

УДК 681.121

Л.А. Витвицкая, Н.Н. Пиндус

Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа

АНАЛИЗ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ВЕЩЕСТВА ВИХРЕВЫМ МЕТОДОМ

Осуществлен анализ факторов влияния на неопределенность измерения при вихревом методе измерения расхода. Рассчитана неопределенность при измерении расхода газа и жидкости, а также при наличии в потоке механических примесей.

вихревой расходомер, неопределенность, факторы влияния, пульсации

В настоящее время измерения расхода жидких и газообразных сред все более широкое применение находят вихревые расходомеры, что связано с их высокой точностью и надежностью. Вихревые расходомеры таких фирм, как Foxboro, Fisher and Porter, Eatch, Neptune (США), Yokogawa (Япония), Endress-Hauser (Германия) надежные, долговечные, допускают перегрузку, работают с жидкостями, газами и паром при температурах до 200 °С при погрешности измерения 1,5%.

Направление развития вихревого метода измерения расхода способствует улучшению метрологических и эксплуатационных характеристик приборов, созданию устройств с автоматической коррекцией характеристик по вязкости и температуре измеряемой среды на основе применения микропроцессорной техники и с использованием как дополнительных датчиков температуры и вязкости, так и

информативных свойств дорожки Кармана.

В статье рассмотрен вопрос расчета ожидаемой неопределенности измерения вихревым методом путем анализа внутренних и внешних факторов влияния на процесс измерения. Основным недостатком вихревого расходомера обтекания является недостаточный уровень восприятия измерительной величины в области малых скоростей. Очевидно, что уровень восприятия зависит от характеристик всех компонент системы измерений. Однако минимальная скорость потока, которая воспринимается расходомером, определяется, в основном, чувствительностью первичного преобразователя и способом передачи к нему энергии регулярных пульсаций [1]. В большинстве случаев воспринимаются колебания механических элементов. При малых скоростях потока эти механические элементы маловосприимчивы к изменениям давления или скорости потока.

Рассмотрим вихревой расходомер с расширенным динамическим диапазоном измерения в области малых скоростей и чисел Рейнольдса. При любом типе первичного преобразователя, который используется, чувствительность вихревого расходомера растет с увеличением скоростей. Поэтому эффективность вихревого расходомера характеризуется в основном нижней границей динамического диапазона измерения. На нижний порог воспринимаемой скорости осуществляют влияние параметры всех функциональных блоков системы измерения. К ним относятся формирования структуры набегающего потока; генерация регулярных вихрей; передача энергии регулярных вихреобразований чувствительному элементу; первичное превращение и обработка первичного сигнала.

Обычно перед участком измерения расхода в магистрали имеет место поток с развитым трубным профилем скорости. Было проведено экспериментальное исследование процесса вихреобразования при поперечном обтекании кругового цилиндра и плоской пластины развитым турбулентным потоком в трубе. В результате исследований обнаружено, что несмотря на ограниченность течения и неравномерность профиля скорости, характерная частота вихреобразования остается неизменной по всей длине тела обтекания, которое побочно свидетельствует о формировании цельных поперечных вихрей Кармана. Это предположение было подтверждено серией двухточечных измерений скорости потока вблизи кромки пластины, которая является кондуктометрическим чувствительным элементом расходомера [6]. Согласно с обнаруженной картиной формирования вихрей, частота вихреобразования в основном определяется высокоскоростным потоком в центральной части трубы. Под эту частоту подстраиваются пульсации потока и в периферийных областях непосредственно за телом обтекания. Очевидно, что на подстраивание по частоте тратится часть энергии пульсаций потока в центральной области следа. Потому амплитуда пульсаций параметров потока за телом обтекания будет тем более высокая, чем более равномерный профиль скорости набегающего потока.

Проведены экспериментальные исследования влияния суживающей вставки на характеристики потока перед телом обтекания. Вставка представляет собой специальную втулку, которая уменьшает местное поперечное пересечение трубы в области расположения тела обтекания. Входные и выходные кромки вставки округлены. Длина вставки составляла 2,5...3 ее внутреннего диаметра, а сам внутренний диаметр – 0,8 от диаметра трубы. Подтверждено как выравнивающее действие вставки на профиль скорости, так и заметное уменьшение уровня пульсаций скорости (приблизительно в два раза). Выравнивающее действие вставки выразительно оказалось также в улучшении отношения сигнал/шум в составе вихревого расходомера. Как уже указывалось, передача энергии регулярных вихревых образова-

ний к чувствительному элементу, а в нашем случае это контактно кондуктометрический преобразователь, осуществляется с помощью канала перетекания, выполненного в теле обтекания. Защитная функция канала перетекания построена на инерционном отделении частиц примесей, которые содержатся в набегающем потоке, от газовой или жидкой фазы [6].

При исследовании характеристик вихревых расходомеров учитывалось как число Рейнольдса Re , так и число или критерий Струхала Sh . Так как при постоянном числе Sh частота вихрей пропорциональна скорости, то, измеряя эту частоту, можно говорить о скорости, а значит и об объемном расходе потока. Чтобы обеспечить пропорциональность между расходом и частотой (для получения линейной шкалы вихревого расходомера), число Струхала должно оставаться неизменным в возможно большей области значений числа Re . Расходомер с цилиндрическим обтекающим телом может иметь диапазон измерения $Q_{max}/Q_{min} = 20$. Но такой диапазон может иметь место в том случае, если при Q_{min} скорость в трубе будет достаточна и обеспечит стойкое вихреобразование. Для расходомеров с цилиндрическим телом обтекания наилучшим является отношение $d/D = 0,15 - 0,25$.

Вихревые расходомеры могут иметь большую неопределенность при измерении пульсирующих потоков, если частота срыва вихрей f_v синхронизируются с частотой f_n пульсации потока. При сравнительно небольшой относительной пульсации скорости потока $(v_{max} - v_c)/v_c$ от 0,089 до 0,117 погрешность вихревого расходомера достигает $\pm 40\%$ при $f_v = f_n / 2$. Для данных расходомеров допустимы лишь пульсации потока, частота которых не превышает 25% от наименьшей частоты срыва вихрей из тела обтекания [5].

На точность показов вихревых расходомеров влияет несимметричность профиля трубопровода, а также несоблюдение нужной длины прямых участков до и после расходомера в соответствии с [4]. В таком случае перед прибором устанавливают выпрямитель потока, который ограничивает указанные неопределенности. Рассмотрим неопределенность, которая возникает при измерении пульсирующих расходов. Наиболее очевидным источником неопределенности измерения пульсирующей затраты есть квадратичная зависимость между затратой и перепадом давления в суживающем устройстве. Поскольку тело обтекания создает сопротивление потока, то его можно рассматривать как суживающее устройство. Первичный преобразователь из-за своей инерции за время t_0 покажет усредненный перепад давления, корень квадратный из которого больше средней величины корней квадратных из мгновенных значений перепада Δp . Откуда и возникает дополнительная неопределенность $u_{Q_{cp}}$ измерения среднего значения пульсирующего расхода. Эта неопределенность зависит от

формы и амплитуды пульсаций. При гармоничном законе хода пульсаций относительная неопределенность не превышает 1%.

Во всех случаях неопределенность из-за квадратичной зависимости имеет положительный знак, однако ее численное значение определяется формой и частотой пульсаций [2].

Попытка оценить влияние местного ускорения только числом Струхаля без учета амплитуды пульсаций приводит к неопределенным и неоднозначным выводам. Рекомендуются $Sh < 0,002$, в то время в ряде работ указывается, что лишь при $Sh > 1$ возникает значительная неопределенность [3]. Отметим, что обычно по частоте в зоне от 0,5 до 20 Гц число Струхаля лежит как раз в границах от 0,002 до 1. По данным [3] неопределенность измерения пульсирующего расхода не превышает 0,7 – 0,9% при коэффициенте пульсации $a = 0,2$ и частотах, которые были при исследовании. При измерении пульсирующего расхода жидкости возникают меньшие неопределенности, чем при измерении расхода газа. Так, не была обнаружена неопределенность при коэффициентах пульсации затраты воды от 0,2 до 0,8 и частотах от 12 до 50 Гц. Поскольку составная неопределенности определяется факторами, которые невозможно исследовать путем многократных измерений, то целесообразно оценку влияния этих факторов осуществлять используя неопределенности типа В в большей степени с равномерным законом распределения.

Границы смещения показаний расходомера за счет вибрации трубопроводов составляют $0,015 \text{ м}^3/\text{с}$. Тогда, согласно с равномерным распределением, получим

$$u_1^2(q) = \frac{(2 \cdot 0,015)^2}{12} = 7,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Границы смещения при влиянии атмосферных явлений составляют $0,001 \text{ м}^3/\text{с}$. Соответствующая стандартная неопределенность

$$u_2^2(q) = \frac{(2 \cdot 0,001)^2}{24} = 0,017 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Границы смещения за счет действия местных сопротивлений составляют $0,005 \text{ м}^3/\text{с}$. Соответствующая стандартная неопределенность

$$u_3^2(q) = \frac{(2 \cdot 0,005)^2}{12} = 0,83 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Границы смещения показаний вихревого расходомера за счет неодинаковости размеров и шероховатости поверхности тела обтекания составляют $0,015 \text{ м}^3/\text{с}$. Тогда получим согласно треугольному закону распределения

$$u_4^2(q) = \frac{(2 \cdot 0,015)^2}{24} = 3,75 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Границы смещения при наличии механических примесей в жидкости составляют $0,001 \text{ м}^3/\text{с}$. Соответствующая стандартная неопределенность

$$u_5^2(q) = \frac{(2 \cdot 0,001)^2}{12} = 0,033 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Границы смещения за счет пульсации потока составляют $0,002 \text{ м}^3/\text{с}$. Тогда получим

$$u_6^2(q) = \frac{(2 \cdot 0,002)^2}{12} = 0,13 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Неопределенность преобразователя, вызванная смещением показаний при калибровании пластины, была определена по типу А путем многократного определения амплитуды ее колебаний при разных значениях расхода, которые подаются через генератор расхода с помощью градуировочной установки. По экспериментальным данным, приведенным в [6], данная неопределенность составляет

$$u_7^2(q) = 3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Неопределенность преобразователя, вызванная его старением, которая рассчитана через границы смещения $0,001 \text{ м}^3/\text{с}$ по вероятностно ожидаемым результатам после трехлетней эксплуатации, составляет

$$u_8^2(q) = \frac{(2 \cdot 0,001)^2}{36} = 0,011 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Суммарная стандартная неопределенность измерения расхода будет равна

$$u(\bar{q}) = \sqrt{\sum_{i=1}^8 u_i^2(q)} = \sqrt{46,656 \cdot 10^{-5}} = 2,16 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Относительная суммарная неопределенность при максимальном расходе $Q_{\max} = 0,27 \text{ м}^3/\text{с}$ ($1000 \text{ м}^3/\text{час}$) равна $\delta_u = \frac{2,16 \cdot 10^{-3}}{0,27} = 0,8\%$.

Список литературы

1. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества: Справочник: Кн.2 / Под общ. ред. Е. А. Шорникова. – С.-Пб.: Политехника, 2004. – 412 с.
2. Киясбейли А. Ш., Перельштейн М.Е. Вихревые измерительные приборы. – М.: Машиностроение, 1978. – 152 с.
3. Писарец А. В. Анализ современного состояния вихревых средств измерения количества вещества // Сб. тр. между. НТК "Приборостроение 2001", Вестник Черкасского инженерно-технологического института. – 2001. – С. 53-56.
4. Маштаков Б. П., Грикевич А. В. Вихревые расходомеры с телом обтекания. Перспективы вихревой расходомерии // Приборы и системы управления. – 1990. – N 12. – С. 24-26.
5. Козлов А.П., Кратиров Д.В., Михеев Н.И., Молочников В.М. Процесс вихреобразования при поперечном обтекании пластины в ограниченном турбулентном потоке // Теплофизика и аэромеханика. – 1998. – Т. 5, № 4. – С. 593 - 596.
6. Витвицька Л.А, Климишин С.І. Малорасходный вихревой расходомер // Методы и приборы контроля качества. – Ивано-Франковск. – 2006. – Вып. 16. – С. 57-60.

Поступила в редколлегию 27.04.2007

Рецензент: канд. техн. наук, доц. А.Б. Егоров, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.