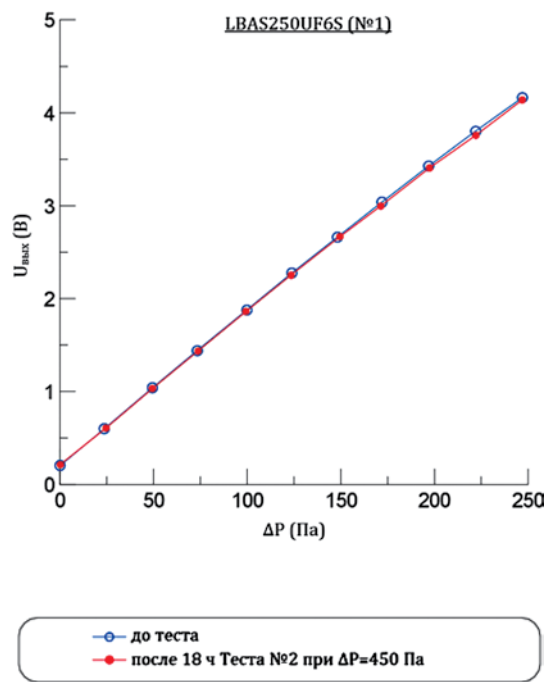


Рис. 10. Результаты точного снятия характеристик LBAS250UF6S (№1)

Рисунок 6 приводит результаты датчика LBAS050UF6S, который также использовался ранее для исследований в тесте №1. И снова измерения до и после теста подтверждают, что реакция данного датчика действительно не изменяется после 18 ч плюс предыдущие 20 ч воздействия пыли.

Такое отличие между датчиками 1-1 и 3-1 с одной стороны, и датчиками серии LBA с другой, не удивительно, т.к. разница в сопротивлениях потоку составляет два порядка и более. Как и в предыдущем случае, гораздо больший

объем воздуха прошел через датчики 1-1 и 3-1, а скорость потока с пылью к датчикам 1-1 и 3-1 оказалась во много раз выше. И вновь прозрачные шланги подключения датчиков 1-1 и 3-1 имели видимые остатки пыли в них, в то время как значительно меньше пыли было обнаружено в доводящих трубках датчиков серии LBA.

ТЕСТ №3

В третьем тесте два датчика Sensortech, уже использованные в предыдущих тестах (датчик LBAS250UF6S (№2) и датчик

LBAS050UF6S), вместе с датчиками 2-2 и 3-2 были подключены параллельно к пылевой камере во второй конфигурации, показанной на рисунке 3 (с датчиками, расположенными вертикально над пылевой камерой).

Испытание проводилось в течение 27 ч при постоянном перепаде давления в 250 Па. Это значение оказалось в пределах рабочего диапазона датчика 3-2, близко к верхней границе диапазона LBAS250UF6S, вне диапазона оставшихся двух датчиков, так что их выходное напряжение было перенасыщено во время испытания.

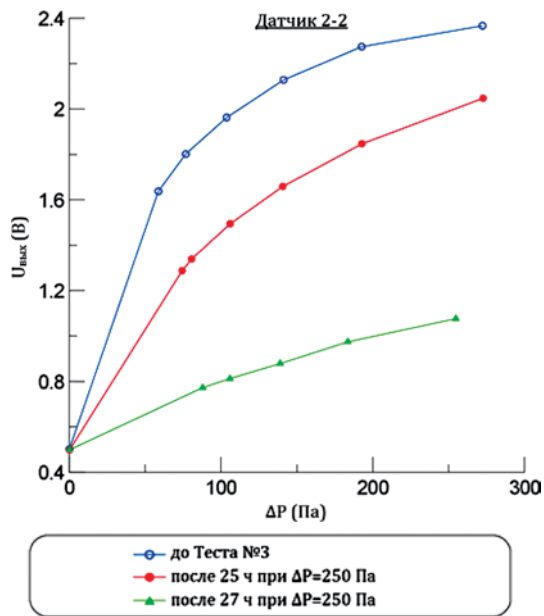


Рис. 11. Результаты теста №3 для датчика 2-2 (вертикальная ориентация)

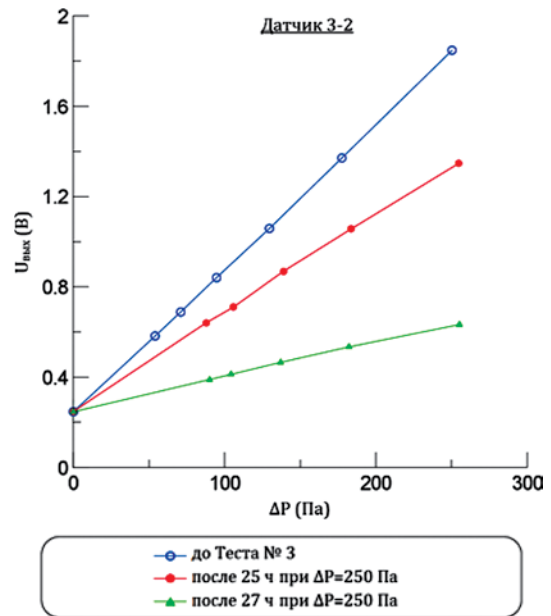


Рис. 12. Результаты теста №3 для датчика 3-2 (вертикальная ориентация)

Результаты грубого снятия характеристик показаны на графиках на рисунках 11 и 12. Результаты точного определения показаний до и после испытания для образцов серии LBA приведены на рисунках 5 и 6.

Примечание: оба тестируемых датчика серии LBA уже были ранее подвержены воздействию пыли в течение многих часов в тесте №1 и тесте №2.

Результаты на рисунках 11 и 12 показывают, что в случае, когда датчики ориентированы вертикально над пылевой камерой, требуется гораздо больше времени для проявления эффекта от воздействия пыли. Калибровка датчиков 2-2 и 3-2 значительно ухудшилась после 25 ч и продолжила падать еще быстрее после двух дополнительных часов (всего 27 ч воздействия пыли для каждого датчика). Такой результат был ожидаемым, т.к. действие силы тяжести задерживало и уменьшало вертикальный поток пылевых частиц по направлению ко входам датчиков.

Рисунок 5 показывает, что кривая отклика датчика LBAS250UF6S (№2) по результатам точного снятия характеристик является неизменной после этих дополнительных 25 + 2 = 27 ч воздействия пыли помимо первоначальных 20 ч в тесте №1.

Рисунок 6 показывает, что калибровка датчика LBAS050UF6S начала, наконец, незначительно изменяться (на несколько процентов) после этих дополнительных 25 + 2 = 27 ч воздействия пыли, помимо первоначальных 20 + 18 = 38 ч воздействия пыли в тесте №1 и тесте №2.

Вполне объясним тот факт, что датчик LBAS050UF6S начинает менять свои характеристики раньше LBAS250UF6S. Это связано с его более низким

сопротивлением потоку в размере ~30 кПа/(мл/с) по сравнению с ~80 кПа/(мл/с). Не должна удивлять и огромная разница между датчиками 2-2 и 3-2, с одной стороны, и датчиками серии LBA с другой, т.к. разница в сопротивлениях потоку снова составляет два порядка и более. Как и в предыдущих случаях, гораздо больший объем воздуха прошел через датчики 2-2 и 3-2, а скорость потока пыли к датчикам 2-2 и 3-2 также во много раз быстрее.

И вновь на внутренних стенках прозрачных шлангов подключения датчиков 2-2 и 3-2, даже вертикально ориентированных, были заметны остатки пыли, в то время как почти никаких пылевых осадков не было видно в подводящих трубках к датчикам серии LBA. Это согласуется с представлением о том, что большое сопротивление потоку у датчиков LBA ограничивает объем и скорость воздушного потока до такой степени, что большая часть пыли выпадает из потока еще до достижения непосредственно датчика.

Выводы

Полное сопротивление потоку через внутренний канал датчиков дифференциального давления на основе термоанемометров с небольшим сквозным воздушным потоком является чрезвычайно важным фактором в определении уровня эксплуатационной легкости датчика и его устойчивости к загрязнению пылью.

Датчики серии LBA производства SensorTechnics, имеющие сопротивление потоку >10 кПа/(мл/с), были непосредственно испытаны на сопротивляемость пыли в сравнении с датчиками, основанными на том же принципе трех других производителей с сопротивлени-

ями потоку 15 Па/(мл/с)...300 Па/(мл/с). Во всех случаях датчики, имеющие более низкие значения сопротивления потоку, потеряли калибровку и/или работоспособность после нескольких часов или десятков часов нормальной работы. Датчики SensorTechnics не показали существенного изменения калибровки. Таким образом, высокие показатели сопротивления воздушному потоку (пневматического импеданса) вызывают ряд положительных эффектов:

- уменьшают объем загрязненного воздуха, который может достичь входа датчика;
- уменьшают скорость потока воздуха ко входу датчика, что позволяет большому количеству пыли осесть из потока, прежде чем он достигнет входного порта;
- уменьшают усилие, оказываемое на частицы пыли, на входе в проточный канал датчика.

Когда подводящая трубка датчика ориентирована таким образом, что поток воздуха с пылью вынужден подниматься вертикально вверх ко входу датчика, эффект воздействия пыли снижается. Фактически, чем меньший объем воздушного потока датчик пропускает через себя в процессе измерений, тем более идеальным является его поведение и тем выше его стойкость к пыли в воздушном потоке.

Датчики SensorTechnics обеспечивают крайне высокое сопротивление потоку и, следовательно, имеют существенные преимущества. Потенциальным потребителям дифференциальных сенсоров давления на основе термоанемометров предлагается повторить эти или подобные тесты, чтобы проверить пригодность датчиков для использования в собственных изделиях.