

УДК 681.586'33.01:629.7

doi: 10.32620/aktt.2022.4sup2.13

А. Г. БУРЯЧЕНКО

АО «Элемент», Одесса, Украина

РАЗРАБОТКА ДАТЧИКА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ АВИАКОСМИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И ВЫБОР ПЕРВИЧНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Приведены основные требования к датчику дифференциального давления, разработанному АО «Элемент» по заказу ГП «КБ «Южное». Показано, что наиболее существенными критериями при выборе первичного преобразователя явились требования, во-первых, по проведению контроля давления химически агрессивной среды – ракетного топлива, и, во-вторых, по выполнению измерений сравнительно небольшого дифференциального давления в условиях воздействия рабочего избыточного (линейного) давления, верхний предел изменений которого на порядок превышает предел измеряемого дифференциального, при этом необходимо минимизировать дополнительную погрешность, обусловленную воздействием рабочего избыточного давления. Приведены данные информационного поиска, в результате которого выбраны первичные преобразователи, наиболее удовлетворяющие заданным требованиям, а именно сенсоры серии PD-10L фирмы Keller. Кратко описан датчик, разработанный и изготовленный на базе выбранного первичного преобразователя. Основное внимание уделено описанию метрологического обеспечения разработки и испытаний датчика и результатам экспериментальных исследований его характеристик в части долговременной стабильности и влияния рабочего избыточного давления на выходной сигнал при изменении контролируемого дифференциального давления в диапазоне измерений. Приведены сведения о создании специализированного стенда для исследования упомянутого влияния, оснащенного импортным измерителем, обеспечившим контроль дифференциального давления от нуля до 16 бар в условиях воздействия рабочего избыточного давления 150...166 бар с погрешностью не более $\pm 0,1\%$. Пояснено, что необходимость создания стенда на предприятии обусловлена отсутствием подобного оборудования и средств измерительной техники в украинских центрах метрологии и стандартизации. По результатам выполненного совместно с заказчиком анализа требований к применению разработанного датчика выбран рациональный способ представления функции преобразования, минимизирующий погрешность измерений в наиболее ответственных условиях.

Ключевые слова: дифференциальное давление; смещение нуля от воздействия рабочего избыточного давления; долговременная стабильность.

Введение

АО «Элемент» имеет многолетний опыт разработки, исследования и применения датчиков давления, в том числе для авиадвигателестроения [1 – 3]. Этот опыт изначально (начиная с конца прошлого века) включал разработку и изготовление кремниевых интегральных чувствительных элементов на базе технологии микроэлектроники. Однако впоследствии в силу ряда внешних обстоятельств предприятие отказалось от изготовления чувствительных элементов и полностью перешло к использованию готовых первичных преобразователей производства ведущих зарубежных фирм.

В настоящее время АО «Элемент» является разработчиком и изготовителем бортовой и наземной аппаратуры, среди которой – интеллектуальные датчики и системы измерения давления, а также регуляторы авиадвигателей с встроенными каналами измерения давления [4, 5].

Одной из относительно недавних поставленных перед АО «Элемент» задач по обеспечению измерения давления в специфических условиях явилась разработка датчика дифференциального давления по заказу ГП «КБ «Южное». Прототипом послужили датчики ПЗ19 и П419, разработанные АО «Элемент» гораздо ранее и в свое время включенные в Госреестр СИТ Украины.

1. Постановка задачи

Специфика стоящей перед АО «Элемент» задачи состояла в том, что:

– во-первых, надо было разработать датчик для измерения дифференциального давления ракетного топлива, являющегося химически агрессивной средой;

– во-вторых, относительно небольшой перепад давления – 10, 16, 20, 25 бар – надо было измерять на фоне изменения рабочего избыточного давления,

верхнее значение которого на порядок превышало измеряемое дифференциальное.

Диапазон рабочих температур был задан от минус 40 до плюс 85 °С с кратковременным повышением до 100 °С. Допускаемая основная приведенная погрешность нормировалась на уровне $\pm 0,25\%$, при этом особое внимание уделялось необходимости минимизировать дополнительную погрешность, возникающую от воздействия изменения рабочего избыточного давления (называемого также давлением в линии или линейным).

Требования к допускаемым пределам основной погрешности $\pm 0,25\%$ могут быть оценены как достаточно хороший уровень для датчика, предназначенного для работы в жестких условиях окружающей среды, но само по себе это требование в настоящее время не является проблематичным.

Гораздо более нестандартную задачу представляло требование минимизации дополнительной погрешности от воздействия рабочего избыточного давления. Этот параметр определяется характеристиками первичного преобразователя и в отличие от, например, нелинейности и температурной погрешности практически не поддается компенсации за счет обработки сигнала, описанной в [6] – для реализации подобной компенсации пришлось бы дополнительно организовать измерение линейного давления, то есть использовать еще по крайней мере один первичный преобразователь, что в рассматриваемом случае не представлялось приемлемым.

Следует отметить, что первоначально заказчик предпринял поиск на рынке готовых датчиков с нормированным выходным сигналом и в качестве наиболее подходящего варианта рассматривал датчики серии PDM-220 фирмы L'Esson Française Electronique, для которых было заявлено аэрокосмическое применение. Однако, анализ данных изготовителя показал, что для этих датчиков вообще не предусмотрено воздействие линейного давления, превышающего номинальное дифференциальное, то есть, если надо работать при линейном давлении 200 бар, то следует выбрать датчик с верхним пределом измерений дифференциального давления не менее 200 бар (с учетом нормированных рядов ближайшим пределом является 250 бар). Это означает, что предел измерений датчика более, чем на порядок превышает требуемый, соответственно, пределы приведенной погрешности вместо $\pm 0,25\%$ составят примерно $\pm 3\%$.

2. Решение задачи

В качестве первичного преобразователя с учетом имеющегося опыта разработки и изготовления упомянутых выше датчиков ПЗ19 и П419, а также

по результатам дополнительного информационного поиска, были выбраны сенсоры серии PD-10L фирмы Keller, представляющие собой кремниевый чувствительный элемент, смонтированный в герметичном корпусе-ячейке из нержавеющей стали – рис. 1.

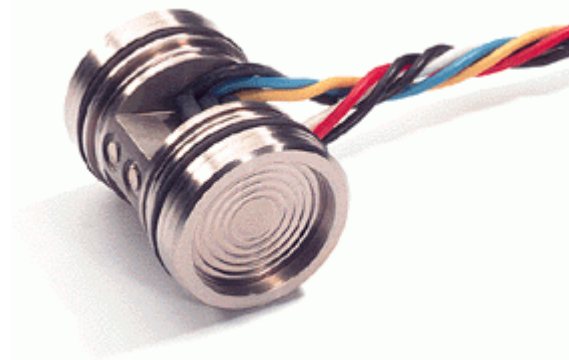


Рис. 1. Сенсор PD-10L фирмы Keller

Вопросы разработки вторичного преобразователя и конструкции корпуса, выходят за рамки настоящей статьи. Общий вид датчика, получившего шифр ПЗ19Ю-Д, показан на рис. 2, вес датчика не превышает 0,4 кг, габариты – 99х84х40 мм.



Рис. 2. Датчик ПЗ19Ю-Д

Для выбранных сенсоров PD-10L фирма Keller оговаривает (в отличие от многих других изготовителей) допустимость работы при воздействии линейного давления до 600 бар и нормирует пределы

дополнительной погрешности от этого воздействия на уровне $\pm 0,0125$ мВ/бар, что при полезном сигнале на диапазон 150...200 мВ составит в среднем $\pm 0,007$ %/бар. Такой допускаемый уровень означает, что при 150...200 бар линейного давления пределы дополнительной погрешности от его воздействия могут превысить пределы основной погрешности в четыре-шесть раз.

На практике для имевшихся в распоряжении АО «Элемент» сенсоров PD-10L дополнительная погрешность от воздействия линейного давления 200 бар (определяемая по изменению выходного сигнала датчика при отсутствии перепада давления, то есть по «смещению нуля») оказалась существенно меньше предельных значений и практически не превышала 0,5 %, а в большинстве случаев составляла $\pm 0,2 - 0,3$ %. Но уровень выше $\pm 0,2$ % был признан неприемлемым и это означало необходимость разбраковки (отбора), причем с относительно невысоким выходом годных.

При поиске более рационального решения, нежели отбор, по результатам консультаций с заказчиком выяснилось, что обеспечение минимальной погрешности необходимо не на всем диапазоне изменения линейного давления, но что наиболее ответственные измерения выполняются при воздействии давления 150 бар. Было предложено расширить допуск и вводить поправку на смещение нуля при линейном давлении 150 бар. По предварительным данным предполагалось, что наиболее существенной составляющей погрешности от воздействия линейного давления является смещение нуля, определение которого было включено в стандартный набор проверок датчика при выпуске.

Однако заказчик, будучи в целом согласен с использованием предлагаемой поправки, настаивал на проверке характеристик датчика при воздействии линейного давления во всем диапазоне измеряемого дифференциального давления от нуля 16 бар.

Такая проверка требовала специального оборудования, оснащенного средством измерительной техники, которое в лабораторных условиях на фоне воздействия линейного давления 150...166 бар обеспечило бы измерения дифференциального давления с погрешностью заведомо не хуже $\pm 0,1$ % в диапазоне от нуля до верхнего предела измерений (10, 16, 20, 25 бар – основные испытания проведены на образцах с верхним пределом 16 бар).

Оказалось, что несмотря на наличие весьма точных средств измерения избыточного и абсолютного давления, украинские центры метрологии и стандартизации в отношении дифференциального давления не располагают не только таким оборудованием в целом, но даже и отдельными средствами измерительной техники с подобными параметрами.

Заметим в скобках, что в процессе консультаций были даже предложения обеспечить точное измерение рабочего избыточного давления на одном и на другом входе датчика и затем вычислить разность. Разумеется, такой подход неприемлем, поскольку контролируемая разность будет на порядок и даже на два порядка (в зависимости от измеряемого значения) меньше, чем рабочее избыточное давление, а это значит, что и приведенная погрешность не только удваивается (за счет использования двух измерителей), но икратно увеличивается (за счет соотношения диапазонов).

Таким образом, АО «Элемент» вынужден был искать соответствующее средство измерительной техники и изготавливать специализированный стенд.

По результатам информационного поиска был выбран и приобретен измеритель DPT-10 фирмы WIKA, причем мы заказали изготовителю дополнительную градуировку при линейном давлении 160 бар, обеспечив тем самым погрешность, не превышающую требуемого значения $\pm 0,1$ %.

На базе измерителя DPT-10 изготовлен специализированный стенд, который позволил провести ряд исследований характеристик датчиков ПЗ19Ю-Д и обеспечить их градуировку в условиях, воспроизводящих наиболее ответственные измерения при эксплуатации, устранив тем самым дополнительную составляющую погрешности.

Для изготовленных датчиков ПЗ19Ю-Д были выполнены исследования характеристик через полтора года после градуировки (исследования выполнены без подстроек и регулировок), в процессе которых определялись:

- основная погрешность в диапазоне измерений дифференциального давления от нуля до 16 бар (1,6 МПа) на специализированном стенде (в отсутствие рабочего избыточного давления, то есть при $P_{\text{лин}} = 0$);

- основная погрешность в диапазоне измерений на манометре МП-60 (для сравнения);

- суммарная погрешность в диапазоне измерений на специализированном стенде при воздействии линейного давления 150...166 бар.

Исследования проводились в течение примерно полугода – периодически выполнялись измерения на прямом и обратном ходе при последовательном неоднократном нагружении. Типичные зависимости погрешности от измеряемого давления до 16 бар (1,6 МПа) на примере двух датчиков приведены на рис. 3 и 4, где дополнительно показаны границы допускаемой основной погрешности.

Рис. 3 иллюстрирует характеристики датчика, у которого от воздействия линейного давления 150 бар характеристика сместилась на 0,2 %, остав-

шись при этом в пределах допуска для основной погрешности.

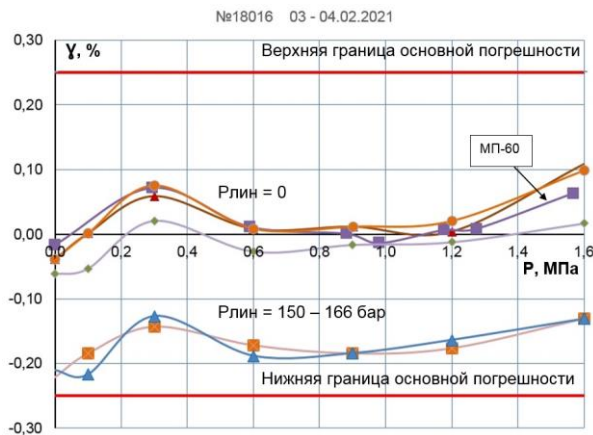


Рис. 3. Зависимость погрешности от измеряемого давления датчика №18016 (данные измерений за два дня через полтора года после градуировки)

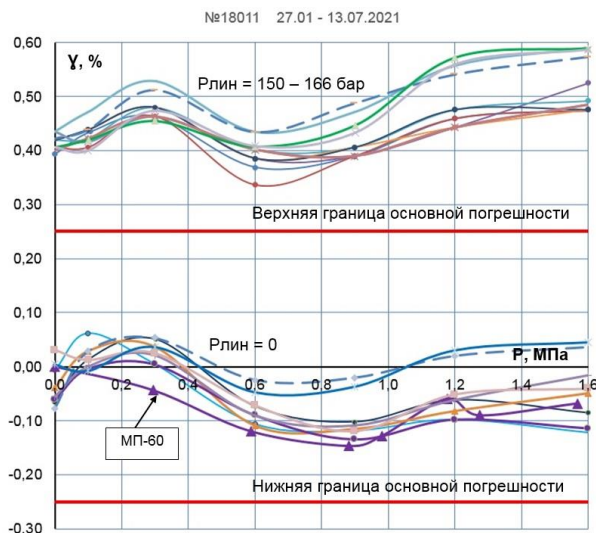


Рис. 4. Зависимость погрешности от измеряемого давления датчика №18011 (данные измерений за полгода через полтора года после градуировки)

На рис. 4 показаны характеристики датчика, у которого смещение более существенное – 0,5 % – и, как следствие, суммарная погрешность заметно превысила пределы допускаемой основной. Здесь приведены результаты ряда измерений, проведенных в течение полугода, что иллюстрирует «разброс характеристик» от измерения к измерению на достаточно протяженном отрезке времени. Очевидно, что этот разброс (внутри каждой из групп измерений при $R_{лин} = 0$ и при $R_{лин} = 150$ бар) несущественен по сравнению с диапазоном допускаемых значений основной погрешности.

На рисунках для сравнения отмечены графики, полученные при измерениях на грузопоршневом манометре МП-60.

В итоге по результатам исследований датчиков ПЗ19Ю-Д:

- подтверждена удовлетворительная стабильность характеристик в течение полутора-двух лет хранения – графики погрешностей при $R_{лин} = 0$ находятся в пределах границ основной погрешности;

- показано совпадение результатов измерений на манометре МП-60 и датчике DPT-10, при этом следует добавить, что еще ранее установлено совпадение результатов измерений на оборудовании АО «Элемент» и ГП «КБ «Южное»;

- установлено, что влияние рабочего избыточного давления выражается в практически параллельном смещении характеристики, то есть главная составляющая дополнительной погрешности – смещение нуля, а изменение чувствительности гораздо менее существенно.

На основании полученных результатов было признано приемлемым учитывать только смещение нуля и принято решение указывать в паспорте датчика наряду с номинальной функцией преобразования также и поправку на смещение при воздействии рабочего избыточного давления 150 бар (15 МПа).

Таким образом, функция преобразования приобрела вид:

$$P_i = (U_i - \Delta_{15} - U_H) \cdot P_B / (U_B - U_H), \quad (1)$$

где P_i и U_i – текущие значения измеряемого дифференциального давления и выходного сигнала;

P_B – значение верхнего предела измерений дифференциального давления (нижний предел равен нулю);

U_B и U_H – значения верхнего и нижнего пределов нормированного выходного сигнала равные 6,1 и 0,1 В соответственно.

К настоящему времени датчик ПЗ19Ю-Д прошел комплекс необходимых испытаний, по результатам которых документации присвоена литера «О».

Заключение

1. В рамках метрологического обеспечения разработки и изготовления датчика дифференциального давления аэрокосмического применения в АО «Элемент»:

- создан стенд, обеспечивающий градуировку и проверку параметров датчика в диапазоне изменения дифференциального давления от нуля до 16 бар с погрешностью не более $\pm 0,1$ % в условиях воздействия рабочего избыточного давления до 150 – 166 бар (с потенциально возможным расширением до 400 бар);

– на основании информационного поиска и имеющегося опыта выбраны первичные преобразователи и выполнены экспериментальные исследования их характеристик, в том числе дополнительной погрешности от воздействия рабочего избыточного давления, на порядок превышающего верхний предел измерений дифференциального давления.

2. По результатам выполненного совместно с заказчиком анализа требований к применению разработанного датчика выбран рациональный способ представления функции преобразования, минимизирующий погрешность измерений в наиболее ответственных условиях.

3. Экспериментально подтверждена стабильность характеристик разработанных датчиков в течение двух лет в пределах требований к основной погрешности $\pm 0,25\%$, в том числе после многократных нагружений измеряемым и рабочим избыточным давлением.

Литература

1. Критерии и результаты оценки надежности датчиков давления для авиационных двигателей [Текст] / А. Г. Буряченко, Н. П. Волошина, Г. С. Ранченко, Ж. Деклама // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2004. – № 7 (15). – С. 158–161.

2. Буряченко, А. Г. Виброкомпенсированный высокотемпературный датчик переменного давления для малоэмиссионных ГТД [Текст] / А. Г. Буряченко, Г. С. Ранченко, Дж. Чиверс // *Датчики и системы*. – 2007. – № 10. – С. 38–41.

3. Буряченко, А. Г. Результаты исследования параметрической надежности авиационных датчиков давления [Текст] / А. Г. Буряченко, Г. С. Ранченко, С. М. Рябоконь // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2013. – № 8 (105). – С. 240–245.

4. Опыт и результаты сертификационных испытаний интеллектуальной системы измерения давления двигателя Д-436-148 самолета Ан-148 [Текст] / В. М. Грудинкин, А. Г. Буряченко, В. Ф. Миргород, М. В. Драпак // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2007. – № 7 (43). – С. 18–22.

5. Буряченко, А. Г. Регулятор для двигателя MS-500 – разработка, испытания, сертификация [Текст] / А. Г. Буряченко, Г. С. Ранченко, А. О. Таранишин // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2021. – № 4 (174). – С. 87–92. DOI: 10.32620/aktt.2021.4sup2.11.

6. Буряченко, А. Г. Технические и алгоритмические средства повышения метрологического уровня и надежности датчиков и систем измерения давления [Текст] / А. Г. Буряченко, В. М. Грудинкин // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2005. – № 8 (24). – С. 195–199.

References

1. Buryachenko, A. G., Voloshina, N. P., Ranchenko, G. S., Deklama, Zh. Kriterii i rezul'taty otsenki nadezhnosti datchikov davleniya dlya aviatsi-onnykh dvigatelei [Criteria and results for assessing the reliability of pressure sensors for aircraft engines]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya – Aerospace technic and technology* 2004, no. 7 (15), pp. 158–161.

2. Buryachenko, A. G., Ranchenko, G. S., Chivers, Dzh. Vibrokompensirovannyi vysokotemperaturnyi datchik peremennogo davleniya dlya maloemissionnykh GTD [Vibration-compensated high-temperature variable pressure sensor for low-emission gas turbine engines]. *Datchiki i sistemy – Sensors and systems*, 2007, no. 10, pp. 38–41.

3. Buryachenko, A. G., Ranchenko, G. S., Rjabokon', S. M. Rezul'taty issledovaniya parametricheskoi nadezhnosti aviatsionnykh datchikov davleniya. [The results of the study of the parametric reliability of aviation pressure sensors]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya – Aerospace technic and technology*, 2013, no. 8 (105), pp. 240–245.

4. Grudinkin, V. M., Buryachenko, A. G., Mirgorod, V. F., Drapak, M. V. Opyt i rezul'taty sertifikatsionnykh ispytaniy intellektual'noi sistemy izmereniya davleniya dvigatelya D-436-148 samoleta An-148. [Experience and results of certification tests of the intelligent system for measuring the pressure of the D-436-148 engine of the An-148 aircraft]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya – Aerospace technic and technology*, 2007, no. 7 (43), pp. 18–22.

5. Buryachenko, A. G., Ranchenko, G. S., Taraniшин, A. O. Regulyator dlya dvigatelya MS-500 – razrabotka, ispytaniya, sertifikatsiya [Regulator for the MS-500 engine - development, tests, certification]. *Aviacijno-kosmichna tekhnika i tekhnologiya – Aerospace technic and technology*, 2021, no. 4 (174), pp. 87–92. DOI: 10.32620/aktt.2021.4sup2.11.

6. Buryachenko, A. G., Grudinkin, V. M. Tekhnicheskie i algoritmicheskie sredstva povysheniya metrologicheskogo urovnya i nadezhnosti datchikov i sistem izmereniya davleniya. [Technical and algorithmic means of increasing the metrological level and reliability of sensors and pressure measuring systems]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya – Aerospace technic and technology*, 2005, no. 8 (24), pp. 195–199.

РОЗРОБКА ДАТЧИКА ДИФЕРЕНЦІЙНОГО ТИСКУ ДЛЯ АВІАКОСМІЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ. МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ І ВИБІР ПЕРВИННОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

А. Г. Буряченко

Наведено основні вимоги до датчика диференціального тиску, розробленого АТ «Елемент» на замовлення ДП «КБ «Південне». Показано, що найбільш істотними критеріями при виборі первинного перетворювача були вимоги, по-перше, щодо контролю тиску хімічно агресивного середовища – ракетного палива, та, по-друге, виконання вимірювань порівняно невеликого диференціального тиску в умовах впливу робочого надлишкового (лінійного) тиску, верхня межа змін якого на порядок перевищує межу вимірюваного диференціального, при цьому необхідно мінімізувати додаткову похибку, обумовлену впливом робочого надлишкового тиску. Наведено дані інформаційного пошуку, в результаті якого обрані первинні перетворювачі, що найбільше задовольняють заданим вимогам, а саме сенсори серії PD-10L фірми Keller. Коротко описаний датчик, розроблений та виготовлений на базі обраного первинного перетворювача. Основна увага приділена опису метрологічного забезпечення розробки та випробувань датчика та результатам експериментальних досліджень його характеристик щодо довготривалої стабільності та впливу робочого надлишкового тиску на вихідний сигнал при зміні контрольованого диференціального тиску в діапазоні вимірювань. Наведено відомості про створення спеціалізованого стенду для дослідження згаданого впливу, оснащеного імпортованим вимірником, який забезпечив контроль диференціального тиску від нуля до 16 бар за умов впливу робочого надлишкового тиску 150...166 бар із похибкою не більше $\pm 0,1$ %. Пояснено, що необхідність створення стенду на підприємстві обумовлена відсутністю такого обладнання та засобів вимірювальної техніки в українських центрах метрології та стандартизації. За результатами виконаного спільно із замовником аналізу вимог до застосування розробленого датчика обраний раціональний спосіб представлення функції перетворення, що мінімізує похибку вимірювань у найбільш відповідальних умовах.

Ключові слова: диференціальний тиск; усунення нуля від впливу робочого надлишкового тиску; довготривала стабільність.

DEVELOPMENT OF A DIFFERENTIAL PRESSURE TRANSDUCER FOR AVIATION. METROLOGICAL SUPPORT AND SELECTION OF THE PRIMARY TRANSFORMER

Anna Buryachenko

The main requirements for the differential pressure sensor developed by JSC "Element" by SE "DB" Yuzhnoye" order are given. It is shown that the most important criteria when choosing a primary transducer were the requirements, firstly, to control the pressure of chemically aggressive medium – rocket fuel, and secondly, to perform measurements of relatively low differential pressure under operating overpressure (linear) pressure. The upper limit of changes in linear pressure is an order of magnitude higher than the limit of the measured differential, and it is necessary to minimize the additional error due to the effect of operating overpressure. Information search data are given, because of which the primary transducers that best meet the specified requirements are selected, namely, Keller PD-10L series sensors. A sensor developed and manufactured on the basis of the selected primary transducer is briefly described. The main attention is paid to the description of metrological support of transducer development and testing and the results of experimental studies of its characteristics in terms of long-term stability and the effect of operating overpressure on the output signal when changing the controlled differential pressure in the measurement range. The given information concerns the creation of a specialized stand for the study of this effect, equipped with an imported meter that provides control of differential pressure from zero to 16 bar under the influence of operating overpressure 150...166 bar with an error of not more than $\pm 0,1$ %. It is explained that the need to create a stand at the enterprise is due to the lack of such equipment and measuring equipment in the Ukrainian centers of metrology and standardization. Based on the results of the analysis of requirements for the application of the developed sensor performed together with the customer, a rational way of presenting the transformation function was selected, which minimizes the measurement error in the most responsible conditions.

Keywords: differential pressure; zero offset from the action of operating overpressure; long-term stability.

Буряченко Анна Григорьевна – главный метролог АО «Элемент», Одесса, Украина.

Anna Buryachenko – Chief Metrologist of JSC "Element", Odesa, Ukraine,
e-mail: annaodessa55@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4480-6965.