Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal https://esj.today
2024, Том 16, № 5 / 2024, Vol. 16, Iss. 5 https://esj.today/issue-5-2024.html
URL статьи: https://esj.today/PDF/23SAVN524.pdf
DOI: 10.15862/23SAVN524 (https://doi.org/10.15862/23SAVN524)
2.1.3. Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:
Кубенин, А. С. Об алгоритмах самодиагностики ультразвукового расходомера / А. С. Кубенин, В. Г. Гагарин, Н. В. Павленко, Д. П. Алексеев // Вестник евразийской науки. — 2024. — Т. 16. — № 5. — URL: https://esj.today/PDF/23SAVN524.pdf. DOI: 10.15862/23SAVN524

For citation:
Kubenin A.S., Gagarin V.G., Pavlenko N.V., Alekseev D.P. About the algorithms of self-diagnosis of the ultrasonic flow meter. *The Eurasian Scientific Journal*. 2024;16(5): 23SAVN524. Available at: https://esj.today/PDF/23SAVN524.pdf. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.15862/23SAVN524

Кубенин Александр Сергеевич
ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук», Москва, Россия
Ведущий научный сотрудник
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Москва, Россия
Кандидат технических наук
E-mail: kube-n@mail.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=935093

Гагарин Владимир Геннадьевич
ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук», Москва, Россия
Заведующий лабораторией
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Москва, Россия
Доктор технических наук, профессор
E-mail: gagarinvg@yandex.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=292976

Павленко Наталья Викторовна
ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук», Москва, Россия
Старший научный сотрудник
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Москва, Россия
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: nv-pavlenko@mail.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=556985

Алексеев Дмитрий Павлович
ООО «СовТИГаз», Москва, Россия
Главный специалист
E-mail: alekseev210@yandex.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=687192

Об алгоритмах самодиагностики ультразвукового расходомера

Аннотация. В современной промышленности, особенно в газоснабжении, как нигде важна точность учета расхода газа, транспортируемого по газопроводам. Небольшая, на первый взгляд, ошибка в измерении расхода газа способна в конечном итоге стать причиной больших финансовых потерь при поставках и продажах газа. Для учета расхода газа в настоящее время

все большую популярность приобретают ультразвуковые расходомеры. Не имеющие механически подвижных, а также газодинамически нагруженных в потоке конструктивных элементов, такие измерители расхода являются надежными, долговечными, легко обслуживаемыми и позволяют с приемлемой для промышленности точностью вычислять объемный и массовый расходы в коммерческом учете газа. Во время функционирования на газораспределительных станциях ультразвуковые расходомеры, являющиеся частью трубопроводной системы, также постепенно загрязняются. На стенках корпуса УЗПР появляются отложения примесей и ржавчины. Такие загрязнения могут стать причиной ухудшения работы измерительного прибора и стать причиной дополнительной неточности в измерении расхода газа. Кроме того, необходимо обеспечивать корректную работу расходомера при отказе одного или нескольких ультразвуковых датчиков. В работе описаны основные способы диагностики работы ультразвукового расходомера. Приводятся параметры и выражения для их расчета, необходимые для проведения мониторинга работы расходомера в режиме реального времени. В статье описаны некоторые общие принципы различных алгоритмов диагностики УЗПР, а также предложен вариант вычисления необходимых параметров в алгоритме компенсации сбоя луча при отказе работы ультразвукового преобразователя, основанный на применении методов вычислительной газодинамики. Авторами приведены значения параметров потока, которые могут быть использованы в алгоритмах компенсации сбоя луча. Авторами построены функциональные зависимости этих параметров от числа Рейнольдса и приведены коэффициенты полиномов, аппроксимирующих эти зависимости. Предложенный способ вычисления соотношений скоростей посредством компьютерного моделирования позволяет сократить сроки разработки расходомеров и обеспечивает более гибкий подход к их проектированию.

Ключевые слова: газоснабжение; ультразвуковой расходомер; вычислительная газодинамика; компьютерное моделирование; профиль фактор; усиление; сигнал; диагностика

Введение

Измерение расхода имеет важное значение в области машиностроения [1–3]. В современной промышленности, особенно в газоснабжении, как нигде важна точность учета расхода газа, транспортируемого по газопроводам. Небольшая, на первый взгляд, ошибка в измерении расхода газа способна в конечном итоге стать причиной больших финансовых потерь при поставках и продажах газа. Устройства для измерения расхода отличаются принципом действия и имеют свои плюсы и минусы. В качестве расходомера могут быть использованы турбинные счетчики, диафрагмы, электромагнитные и вихревые устройства.

В настоящее время для измерений объема природного газа, прокачиваемого по трубопроводам, становится все более популярным использование ультразвуковых преобразователей расхода (УЗПР) в измерительных узлах, поскольку такие устройства обладают рядом преимуществ, таких как: бесконтактный режим работы, минимальные потери давления и высокая точность [4–6]. Принцип работы таких измерителей расхода описан, например в [7; 8].

Во время функционирования на газораспределительных станциях ультразвуковые расходомеры, являющиеся частью трубопроводной системы, также постепенно загрязняются. На стенках корпуса УЗПР появляются отложения конденсата и примесей от природного газа [9]. Такие отложения, а также возможная коррозия внутренних стенок трубопровода изменяют внутренний диаметр УЗПР и, как следствие, приводят к изменениям расстояний, которые проходят ультразвуковые волны. В свою очередь, не учтенное изменение дистанций прохождения ультразвуковых волн влечет за собой изменение времен прохождения от

23SAVN524
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

источника сигнала до приемника, а значит напрямую влияет на измеряемую скорость потока газа. Кроме того, во время работы УЗПР могут случиться какие-либо аварийные ситуации, связанные с выходом из строя ультразвукового преобразователя, что также скажется на точности измерений. Поэтому очень важно своевременно узнавать об отклонении работы УЗПР от нормативных показателей и предпринять необходимые действия к исправлению ситуации [10].

В этом контексте важнейшую роль приобретают системы мониторинга и анализа текущего состояния прибора. Такие системы строятся программно в виде алгоритмов самодиагностики и располагаются в блоках электронного управления расходомером. В статье описаны некоторые общие принципы различных алгоритмов диагностики УЗПР, а также предложен вариант вычисления необходимых параметров в алгоритме компенсации сбоя луча при отказе работы ультразвукового преобразователя.

Алгоритмы диагностики

Алгоритмы диагностики можно разделить на две основные группы. К первой группе относятся алгоритмы, позволяющие получать информацию о потоке газа через расходомер, а также о реакции расходомера на проходящий через него поток. Ко второй группе принадлежат алгоритмы, относящиеся к ультразвуковым преобразователям, и позволяют получать информацию и контролировать работоспособность преобразователей.

Для мониторинга работы ультразвуковых преобразователей используются следующие параметры: усиление, соотношение сигнала и шума, время прохождения ультразвуковой волны. На схеме (рис. 1) показаны средние диапазоны величин этих параметров, чаще всего использующиеся при работе УЗПР.

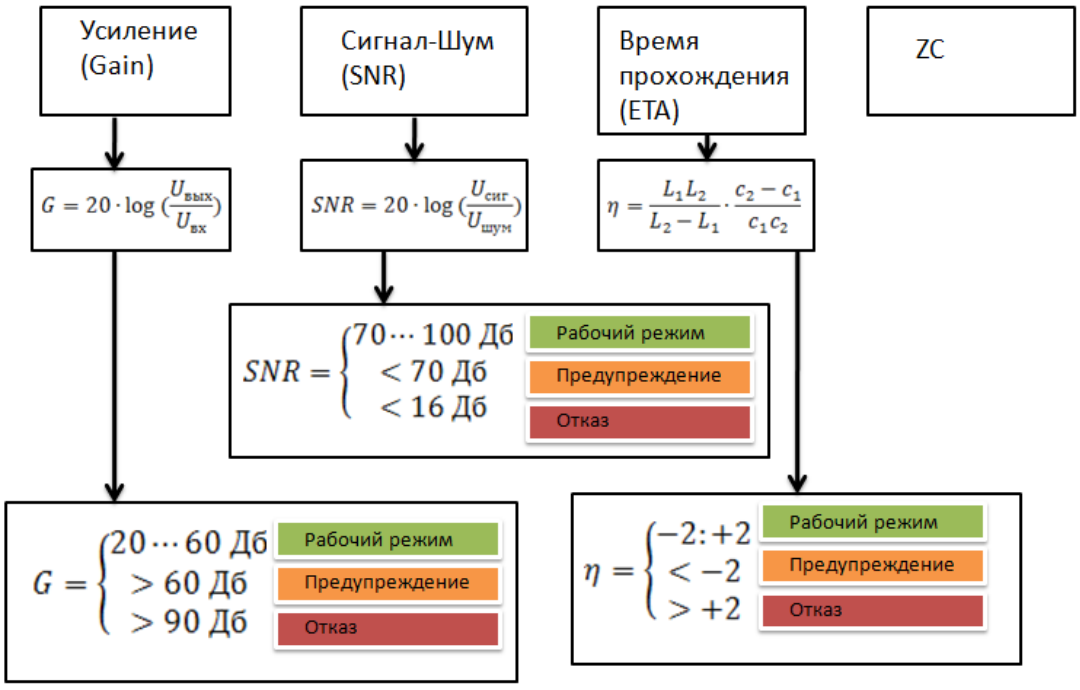


Рисунок 1. *Основные параметры диагностики работы ультразвуковых датчиков (разработано авторами)*

Параметры усиление, сигнал-шум и время прохождения сводятся к одному параметру, называемому производительность и в совокупности, позволяют судить о текущем состоянии ультразвуковой системы (рис. 2).

23SAVN524
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

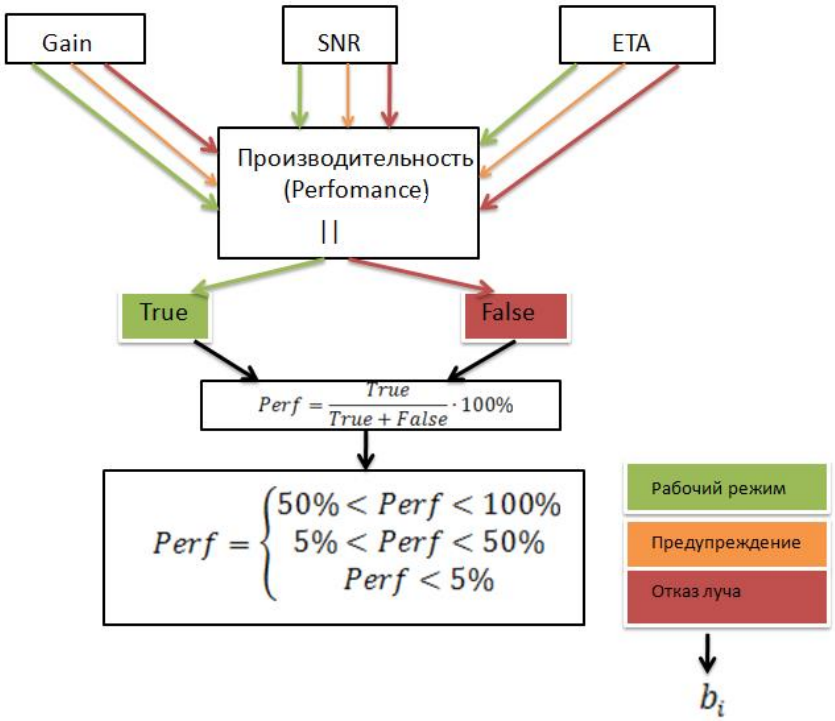


Рисунок 2. *Блок-схема сведения параметров диагностики производительности (разработано авторами)*

Усиление сигнала (Gain). Для контроля качества сигнала и исправности ультразвуковых приемопередатчиков необходимо отслеживать изменения параметра Gain (усиление сигнала). Схема расчета параметра усиления сигнала Gain:

Входные параметры: $U_{вых}$, $U_{вх}$.

Усиление: $G = 20 \cdot \log\left(\frac{U_{вых}}{U_{вх}}\right)$.

Отклонение параметра Gain не должно обычно превышать 10–12 Дб для каждого луча. Рабочий диапазон значений Gain обычно принимается в пределах от 20 до 60 Дб. Предельное значение Gain принять 90–93 Дб.

Данный параметр применяется при диагностики следующих факторов: загрязнение приемопередатчиков, неисправность приемопередатчиков, электроники, кабелей; повышенная чувствительность приемопередатчика из-за пониженного давления. Колебания чувствительности указывает на низкое качество принимаемого сигнала.

Сигнал-шум (SNR). Для контроля шумовых помех и исправности ультразвукового приемопередатчика необходимо отслеживать изменения параметра SNR (соотношение сигнал-шум).

Входные параметры: $U_{сиг}$, $U_{шум}$.

Соотношение сигнала и шума: $SNR = 20 \cdot \log\left(\frac{U_{сиг}}{U_{шум}}\right)$.

Значение параметра SNR не должно быть ниже предельного значения 13–16 Дб. Рабочий диапазон значений SNR обычно принимается в пределах от 70 до 100 Дб. В случае, когда параметр SNR выходит из рабочего диапазона, целесообразно применить так называемый стекинг сигнала. При стекинге сигналы суммируются. В результате чего амплитуда случайного шума относительно амплитуда сигнала остается на низком уровне.

23SAVN524
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Данный параметр применяется при диагностики следующих факторов: шумовые помехи из-за не полностью открытых вентилей или наличия шума вблизи места измерения (при стабильной чувствительности приемопередатчиков); неисправность приемопередатчиков; пониженное значение SNR, а также чувствительности приемопередатчика совместно с повышенным количеством недействительных (бракованных/параметр Perfomance) измерений может свидетельствовать о неисправности приемопередатчика или о наличии шума поблизости.

Производительность (Perfomance). Показывает долю принятых сигналов, отвечающих критериям приема (процент полученных сигналов, используемых для расчета). Рабочий диапазон по производительности обычно принимается равным в пределах от 75 до 100 %. А предельное значение для активации предупреждения 50 %.

Если производительность на луче опускается ниже предельного минимального значения в 5 % необходимо исключить луч из расчета скорости.

Данный параметр применяется при диагностики следующих факторов: дополнительные источники шума, скорость газа вне измеряемого диапазона.

Функция ETA (расчетное время прибытия). Для диагностики корректности измерений времени прохождения сигналом любых хорд используется функция ETA, основанную на расчете скорости звука и двух различных длин хорд (лучей).

Расчет функции ETA проводится согласно следующему алгоритму:

Входные параметры: $L_i, t_{1i}, t_{2i}, n.$

Измеренная скорость звука: $c_i = \frac{L_i}{2}(\frac{1}{t_{1i}} + \frac{1}{t_{2i}})$ $(i = 1 \cdots n)$.

ETA-функция: $\eta = \frac{L_1 L_2}{L_2 - L_1} \cdot \frac{c_2 - c_1}{c_1 c_2}$.

Где индекс $i = 1$ означает внешний (короткий луч), а индекс $i = 2$ — внутренний (длинный) луч. Рабочие значения функции ETA, при которых отсутствует ошибка времени прохождения, составляют $\eta = 0$ + -2 мксек.

Данный параметр применяется как дополнительный контроль корректности измерений.

Следующие параметры относятся к категории мониторинга потока.

Скорость звука по лучам. Необходимо контролировать отклонение измеряемой скорости звука вдоль каждого луча от теоретического значения скорости звука при текущих условиях, а также отклонение между текущей измеренной скоростью звука на луче от среднего значения скорости звука, рассчитанного для всех лучей. Дополнительно необходимо контролировать отклонение измеренных скоростей звука между лучами. Расчет теоретического значения скорости звука для актуального состава газа, температуры и давления проводится согласно ГОСТ. А расчет измеряемой скорости звука — согласно алгоритму:

Входные параметры: $L_i, t_{1i}, t_{2i}, P, T, MC, n.$

Измеренная скорость звука: $c_i = \frac{L_i}{2}(\frac{1}{t_{1i}} + \frac{1}{t_{2i}})$ $(i = 1 \cdots n)$.

Измеренная средняя скорость звука: $\bar{c} = \sum_i^n c_i$ $(i = 1 \cdots n)$.

Теоретическая скорость звука (расчет согласно ГОСТ): $c_{ti}(P, T, MC)$.

Где i — номер луча; n — количество лучей; L_i, t_{1i}, t_{2i} — длины лучей, время прохождения сигнала в прямом и обратном направлениях соответственно; P, T, MC — текущие давление, температура и компонентный состав смеси соответственно; c_i, c_{ti} — измеренная и теоретическая скорости звука, $\bar{c}$ — среднее значение скорости звука по всем лучам.

23SAVN524
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Расчет отклонений проводится по следующей формуле:

$$\Delta_{1i} = \frac{c_i - c_{ti}}{c_{ti}} \cdot 100\ \%.$$

$$\Delta_{2i} = \frac{c_i - \bar{c}}{\bar{c}} \cdot 100\ \%.$$

Отклонение Δ_{1i} измеренной скорости звука c_i от теоретической c_{ti} не должно превышать 0,3 % для каждого луча. Отклонение Δ_{2i} измеренной скорости звука c_i от среднего значения скорости звука $\bar{c}$, рассчитанного для всех лучей, не должно превышать 0,2 %. Отклонение значений SOS между лучами не должен превышать 0,3 м/с.

Данный параметр применяется при диагностики следующих факторов: проверка корректного измерения времени прохождения сигнала, а также:

- неисправности при измерении давления, температуры, состава газа;
- изменение длины луча из-за возможных отложений на приемопередатчиках.

Профиль фактор (profile factor). Необходимо отслеживать искажения профиля скорости потока за счет контроля значений соотношении скоростей по лучам. Текущая скорость на луче рассчитывается как среднее значение, например, по 100 измерениям.

Профиль фактор рассчитывается согласно алгоритму:

Входные параметры: $L_i, t_{1i}, t_{2i}, \alpha_i, n, N$.

Измеренная скорость на луче: $V_i = \frac{L_i}{2cos\alpha_i}\left(\frac{1}{t_{1i}} - \frac{1}{t_{2i}}\right)\ (i = 1 \cdots n)$.

Средняя скорость на луче: $V_{avg\ i} = \frac{\sum_j^N V_{ij}}{N}\ (i = 1 \cdots n),\ (j = 1 \cdots N)$.

Профиль фактор: $PF = \frac{V_{avg\ 2} + V_{avg\ 3}}{V_{avg\ 1} + Vavg\ _4}$.

Где V_i — измеренная скорость на i-ом луче; α_i — угол между продольной осью измерительного корпуса и лучом; $V_{avg\ i}$ — средняя по 100 последним измерениям скорость на i-ом луче; j — номер измерения; N — количество измерений; нумерации лучей — 1,4 внешние, 2,3 внутренние.

Значение профиль фактора для развитого не возмущенного потока обычно равно PF = 1,11. Допускается отклонение значения профиль фактора в пределах 5 % при изменение числа Рейнольдса. При запуске счетчика в работу необходимо набрать статистическую выборку значений профиль фактора на невозмущенном потоке на месте эксплуатации. В процессе работы счетчика за базовое значение профиль фактора обычно берется значение, полученное осреднением имеющейся выборки.

Данный параметр применяется при диагностики следующих факторов: искажения профиля потока, в том числе из-за появления тангенциальной составляющей скорости.

Симметрия. Симметрия потока рассчитывается согласно алгоритму:

Входные параметры: $L_i, t_{1i}, t_{2i}, \alpha_i, n, N$.

Измеренная скорость на луче: $V_i = \frac{L_i}{2cos\alpha_i}\left(\frac{1}{t_{1i}} - \frac{1}{t_{2i}}\right)\ (i = 1 \cdots n)$.

Средняя скорость на луче: $V_{avg\ i} = \frac{\sum_j^N V_{ij}}{N}\ (i = 1 \cdots n),\ (j = 1 \cdots N)$.

Симметрия: $SF = \frac{V_{avg\ 1} + V_{avg\ 2}}{V_{avg\ 3} + Vavg\ _4}$.

23SAVN524
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Значение фактора симметрии для развитого не возмущенного потока равно $SF = 1$. Допускается отклонение значения фактора симметрии в пределах 5 %. При запуске счетчика в работу необходимо набрать статистическую выборку значений фактора симметрии на невозмущенном потоке на месте эксплуатации. В процессе работы счетчика за базовое значение фактора симметрии брать значение, полученное осреднением имеющейся выборки.

Данный параметр применяется при диагностики следующих факторов: отложения на приемопередатчиках и стенках корпуса.

Перекрестный поток. Перекрестный поток рассчитывается согласно алгоритму:

Входные параметры: $L_i, t_{1i}, t_{2i}, \alpha_i, n, N$.

Измеренная скорость на луче: $V_i = \frac{L_i}{2cos\alpha_i}(\frac{1}{t_{1i}} - \frac{1}{t_{2i}})\ (i = 1 \cdots n)$.

Средняя скорость на луче: $V_{avg\ i} = \frac{\sum_j^N V_{ij}}{N}\ (i = 1 \cdots n), (j = 1 \cdots N)$.

Перекрестный поток: $CF = \frac{V_{avg\ 1} + V_{avg\ 3}}{V_{avg\ 2} + Vavg_{\ 4}}$.

Значение перекрестного фактора для развитого не возмущенного потока равно $CF = 1$. Допускается отклонение значения фактора симметрии в пределах 5 %.

Данный параметр применяется при диагностике искажения профиля потока.

Турбулентность. Для контроля стабильности потока и постоянства скорости по каждому из лучей используется параметр Турбулентность.

Рассчитывается согласно алгоритму:

Входные параметры: $V_j\ (j = 1 \cdots m)$.

Средняя скорость на луче: $V_{avg\ i} = \frac{\sum_j^N V_{ij}}{N}\ (i = 1 \cdots n), (j = 1 \cdots m)$.

Турбулентность: $S_i = \sqrt{\frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}(V_{ij} - V_{avg\ i})^2}$.

Где m-объем выборки за последние 10 секунд (FMC); S_i — стандартное отклонение скорости на i-ом луче. Рабочий диапазон значений турбулентности обычно 2–3 % для внутренних лучей и 3–4 % для внешних лучей. При запуске расходомера в работу необходимо набрать статистическую выборку значений параметра турбулентности на невозмущенном потоке на месте эксплуатации. В процессе работу счетчика за базовое значение параметра турбулентности брать значение, полученное осреднением имеющейся выборки.

Данный параметр применяется при диагностики следующих факторов: блокировка отверстий формирователя потока перед УЗПР; влияние регулирующего клапана на поток; скорость потока менее 3 м/с.

Отказ работы ультразвукового преобразователя. В случае сбоя в работе ультразвукового датчика целесообразно применить одну из схем компенсации сбоя.

Адаптивную схему компенсации можно реализовать по алгоритму, показанному на рисунке 3. Входными параметрами тут являются: V_i, w_i, n, b_i. После запуска в работу счетчика рассчитываются средние значения соотношений по лучам на основе минимум 10 000 измерений (10 минут, например, 30 000 измерений) по формуле

$$V'_i = \frac{V_i}{V_a},$$

23SAVN524
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

где $V_a = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} w_i V_i$ — измеренная средняя по сечению скорость потока; V'_i — значение скорости по i-ому лучу, отнесенное к средней по сечению скорости потока; w_i — веса интегрирования скорости по лучам. Эти соотношения используются для получения по каждому лучу адаптивного среднего значения скорости. В случае, если все лучи находятся в рабочем состоянии, средние скорости по лучам вычисляются на основе скользящего среднего:

$$V_{avg\ i,j+1} = \frac{(V_{avg\ i,j} \cdot (Num - 1)) + V_i}{Num},$$

$$V'_{avg\ i,j+1} = \frac{(V'_{avg\ i,j} \cdot (Num - 1)) + V'_i}{Num},$$

где $V_{avg\ i,j+1}$ — средняя на новом шаге измерения скорость на i-ом луче, j-номер измерения; $V_{avg\ i,j}$ — средняя на предыдущем шаге измерения скорость на i-ом луче; Num — масштабирующий коэффициент, определяющий быстроту изменения хранящейся в памяти средней скорости. Если диагностика обнаруживает сбой луча, значение скорости V_i на данном луче не используется при расчете средней скорости по сечению V_a. Расчет средней скорости начинает выполняться по формуле:

$$V_a = \frac{\sum_{i=1}^{n} b_i w_i \frac{V_i}{V'_i}}{\sum_{i=1}^{n} b_i w_i},$$

где b_i — значение состояния i-го луча (1 — луч активен, 0 — луч неактивен).

$$b_i = \begin{cases} 0, луч\ не\ активен \\ 1, луч\ активен \end{cases}.$$

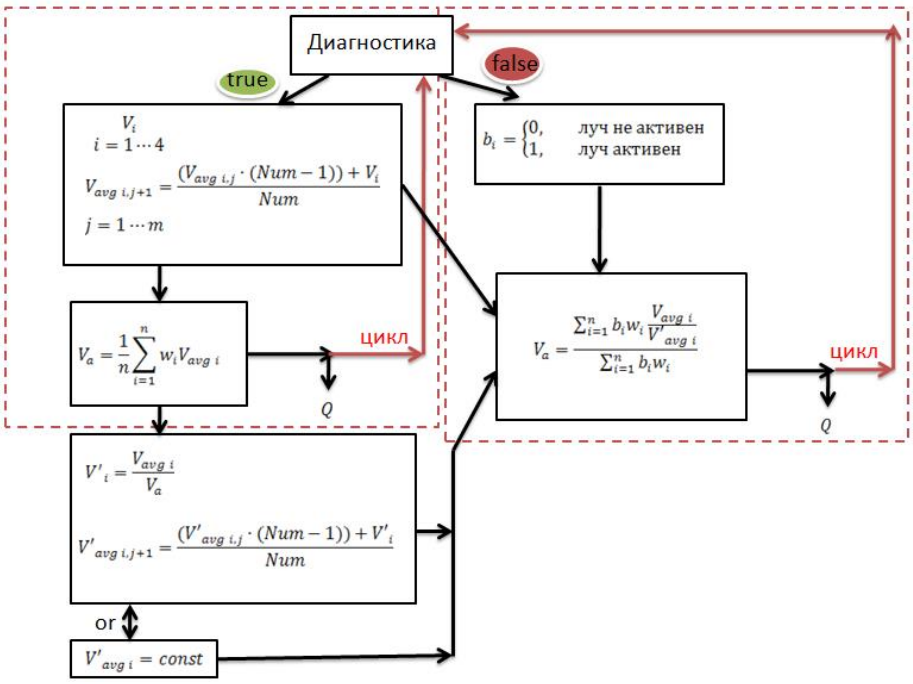


Рисунок 3. *Схема компенсации сбоя работы луча УЗПР (разработано авторами)*

В случае четырех лучевых схем во время такого рабочего режима (при отказе луча и его компенсации) погрешность измерений составляет 0,35 %. В случае работы статической схемы компенсации для компенсации используются статические соотношения лучей без вычисления скользящих средних значений.

Статическую схему компенсации можно реализовать по следующему алгоритму.

23SAVN524
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Входными параметрами при этом являются: V_i, w_i, n, b_i, V'_i. А статические соотношения можно получить по одному из трех вариантов:

— по формуле:

$$V'_i = \frac{V_i}{V_a} \quad (1)$$

при проведении экспериментов во всем диапазоне рабочих чисел Рейнольдса;

— по формуле (1)

при использовании расчета теоретического профиля турбулентного потока по методике Герстена.

Авторы настоящей статьи предлагают альтернативный способ определения соотношений по формуле (1).

Согласно предлагаемому способу, средние скорости по лучам и средняя осевая скорость в сечении **вычисляется путем компьютерного моделирования при использовании вычислительных CFD-данных результатов моделирования**. В этом случае соотношения V'_i целесообразно вычислять как арифметическое среднее от значений V'_i для 8–10 чисел Рейнольдса во всем рабочем диапазоне, либо использовать полиномиальную аппроксимацию уже полученных с помощью CFD авторами данных (табл. 1):

Таблица 1

Значения скоростей по лучам в зависимости от числа Рейнольдса

	Число Рейнольдса Re	V'_i(внешние лучи)	V'_i(внутренние лучи)
	752 568	0,907391069	1,03798197
	1 229 316	0,911568802	1,036132718
	2 512 672	0,91674354	1,033862609
	5 138 813	0,921269795	1,03187557
	7 514 010	0,923458851	1,030929619
	10 120 034	0,925128638	1,03019177
	15 004 870	0,927284403	1,029273337
	19 753 405	0,928623877	1,028690429
Среднее значение		0,922011129	1,03156515

Разработано авторами

Представленные значения показаны на рисунке 4 в виде функций $\frac{V_i}{V_a}(Re)$.

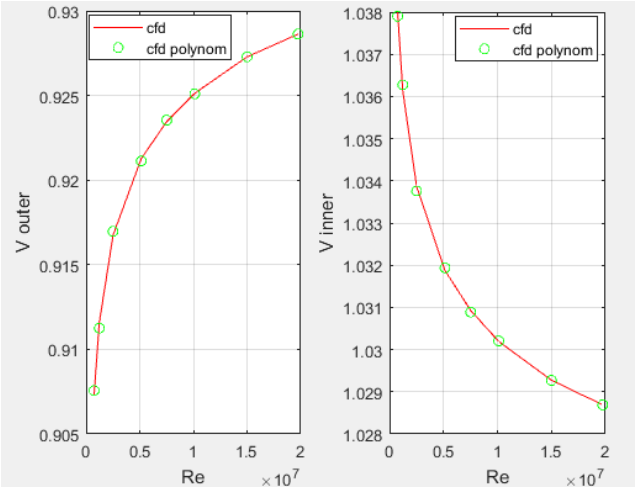


Рисунок 4. *Зависимости отношений $V'_i(Re)$ для внешних (слева) и внутренних (справа) лучей (разработано авторами)*

23SAVN524
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Представленные на рисунке 4 и в таблице 1 данные получены с помощью трехмерного компьютерного моделирования. На входе в расчетную область задано распределение скоростей, соответствующее ламинарному и полностью развитому турбулентному течению со средней скоростью потока, а также масштаб и интенсивность турбулентности в случае турбулентных режимов течения. На выходе из расчетной области использованы «мягкие» граничные условия с нулевым градиентом параметров потока вдоль оси канала. На стенках заданы условия прилипания. Стенки канала считаются гидравлически гладкими и адиабатическими. Среда считается несжимаемой и изотермической.

Представленные зависимости легко аппроксимируются полином 6-ой степени (табл. 2).

Таблица 2

Коэффициенты аппроксимирующего полинома для лучей УЗПР

	Коэффициенты полинома 6-ой степени						
Внешние лучи	-4,4598e-44	2,6398e-36	-6,0649e-29	6,9273e-22	-4,2221e-15	1,4272e-08	0,8989
	a0	a1	a2	a3	a4	a5	a6
Внутренние лучи	1,9351e-44	-1,1483e-36	2,6461e-29	-3,0327e-22	1,8548e-15	-6,2820e-09	1,0417
	a0	a1	a2	a3	a4	a5	a6

Разработано авторами

Заключение

Описанные параметры и способы их расчета имеют важное значение при реализации программной части ультразвукового расходомера и позволяют своевременно и точно выявлять поломки и отклонения в работе УЗПР от нормативных условий. Предложенный способ вычисления соотношений скоростей посредством компьютерного моделирования позволяет сократить сроки разработки расходомеров и обеспечивает более гибкий подход к их проектированию. Необходимо отметить, что использование данных, полученных с помощью вычислительных экспериментов, для алгоритма компенсации сбоя работы луча необходимо отдельно проверять на натурных лабораторных стендах с целью компенсации ошибок, вносимых аппроксимацией сплошной среды сеточной моделью, схемами дискретизации пространства и времени, а также моделью турбулентности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ferrari, A.; Pizzo, P.; Rundo, M. Modelling and experimental studies on a proportional valve using an innovative dynamic flow-rate measurement in fluid power systems. — Proc. Inst. Mech. Eng. Part C: J. Mech. Eng. Sci. 2018, Vol. 232, pp. 2404–2418. URL: https://doi.org/10.1177/0954406217721259.
2. Mohammed, S.; Abdulkareem, L.; Roshani, G.H.; Eftekhari-Zadeh, E.; Haso, E. Enhanced multiphase flow measurement using dual non-intrusive techniques and ANN model for void fraction determination. Processes 2022, Vol. 10, p. 2371. URL: https://doi.org/10.3390/pr10112371.
3. Aljabarin, N.; Al-Amayreh, M.; Alahmer, A.; Alsaqoor, S. Experimental determination of a minimum spouting velocity for ceramic-coated bearings in conical-cylindrical spouted beds. J. Porous Media 2022, Vol. 25, pp. 1–13. URL: https://doi.org/10.1615/JPorMedia.2021035189.
4. Lynnworth, L.C.; Liu, Y. Ultrasonic flowmeters: half-century progress report. — Ultrasonics 2006, Vol. 44, pp. 1371–1378. URL: https://doi.org/10.1016/j.ultras.2006.05.046.

23SAVN524
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

5. Qiu, Y.; Chen, H.; Li, W.; Wu, F.; Li, Z. Optimization of the tracer particle addition method for PIV flowmeters. Processes 2021,9, p. 1614. URL: https://doi.org/10.3390/pr9091614.

6. Fonseca, G.E.; Dube, M.A.; Penlidis, A. A Critical overview of sensors for monitoring polymerizations. — Macromol. React. Eng. 2009, 3, pp. 327–373. URL: https://doi.org/10.1002/mren.200900024.

7. Кубенин, А.С. О влиянии скорости газового потока на точность работы ультразвукового расходомера / А.С. Кубенин, Д.П. Алексеев // Вестник Евразийской науки. — 2024. — Т 16. — № 2. — URL: https://esj.today/PDF/66SAVN224.pdf. — DOI: 10.15862/66SAVN224.

8. Кубенин, А.С. Об использовании конфузора для повышения точности ультразвукового расходомера / А.С. Кубенин, В.Г. Гагарин, Н.В. Павленко, Д.П. Алексеев // Вестник евразийской науки. — 2024. — Т. 16. — № 4. — URL: https://esj.today/PDF/09SAVN424.pdf DOI: 10.15862/09SAVN424.

9. J.G. Drenthen, M.J.M. Vermeulen, H. den Hollander. Ultrasonic flow meter diagnostics and the impact of fouling. — AGA Operation Conference, Nashville 2011. URL: https://cdn.krohne.com/dlc/CONFPAPERS_ALTOSONICV12_impact_of_fouling_en_120524.pdf.

10. J.G. Drenthen, M. Vermeulen, M. Kurth, H. den Hollander. The detection of corrosion and fouling and the operational influence on ultrasonic flow meters using reflecting paths. 29th International North Sea Flow Measurement Workshop, 2011. URL: https://nfogm.no/wp-content/uploads/2019/02/2011-21-Detection-of-Corrosion-Fouling-Operational-Influence-on-Ultrasonic-Flow-Meters-using-Reflecting-Paths-Drenthen-Krohne.pdf.

Kubenin Aleksandr Sergeevich
Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences, Moscow, Russia
Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
E-mail: kube-n@mail.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=935093

Gagarin Vladimir Gennadevich
Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences, Moscow, Russia
Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
E-mail: gagarinvg@yandex.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=292976

Pavlenko Natalya Viktorovna
Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences, Moscow, Russia
Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
E-mail: nv-pavlenko@mail.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=556985

Alekseev Dmitry Pavlovich
SovTIGaz, Moscow, Russia
E-mail: alekseev210@yandex.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=687192

About the algorithms of self-diagnosis of the ultrasonic flow meter

Abstract. In modern industry, especially in gas supply, the accuracy of gas flow metering transported through gas pipelines is more important than anywhere else. A small, at first glance, error in gas flow measurement can ultimately cause large financial losses in gas supplies and sales. Ultrasonic flow meters are currently becoming increasingly popular for gas flow metering. Having no mechanically movable or gas-dynamically loaded structural elements in the flow, such flow meters are reliable, durable, easy to maintain and allow calculating volume and mass flow rates in commercial gas metering with an accuracy acceptable for industry. During operation at gas distribution stations, ultrasonic flow meters, which are part of the pipeline system, also gradually become contaminated. Deposits of impurities and rust appear on the walls of the UZPR housing. Such contamination can cause deterioration in the performance of the measuring device and cause additional inaccuracy in measuring gas flow. In addition, it is necessary to ensure the correct operation of the flow meter if one or more ultrasonic sensors fail. The paper describes the main methods of ultrasonic flow meter diagnostics. The parameters and expressions for their calculation required for monitoring the flow meter operation in real time are given. The article describes some general principles of various UZPR diagnostic algorithms, and also proposes a variant of calculating the necessary parameters in the beam failure compensation algorithm in case of ultrasonic transducer failure based on the application of computational gas dynamics methods. The authors provide the values of flow parameters that can be used in beam failure compensation algorithms. The authors construct functional dependencies of these parameters on the Reynolds number and provide the coefficients of polynomials approximating these dependencies. The proposed method for calculating velocity ratios using computer modeling allows to reduce the development time of flow meters and provides a more flexible approach to their design.

Keywords: gas supply; ultrasonic flow meter; computational gas dynamics; computer modeling; profile factor; gain; signal; diagnostics