

# МЭМС-ДАТЧИКИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ СЕРИИ LVA

## ВЫСОКАЯ НАДЕЖНОСТЬ, МАЛЫЕ ГАБАРИТЫ

А. Григорьев

В рабочем потоке воздуха или газа через датчики дифференциального давления ( $\Delta P$ -датчиков) на основе термоанемометров, используемые для определения расхода воздуха, например, в системах вентиляции и кондиционирования, могут присутствовать частицы пыли. Весьма вероятно, что они попадают в датчик. Естественно, возникает вопрос, может ли такое загрязнение привести к уменьшению калиброванной чувствительности датчика и ухудшению надежности расходомера на его основе? Компания Sensortech nics – крупный разработчик и изготовитель высокоточных и надежных датчиков для самых разнообразных применений – для установления влияния пылесодержащего воздуха на надежность выпускаемых ею  $\Delta P$ -датчиков серии LVA сравнила устойчивость их откалиброванной чувствительности и устойчивость других датчиков с тем же принципом определения перепада давления. Каковы же результаты этого исследования?

### РИСК ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПЫЛЬЮ $\Delta P$ -ДАТЧИКОВ НА ОСНОВЕ ТЕРМОАНОМЕОМЕТРА

Механизм регистрации давления  $\Delta P$ -датчика может вызвать утечку при отличном от нуля потоке воздуха или газа через него. Это свойство присуще всем датчикам дифференциального давления на основе термоанемометров. Тем не менее, такие  $\Delta P$ -датчики благодаря возможности экономически эффективной регистрации весьма незначительного дифференциального давления (порядка нескольких паскаль относительно полной шкалы) с разрешением 0,1 Па пользуются большим спросом. Но, как правило, разработчики систем измерения потока воздуха

или газа с помощью  $\Delta P$ -датчиков на основе термоанемометров для обеспечения их надежной и длительной работы должны учитывать факторы, возникающие при отличном от нуля потоке через датчик.

Весьма вероятно, что поток занесет в датчик присутствующие в нем частицы пыли, в результате чего могут возникнуть следующие негативные факторы:

- увеличение сопротивления потоку и, следовательно, изменение (уменьшение) откалиброванной чувствительности датчика, что может проявляться в виде снижения выходного напряжения датчика при каждом значении

измеряемого дифференциала давления, а также в потере калибровки;

- полная закупорка канала датчика (функциональный сбой);
- осаждение пыли на чувствительную микроструктуру, составляющую измерительный элемент в канале датчика, что также может привести к изменению калибровки.

В общем случае наличие пыли в измеряемых потоках воздуха может представлять опасность для надежности прибора, однако степень этой опасности в первую очередь определяется показателем сопротивления потоку (пневматического импеданса) датчика.

### ФАКТОРЫ РИСКА

Количество частиц пыли, которые воздушный поток переносит через датчик, зависит от их количества на входе датчика и от скорости воздушного потока в его канале. Другой важный параметр – скорость воздушного потока на входе датчика. Если эта скорость достаточно низкая, пыль оседает до поступления в проточный канал датчика, и его иммунитет к загрязнению пылью повышается. Если же скорость газового потока на входе датчика велика, пыль остается в потоке во взвешенном состоянии, и его иммунитет к загрязнению пылью, как правило, понижается\*.

Очевидно, что перенос больших и тяжелых частиц пыли через воздуховод к датчику менее вероятен, чем малых и/или легких. Кроме того, размер частиц пыли влияет на то, сможет ли пыль физически блокировать канал и на вероятность попадания пыли в датчик. Концентрация пыли в воздушном или газовом потоке, достигающем датчик, зависит от ее концентрации в основном потоке.

Чем больше внутренний диаметр подводящего воздуховода, тем ниже линейная скорость загрязненного пылью потока на входе датчика. Кроме того, чем длиннее соединительные трубки, тем больше их сопротивление потоку, а это, в свою очередь, влияет на его линейную скорость. Наличие пылесборников (например, гравитационных ловушек) и пылефильтров

\* При высоком сопротивлении потоку одновременно уменьшаются объем воздуха, проходящего через канал датчика, и скорость потока, поступающего на вход датчика. В результате частицы пыли выпадают до поступления потока в канал. Кроме того, уменьшаются механические силы, действующие на частицы, уже присутствующие на входе датчика.

обеспечивает определенный уровень защиты датчика от пыли.

Хорошо защищены от воздействия пыли и влаги датчики дифференциального давления серии LVA компании Sensortechncis

### ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ СЕРИИ LVA

Датчики дифференциального давления серии LVA измеряют ультранизкие давления воздуха или газа – от 25 Па полной шкалы. Выполнены они по инновационной МЭМС-технологии, позволяющей создать в кремниевой микросхеме датчика микропроточный канал. Датчики определяют перепады давления газа путем термоизмерения дифференциального давления слабых потоков (порядка нескольких нанолитров в секунду) через микропроточный канал датчика, полное пневматическое сопротивление которого достигает 200 кПа/мл/с, т.е. на три порядка больше, чем у сопоставимых приборов регистрации дифференциального давления (рис.1).

Размер кремниевой микросхемы датчика в корпусе составляет 13×18×8 мм (без контактных штырьков). Помимо микропроточного канала она содержит чувствительный элемент и аналоговую КМОП-схему формирования сигнала. Преобразователь давления представляет собой размещенный на кремниевом кристалле МЭМС-термоанемометр. Применение резисторов с регулируемым сопротивлением (adjustable resistors, или rejustor-технологии) в сочетании с КМОП-схемой позволяет создать аналоговую микросхему компенсации и обработки сигнала и получать  $\Delta P$ -разрешение 0,1% (при времени отклика 1 мс). Благодаря высокому полному пневматическому сопротивлению скорость потока через датчик близка к абсолютному

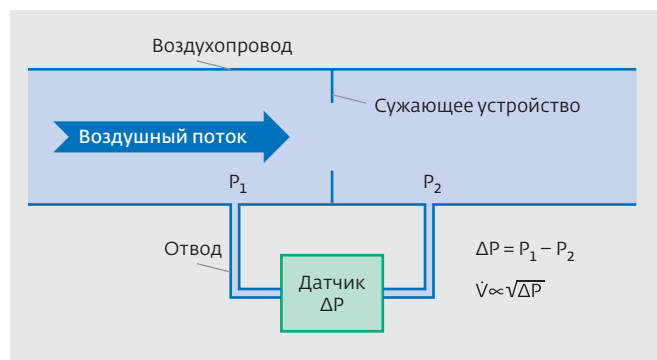


Рис.1. Принципиальная схема измерения объема воздушного потока с помощью  $\Delta P$ -датчика

минимуму, что обеспечивает его надежную работу в пыльной и влажной атмосфере. Таким образом, основные достоинства  $\Delta P$ -датчиков серии LVA – высокая стойкость к загрязнению пылью и ее конденсации, превосходные чувствительность и стабильность, а также малые габариты.

Для определения влияния пыли на надежность  $\Delta P$ -датчиков серии LVA компания Sensortechncis провела их испытания и испытания аналогичных датчиков различных изготовителей. Цель эксперимента заключалась в сравнении иммунитета датчиков к пылевому загрязнению. Устройства и методы внешней фильтрации и прочей дополнительной защиты от пыли были оставлены за рамками исследования.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЙКОСТИ $\Delta P$ -ДАТЧИКОВ К ЗАГРЯЗНЕНИЮ ПЫЛЬЮ

Установка для испытаний была спроектирована и построена так, чтобы обеспечить воспроизводимые и контролируемые условия тестирования датчиков и получение четких результатов для их сравнительного анализа. С этой целью перепад давления на наборы датчиков был одинаковым. В каждом эксперименте два или более датчика, зачастую имевших различные значения пневматического сопротивления, соединялись параллельно, с тем чтобы общий перепад давления влиял на них одинаково.

К порту более высокого давления датчика подключался источник воздуха с тонкодисперсной тестовой пылью (категории A2), соответствующей стандарту ISO 12103-1. Размер частиц пыли варьировался в диапазоне от  $<1$  мкм ( $<3,5\%$  по объему) до  $\sim 100$  мкм с приблизительно равномерным распределением по объему между  $\sim 5$  и  $\sim 40$  мкм. Химический состав тестовой пыли:  $\text{SiO}_2$  (68–76%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (10–15%),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (2–5%),  $\text{Na}_2\text{O}_3$  (2–4%),  $\text{CaO}$  (2–5%),  $\text{MgO}$  (1–2%),  $\text{K}_2\text{O}$  (2–5%) и  $\text{TiO}_2$  (0,5–1%).

### Описание эксперимента

В первой конфигурации тестовой установки (рис.2а) датчики располагались горизонтально на одном уровне с пылевой камерой и друг с другом, во второй конфигурации (рис.2б) – вертикально, так чтобы воздух с пылью поднимался вверх от пылевой камеры. Ожидалось, что при такой конфигурации установки действие силы тяжести будет задерживать и уменьшать поток частиц пыли в направлении тестируемых

датчиков и тем самым создавать некоторую "защиту" от пыли. В ходе эксперимента были приложены усилия для предотвращения турбулентного потока, который мог нарушить распределение пыли в потоке. В каждой конфигурации к тестируемым датчикам в качестве контрольного прибора параллельно подключался откалиброванный производителем  $\Delta P$ -датчик мембранного типа (не подверженный влиянию пыли).

С целью создания воспроизводимой концентрации пыли в воздухе небольшой объем пыли ( $\sim 10$  см<sup>3</sup>) помещался в камеру объемом в несколько сотен кубических сантиметров. На камеру с помощью обычного низкочастотного динамика постоянно подавались механические импульсы с амплитудой  $\sim 1$  мм, приводящие ее

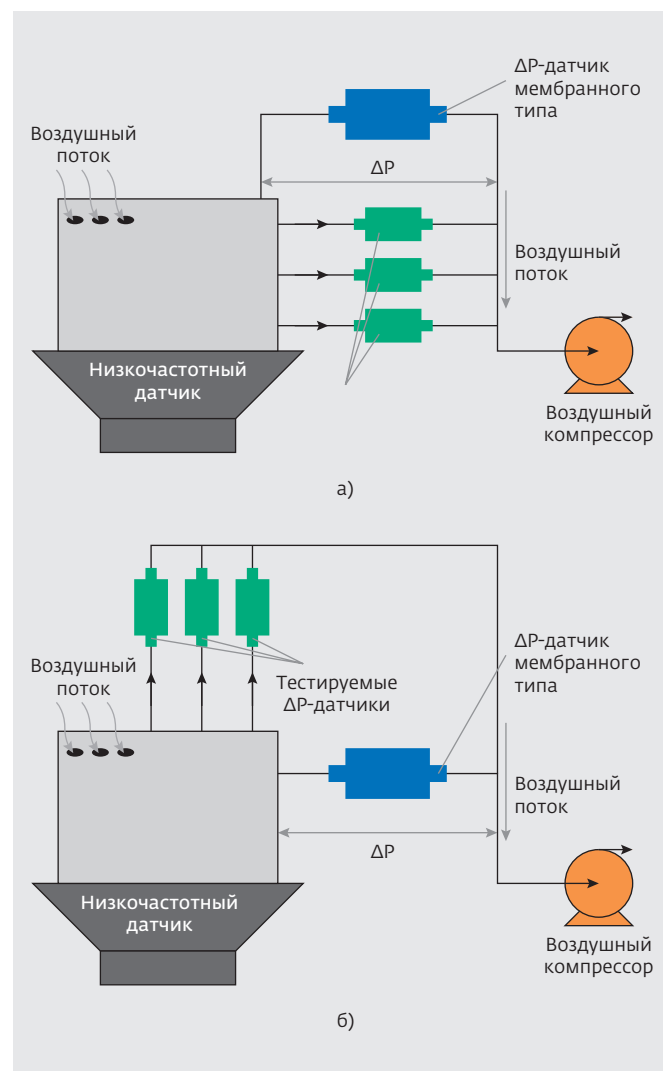


Рис.2. Блок-схема испытательной установки: горизонтальная (а) и вертикальная (б) конфигурации

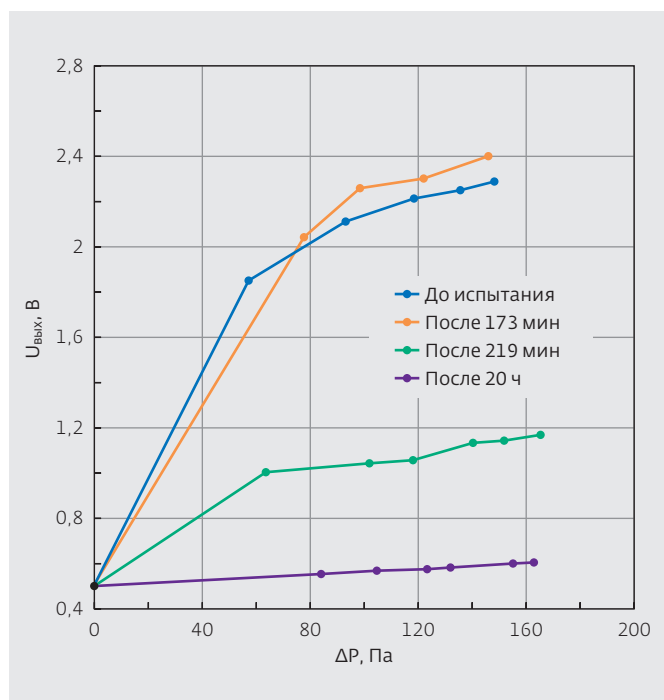


Рис.3. Результаты испытания датчика 2-1

в колебания с частотой 20 Гц. В камере имелись вентиляционные отверстия для притока воздуха с атмосферным давлением и оттока к входным портам тестируемых датчиков. В процессе тестирования регулируемый воздушный компрессор генерировал всасывающее усилие на выходе каждого датчика.

В эксперименте испытывались следующие датчики:

- два датчика LBAS250UF6S с диапазоном измерения 0–250 Па, сопротивлением потоку ~80 кПа/мл/с и встроенным преобразователем аналогового сигнала с выходным напряжением 0,5–4,5 В;
- LBAS050UF6S с диапазоном измерения 0–50 Па, сопротивлением потоку ~30 кПа/мл/с и встроенным преобразователем аналогового сигнала с выходным напряжением 0,5–4,5 В;
- два датчика стороннего производителя (датчики 1-1 и 1-2) с диапазоном измерения 0...±20 Па, сопротивлением потоку ~15 Па/мл/с и аналоговым сигналом без усиления ±70 мВ;
- три датчика второго производителя (датчики 2-1, 2-2 и 2-3) с диапазоном измерения 0–200 Па, сопротивлением потоку ~15 Па/мл/с, преобразователем аналогового сигнала с выходным напряжением 0,5–4,5 В. Датчики имели специальное микроустройство для отделения пыли внутри их воздушного канала;

- два датчика третьего производителя (датчики 3-1 и 3-2) с диапазоном измерения -20–500 Па, сопротивлением потоку ~300 Па/мл/с и преобразователем аналогового сигнала с выходным напряжением 0,25–4,25 В.

В ходе испытаний постоянно отслеживались и записывались значения выходного напряжения  $\Delta P$ -датчика на основе мембраны и каждого тестируемого датчика. До начала испытаний, через определенные интервалы в их ходе и после окончания для каждого испытываемого датчика при регулировке с помощью компрессора различных перепадов давления датчиков определялись соответствующие значения отношения выходного напряжения к дифференциальному давлению. Кроме того, для каждого датчика серии LBA до начала испытаний и после их окончания для подтверждения результатов грубых замеров и выявления эффекта накопления в них пыли, приводящего к насыщению выходного напряжения во время испытаний, измерялась его зависимость от точно измеренного создаваемого давления.

### Результаты испытаний

Первое испытание датчиков LBAS250UF6S, LBAS050UF6S и датчика 2-1 в установке горизонтальной ориентации в течение 20 ч при постоянном перепаде давления 200 Па показало, что калибровка датчика 2-1 резко изменилась (уровень выходного сигнала сократился более чем на 50%) после 219 мин и практически полностью пропала через 20 ч испытания (рис.3). Чувствительность датчиков серии LBA оставалась неизменной и после 20 ч испытаний. Резкое различие результатов испытаний датчика 2-1 и датчиков серии LBA не удивительно: значения их сопротивления потоку различаются в 1000 раз, т.е. объем воздуха, проходящего через датчик 2-1, и скорость потока загрязненного воздуха по направлению к нему были больше, чем у датчиков компании, на три порядка. Дополнительное проверочное испытание в течение 20 ч датчика 2-3 и образца LBAS250UF6S показало те же результаты. После этого испытания оба образца были вскрыты, чтобы найти причину отказа датчика 2-3 и сравнить состояние механизмов устройств. В корпусе датчика, в основном во входящем порту его воздушного канала, было обнаружено большое число слипшихся частиц пыли. В датчике серии LBA никаких следов пыли на входном порте не было.

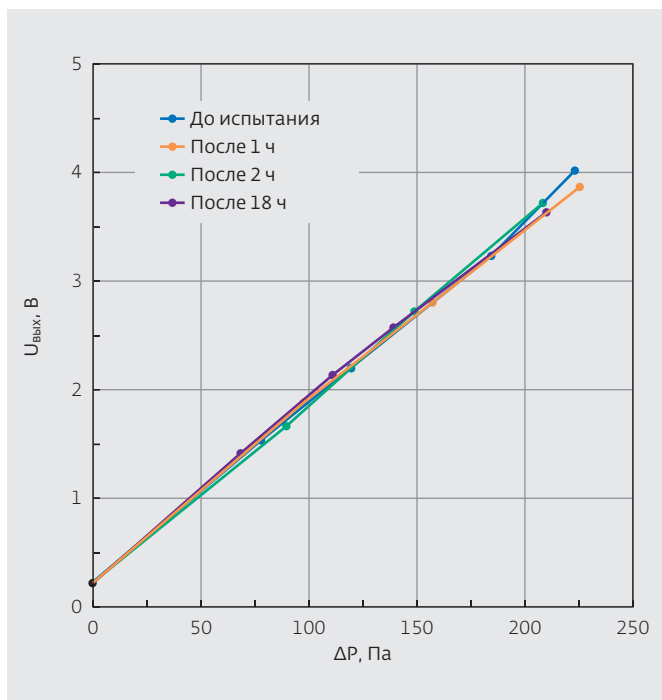


Рис.4. Результаты испытания датчика LBAS250UF6S

Во втором тесте проверялись датчики LBAS250UF6S, LBAS050UF6S и датчики 1-1 и 3-1. Испытания проводились в течение 18 ч при постоянном перепаде давления 450 Па в установке с параллельной конфигурацией. Такой перепад давления близок к верхней границе диапазона датчика 3-1 и вне диапазонов остальных датчиков, так что их выходное напряжение было перенасыщено во время испытания.

Результаты грубого определения характеристик показали, что калибровка датчика 1-1 заметно ухудшилась через час, а через 2 ч его выходной сигнал снизился более чем на 50%, при этом изменился и нулевой уровень сигнала. Датчик 3-1 фактически полностью потерял работоспособность в период между 2 и 18 ч испытания. Кривая отклика датчика LBAS250UF6S практически оставалась неизменной через 1, 2 и 18 ч (рис.4). Кроме того, сравнение его характеристик до и после теста подтвердило факт их неизменности после 18 ч испытаний. Результаты этого испытания обусловлены теми же причинами, что и результаты первого, т.е. разницей в значениях сопротивления потоку на два и более порядка. В прозрачных шлангах подключения датчиков 1-1 и 3-1 также были обнаружены частицы пыли, в то время как в доводящих трубках датчиков серии LBA пыли было значительно меньше.

В третьем испытании два датчика Sensortech, уже прошедшие первое и второе испытания - LBAS250UF6S и LBAS050UF6S, а также новые датчики 2-2 и 3-2 подключались параллельно по вертикальной конфигурации. Испытание проводилось в течение 27 ч при

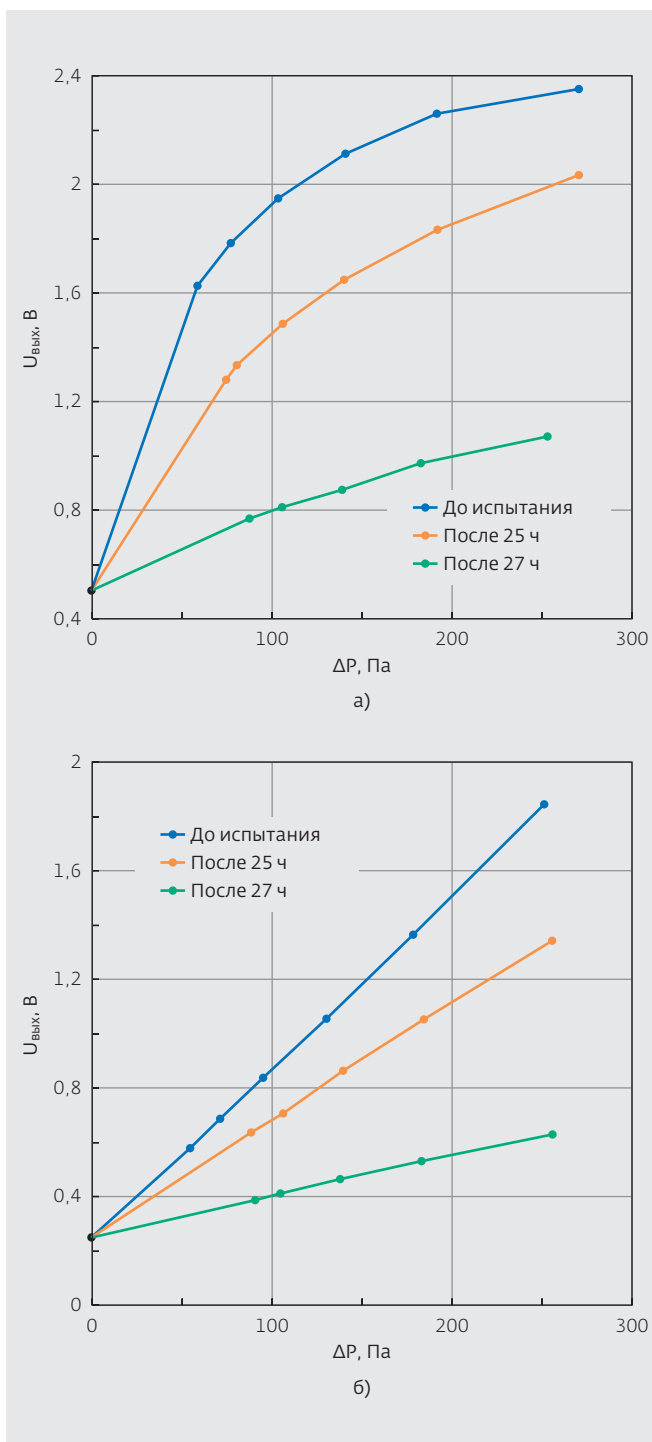
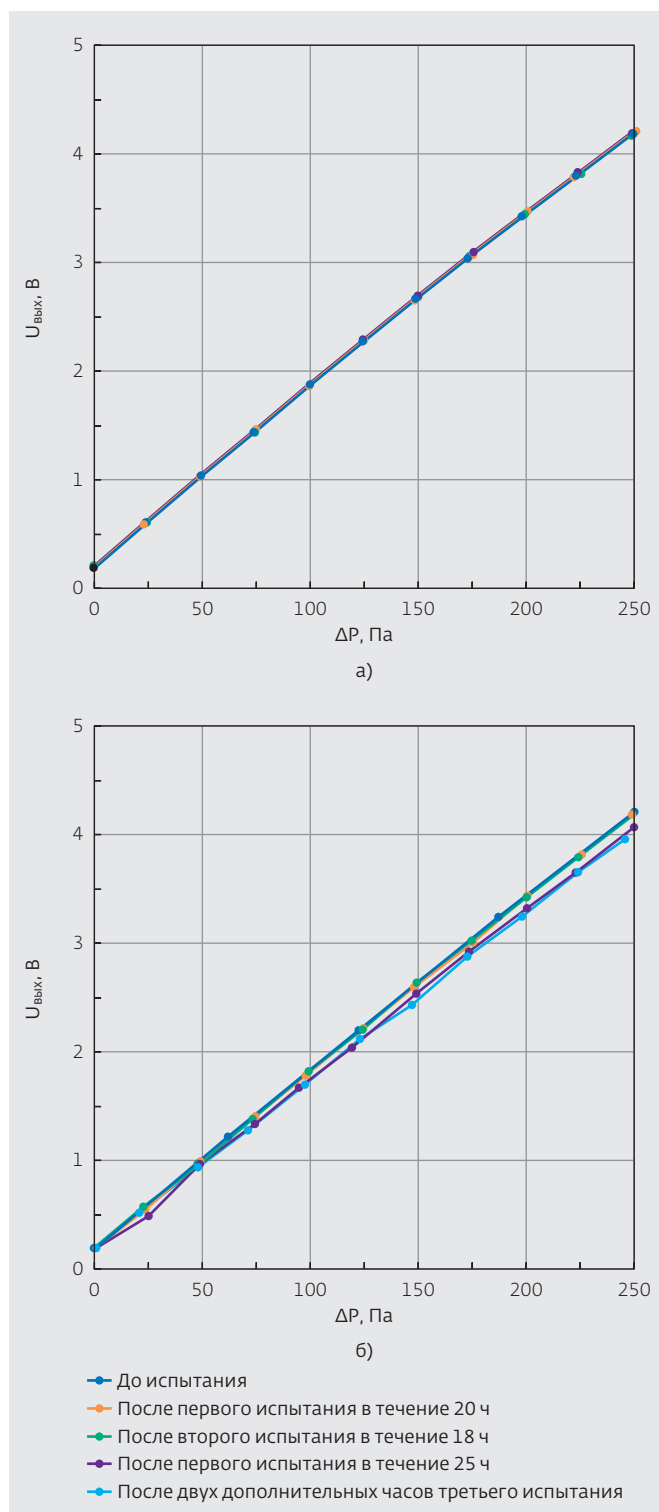


Рис.5. Результаты третьего испытания датчиков 2-2 (а) и 3-2 (б)





**Рис.6.** Точно измеренные характеристики датчиков LBAS250UF6S (а) и LBAS050UF6S (б)

постоянном перепаде давления 250 Па, которое находится в пределах рабочего диапазона датчика 3-2, близко к верхней границе диапазона LBAS250UF6S и вне диапазона оставшихся

двух датчиков, так что их выходное напряжение во время испытания также было перенапряжено. При вертикальном расположении датчиков над пылевой камерой время проявления эффекта воздействия пыли увеличивалось. Калиброванная чувствительность датчиков 2-2 и 3-2 начала заметно ухудшаться после 25 ч и продолжила падать еще быстрее после двух дополнительных часов (всего 27 ч воздействия пыли на каждый датчик) (рис.5). Такой результат для выбранной конфигурации установки испытания вполне ожидаемый. Точно измеренные характеристики датчика LBAS250UF6S остались неизменными и после 25+2=27 ч воздействия пыли помимо первоначальных 20 ч при первом испытании. В то же время калибровка датчика LBAS050UF6S с более низким сопротивлением потоку, чем у LBAS250UF6S (~30 против 80 кПа/мл/с), начала незначительно изменяться после дополнительных 2 ч воздействия пыли помимо первоначальных 20+18=38 ч испытаний (рис.6).

Разница результатов испытаний датчиков 2-2 и 3-2, с одной стороны, и датчиков серии LBA, с другой, как и в предыдущих случаях объясняется различием их значений сопротивления потоку. Испытания подтвердили: в датчиках серии LBA уровень ограничения объема и скорости воздушного потока благодаря большому сопротивлению потоку способствует выпадению большей части пыли до достижения датчика.

Таким образом, для  $\Delta P$ -датчиков на основе термоанемометров с микропроточным каналом полное сопротивление потоку является чрезвычайно важным фактором, определяющим уровень их эксплуатационной годности и устойчивости к загрязнению пылью. Испытания датчиков серии LBA компании Sensortechcnics с большим, чем у датчиков трех сторонних производителей, сопротивлением потоку показали, что во всех случаях калиброванная чувствительность и/или работоспособность после нескольких десятков часов нормальной работы датчиков с низкими значениями сопротивления потоку ухудшались. Чувствительность датчиков серии LBA существенно не изменялась. Фактически, чем меньший объем воздушного потока проходит через датчик, тем выше его стойкость к запыленному воздушному потоку и тем более он надежен.

По материалу LBA Differential Pressure Sensors: High Immunity to Dust Contamination. - [www.sensortechcnics.com](http://www.sensortechcnics.com)



**ТЕХНОСФЕРА**  
Рекламно - издательский центр

Москва, ул. Краснопролетарская, д.16, подъезд 5  
Тел. (495) 234-01-10, факс (495) 956-33-46  
e-mail: journal@electronics.ru

# Подписка на журналы на сайте [www.technosphera.ru](http://www.technosphera.ru)



Стоимость: 583 руб за номер  
Периодичность: 8 номеров в год  
[www.electronics.ru](http://www.electronics.ru)



Стоимость: 275 руб за номер  
Периодичность: 6 номеров в год  
[www.lastmile.ru](http://www.lastmile.ru)

**100 %**  
**гарантия**  
**получения**  
**ВСЕХ**  
**номеров**



Стоимость: 275 руб за номер  
Периодичность: 8 номеров в год  
[www.nanoindustry.ru](http://www.nanoindustry.ru)



Стоимость: 385 руб за номер  
Периодичность: 6 номеров в год  
[www.j-analytics.ru](http://www.j-analytics.ru)



Стоимость: 275 руб за номер  
Периодичность: 6 номеров в год  
[www.photonics.ru](http://www.photonics.ru)