

На правах рукописи



Дружков Александр Михайлович

АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ
ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ВИХРЕАКУСТИЧЕСКИХ
РАСХОДОМЕРОВ В СОСТАВЕ АСУ ТП

Специальность 05.13.01 – системный анализ, управление и обработка информации
(промышленность)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск-2020

Работа выполнена в ФГАОУ ВО
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»

- Научный руководитель:** **Шестаков Александр Леонидович**
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой
информационно-измерительной техники ФГАОУ ВО
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»
- Официальные оппоненты:** **Прохоров Сергей Антонович**
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой
информационных систем и технологий ФГАОУ ВО
«Самарский национальный исследовательский университет
им. С.П. Королева»
Краснов Андрей Николаевич
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры
автоматизации, телекоммуникации и метрологии ФГБОУ ВО
«Уфимский государственный нефтяной технический
университет»
- Ведущая организация:** Всероссийский научно-исследовательский институт
расходомерии – филиал Федерального государственного
унитарного предприятия «Всероссийский научно-
исследовательский институт метрологии
им. Д.И. Менделеева»

Защита состоится «08» февраля 2021 г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.298.03 при ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», расположенном по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В. И. Ленина, 76, ауд. 1007 главного корпуса.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», а также на сайте <http://www.susu.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим высылать по адресу 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ЮУрГУ, Ученый совет, тел. (351) 267-91-23.

Автореферат разослан «__» _____ 202__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, д.т.н., доцент



А.В. Голлай

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Особенностью современного производства является использование большого числа автоматизированных систем управления техническим процессом (АСУ ТП). Современные АСУ ТП являются сложными аппаратно-программными комплексами, в состав которых входит большое количество средств измерения физических величин. Одной из наиболее распространённых задач в АСУ ТП является измерение расхода жидкости. Для реализации данных измерений хорошо себя зарекомендовали вихреакустические расходомеры (ВР). Однако, им присущи недостатки в виде больших погрешностей при измерении малых расходов.

Согласно МИ 2301-2000 «ГСИ. Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Методы и способы повышения точности измерений», повышение точности измерений в промышленности является одним из существенных резервов повышения качества продукции и эффективности производства. Одним из основных методов повышения точности измерений является разработка более точных средств измерения.

Обзор [5] показывает разнообразие существующих технических решений для повышения точности измерения вихревых расходомеров, осуществлённых отечественными и зарубежными исследователями (Кремлевский П.П., Лурье М.С., Богуш М.В., Даев Ж.А., Cousins T., Hans V., Igarashi T., Pankanin G.L., Yamasaki H., Kawano T. и др.) . Благодаря широкому внедрению микроконтроллеров в конструкцию средств измерения стал возможным переход от схмотехнических к алгоритмическим методам повышения точности измерения, которые являются наименее затратными, особенно для уже разработанных и серийно выпускаемых расходомеров. В этой связи алгоритмические методы представляются наиболее перспективными.

Цель работы - разработать алгоритмы обработки информации для повышения точности измерения вихреакустических расходомеров при измерении малых расходов жидкости в широком диапазоне температур измеряемой среды в автоматизированных системах управления технологическими процессами.

Задачи исследования, решенные в соответствии с указанной целью:

- 1 Разработка алгоритма выбора математической модели функции преобразования вихреакустического расходомера методом всех возможных регрессий,
- 2 Разработка метода выбора математической модели функции преобразования вихреакустического расходомера на основе анализа уравнения измерения,
- 3 Разработка алгоритмического обеспечения для адаптивной обработки информации о частоте вихреобразования в вихреакустическом расходомере,
- 4 Экспериментальное исследование разработанных алгоритмов и метода.

Предметом исследования являются алгоритмы обработки информации для повышения точности измерения малых расходов вихреакустических расходомеров в составе АСУ ТП.

Научная новизна:

- 1 Разработан алгоритм поиска математической модели функции преобразования (ФП) вихреакустических расходомеров (ВР) методом всех возможных регрессий с

использованием показателя сложности и взвешенного метода наименьших квадратов, позволяющий повысить точность измерения на малых расходах.

2 Предложен метод поэлементного анализа уравнения измерения ВР и разработана модель ФП вихреакустического расходомера, позволяющая повысить точность измерения на малых расходах, распространить ее на расходомеры больших условных диаметров (ДУ) и сократить затраты на калибровку расходомера.

3 Разработано алгоритмическое обеспечение для обработки информации о частоте вихреобразования за телом обтекания, позволяющее повысить точность измерения при установившемся и изменяющемся режимах расхода.

4 Предложена имитационная модель поступления информации о частоте вихреобразования, позволяющая моделировать временной ряд мгновенных частот вихреобразования.

Теоретическая значимость работы заключается в создании алгоритма поиска модели ФП вихреакустического расхода на основе метода всех возможных регрессий и показателя сложности модели, с применением взвешенного метода наименьших квадратов; в разработанном методе покомпонентного анализа уравнения измерения вихреакустического расходомера, позволяющем повысить точность измерения в области малых расходов за счет выбора и обоснования функции преобразования; в разработке алгоритмического обеспечения обработки информации о мгновенных частотах вихреобразования, позволяющего повысить точность измерения в установившемся и изменяющемся режимах расхода.

Практическая значимость работы заключается в создании моделей функции преобразования для ВР и алгоритма обработки информации о мгновенных частотах вихреобразования, позволяющие повысить точность измерения на малых расходах в широком диапазоне температур измеряемой среды при установившемся и изменяющемся режимах расхода. Результаты были использованы при разработке нового поколения вихреакустического расходомера «Метран». Разработано программное обеспечение на языке MATLAB, позволяющее производить моделирование временного ряда мгновенных частот вихреобразования и применять к нему алгоритмы обработки информации.

Положения, выносимые на защиту:

1 Алгоритм поиска модели ФП вихреакустического расходомера, основанный на методе всех возможных регрессий и предложенном показателе сложности модели, а также применением взвешенного метода наименьших квадратов.

2 Метод поиска модели ФП на основе покомпонентного анализа уравнения измерения вихреакустического расходомера и оценки вклада каждого компонента.

3 Алгоритмическое обеспечение обработки информации о мгновенных частотах вихреобразования при установившемся и изменяющемся режимах расхода.

Достоверность результатов работы подтверждена корректным использованием математических методов регрессионного анализа, использованием аттестованных эталонов при проведении эксперимента, корректным применением статистических методов обработки информации, экспериментальными результатами исследования.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы были доложены на следующих конференциях и семинарах: Научно-практические конференции «Измерения: состояния, перспективы развития» (г. Челябинск, 2013 г. и 2014 г.); Научная сессия ТУСУР - 2016: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых (Томск, 25-27 мая 2016 г.).

Реализация результатов исследования. Полученные результаты диссертационной работы внедрены в деятельности АО «ПГ «Метран».

Публикации. Всего по теме диссертации опубликовано 11 работ, в том числе 9 статей в отечественных изданиях из перечня ВАК [1-9]. Получен патент на способ измерения [10].

Личный вклад автора. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в постановку задачи, в разработку теоретических методов, в экспериментальное исследование и внедрение результатов исследования.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка литературы. Общий объем диссертации 151 страница, включая 25 рисунков. Библиография включает 104 наименований на 10 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и задачи исследования, показана научная новизна и отражена практическая значимость полученных результатов.

В первой главе выполнен анализ нескольких типовых структур АСУ ТП, в которых важную роль играют средства измерения расхода. Продемонстрировано, что вихреакустические расходомеры наиболее полно удовлетворяют требованиям со стороны АСУ ТП. Отмечено, что в связи с актуальностью работы АСУ ТП в импульсном режиме (быстрые переходы от нулевого расхода к заданному и обратно) и в режиме малых расходов повышение точности измерения малых расходов является одним из существенных резервов повышения эффективности АСУ ТП. Рассмотрен вихревой принцип измерения расхода и основные функциональные блоки вихревого расходомера. Предложена классификация методов повышения точности измерения вихревых расходомеров по применимости их к функциональному блоку расходомера.

Проведен обзор используемых методов повышения точности измерения вихревых расходомеров, направленных на: *оптимизацию геометрии проточной части* (выбор формы тела обтекания (Кремлевский П.П., Yamasaki H, Igarashi T., Pankanin G.L.), оптимизация геометрических параметров проточной части расходомера (Сафонов Е.В. Лурье М.С, Cousins T.)); *оптимизацию тракта чувствительного элемента* (выбор размещения чувствительного элемента (Лурье М.С, Богуш М.В., Hans V), увеличение количества каналов измерения и фильтрация сигналов с чувствительного элемента (Джаев В.А, Poremba A, Ghaoud T, Chen J), введение цифровой обработки сигналов (Лурье М.С De-ming H., Zheng D, Zhi-qiang Sun)) и *разработка алгоритмических методов обработки информации* (Pankanin G.L, Yi Y).

В результате проведенного анализа выбраны алгоритмические методы обработки информации (выбор модели ФП и алгоритм обработки информации о частоте вихреобразования) как наиболее универсальные и наименее затратные методы повышения точности измерения вихреакустического расходомера.

Во второй главе исследованы алгоритм и метод поиска модели ФП ВР. Рассмотрены предпосылки планирования эксперимента, показана значимость фактора температуры, исходя из технических возможностей выбраны температуры измеряемой жидкости. Проведено планирование двухфакторного эксперимента, разработана структура данных, получаемая для каждого расходомера (таблица 1), где m – количество задаваемых уровней температуры измеряемой среды, n – количество уровней испытываемых режимов расхода.

Таблица 1 – Структура данных, получаемых в результате испытаний

Температура измеряемой среды	t_1					t_m			
Эталонный расход	Q_{11}	Q_{21}	...	Q_{n1}	...	Q_{1m}	Q_{2m}	...	Q_{nm}
Средняя частота вихреобразования	f_{11}	f_{21}	...	f_{n1}	...	f_{1m}	f_{2m}	...	f_{nm}

Для поиска модели на основе регрессионного анализа в качестве модели ФП был использован полином вида (1), где P_t и P_f – максимальные показатели степени полинома по факторам температуры и частоты вихреобразования, f – частота вихреобразования, t – температура измеряемой среды, b – коэффициенты полинома.

$$Q(f, t) = \sum_{j=0}^{P_t} \sum_{i=0}^{P_f} b_{P_t \cdot j + i} \cdot f^i \cdot t^j \quad (1)$$

На основе анализа разностей значений эталонных расходов и результатов регрессионных моделей, а также успешного применения двухфакторных моделей степени по факторам частоты и температуры не более 3-х были выбраны показатели степени $P_f=3$ и $P_t=3$. Таким образом, полная модель имеет вид (2).

$$\begin{aligned} Q(f, t) = & b_0 + b_1 \cdot f + b_2 \cdot f^2 + b_3 \cdot f^3 \\ & + b_4 \cdot t + b_5 \cdot t \cdot f + b_6 \cdot t \cdot f^2 + b_7 \cdot t \cdot f^3 \\ & + b_8 \cdot t^2 + b_9 \cdot t^2 \cdot f + b_{10} \cdot t^2 \cdot f^2 + b_{11} \cdot t^2 \cdot f^3 \\ & + b_{12} \cdot t^3 + b_{13} \cdot t^3 \cdot f + b_{14} \cdot t^3 \cdot f^2 + b_{15} \cdot t^3 \cdot f^3 \end{aligned} \quad (2)$$

Метод всех возможных регрессий предполагает исследование всех возможных частных моделей и выбор моделей, удовлетворяющих заданным критериям [1, 3]. Для осуществления перебора введем вектор B , содержащий коэффициенты модели [$b_{15}, b_{14}, \dots, b_0$] и вектор C' – вектор той же длины (битовая маска), что и вектор B , при этом «1» в соответствующем разряде вектора означает, что коэффициент входит в модель, «0» коэффициент отсутствует. Общее количество вариантов определяется длиной двоичного вектора C' и находится по формуле (3). Таким образом, для модели (2) число всех возможных регрессий равно 65 536.

$$W = 2^{(P_t+1)(P_f+1)} \quad (3)$$

С целью сокращения шагов перебора его необходимо осуществлять от простых моделей (более предпочтительных для использования) к сложным. Определим показатель сложности таким образом, чтобы наиболее сложными моделями считались модели,

содержащие члены с высокой степенью температуры ($b_{12}t^3$, $b_{13}t^3f$, $b_{14}t^3f^2$, $b_{15}t^3f^3$). Введем показатель сложности модели C в виде суммы весов коэффициентов, выражение (4), входящих в исследуемую модель, где c_i – вес i -го члена, входящего в исследуемую модель. Значения весов коэффициентов определены в таблице 2.

$$C = \sum_i c_i \quad (4)$$

Основываясь на показателе сложности C , организуем перебор моделей от простой к сложной, то есть последовательное рассмотрение моделей с показателем сложности от 1 до 65536. При этом модели с $C=1$ будет соответствовать частная модель вида $Q=b_0$, а показателю сложности $C=65536$ полная модель вида (2).

Таблица 2 – Весовые коэффициенты членов полной модели

Группы членов модели	Член модели	Положение члена модели в векторе C'	Вес члена модели c_i
Члены модели не содержащие параметр t	b_0	0000 0000 0000 0001	$2^0=1$
	b_1	0000 0000 0000 0010	$2^1=2$
	b_2	0000 0000 0000 0100	$2^2=4$
	b_3	0000 0000 0000 1000	$2^3=8$
Члены модели содержащие параметр t	b_4	0000 0000 0001 0000	$2^4=16$
	b_5	0000 0000 0010 0000	$2^5=32$
	b_6	0000 0000 0100 0000	$2^6=64$
	b_7	0000 0000 1000 0000	$2^7=128$
Члены модели содержащие параметр t^2	b_8	0000 0001 0000 0000	$2^8=256$
	b_9	0000 0010 0000 0000	$2^9=512$
	b_{10}	0000 0100 0000 0000	$2^{10}=1024$
	b_{11}	0000 1000 0000 0000	$2^{11}=2048$
Члены модели содержащие параметр t^3	b_{12}	0001 0000 0000 0000	$2^{12}=4096$
	b_{13}	0010 0000 0000 0000	$2^{13}=8192$
	b_{14}	0100 0000 0000 0000	$2^{14}=16384$
	b_{15}	1000 0000 0000 0000	$2^{15}=32768$

Расчет показателя сложности в виде суммы весов членов модели, где вес каждого члена модели равен 2^i (i – это индекс члена полной модели (2)), дает возможность простой реализации формирования частных моделей. При переводе числа C из десятичного представления в двоичное C' получаем вектор (битовую маску). Таким образом, получение каждой частной j -ой модели $Q(f,t)_j$ можно описать выражением алгебры логики (5), где C'_j – показатель сложности j -ой модели в двоичной системе счисления.

$$Q(f, t)_j = B \& C'_j \quad (5)$$

Показатель сложности не только позволяет упорядочить перебор моделей от простой к более сложной, а также является инструментом формирования частных моделей из полной (2) путем логической конъюнкции.

Поскольку температура является значащим фактором, то рассмотрение моделей стоит *начинать* с показателя сложности модели $C=16$. *Условие окончания* поиска: погрешность исследуемой модели меньше заданной погрешности измерения на каждом из режимов расхода при каждой исследуемой температуре. Алгоритм поиска модели можно представить в виде рисунка 1.

Традиционным методом поиска значений коэффициентов является метод наименьших квадратов (МНК), ключевой предпосылкой использования которого

является однородность дисперсии случайной ошибки регрессионной модели (гомоскедастичность данных, рисунок 2) [2].

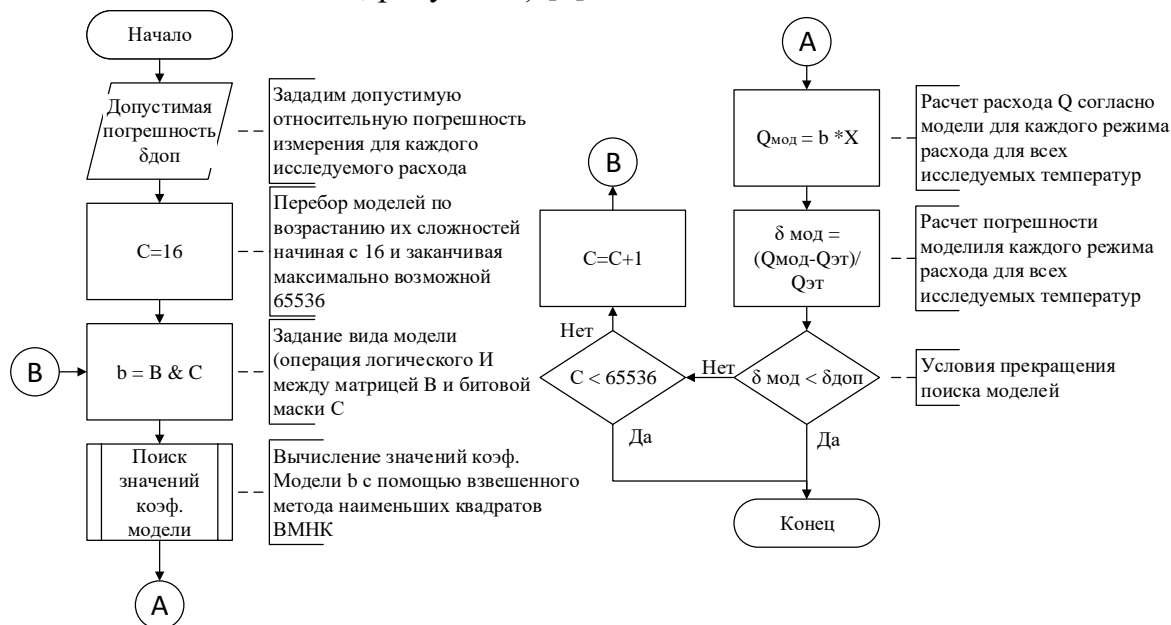


Рисунок 1 – Алгоритм поиска моделей методом всех возможных регрессий

В результате обработки экспериментальных данных было обнаружено, что абсолютное значение дисперсии входной величины f растет при росте расхода Q , это свидетельствует о гетероскедастичности данных. В таких случаях рекомендуется использовать взвешенный МНК, что фактически сводится к приведению данных к гомоскедастичному виду за счет их модификации (взвешивания) и последующему применению стандартного МНК.

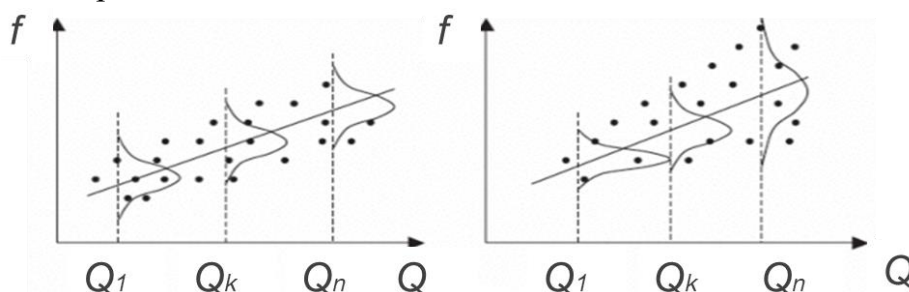


Рисунок 2 - Пример гомоскедастичных и гетероскедастичных данных

Преобразуем входные данные следующим образом $Q/f_{ij} = Q'$, $X/f_{ij} = X'$, где величина $1/f_{ij}$ интерпретируется как вес в ij -ом наблюдении и этот вес будет тем меньше, чем больше значение f_{ij} , которое пропорционально дисперсии случайной ошибки в ij -м наблюдении, а X - матрица размером $(n \cdot m, 16)$ вида:

$$X = \begin{bmatrix} 1 & f_{11} & f_{11}^2 & f_{11}^3 & t_1 & f_{11} \cdot t_1 & f_{11}^2 \cdot t_1 & \dots & f_{11}^3 \cdot t_1^3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & f_{ij} & f_{ij}^2 & f_{ij}^3 & t_j & f_{ij} \cdot t_j & f_{ij}^2 \cdot t_j & \dots & f_{ij}^3 \cdot t_j^3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & f_{nm} & f_{nm}^2 & f_{nm}^3 & t_m & f_{nm} \cdot t_m & f_{nm}^2 \cdot t_m & \dots & f_{nm}^3 \cdot t_m^3 \end{bmatrix}$$

Полная модель функции преобразования в матричном виде будет иметь вид (6), где b – вектор-столбец, составленный из значений коэффициентов модели (транспонированная вектор-строка B , то есть $b = B^T$). Решение уравнения (7), то есть нахождение значений коэффициентов стандартным МНК, будет иметь вид (6).

$$Q' = X' \cdot b + \varepsilon \quad (6)$$

$$b = (X'^T \cdot X')^{-1} \cdot X'^T \cdot Q', \quad (7)$$

Расчёт значения расхода модели Q^{mod} (вектор-столбец расходов) и погрешностей измерения модели δ^{mod} для каждого режима расхода ij и каждой температуры j измеряемой среды производится согласно формулам (8) и (9) соответственно, где δ^{mod} – вектор-столбец погрешностей модели размерами $(n \cdot m, 1)$, состоящий из элементов δ^{mod}_{ij} .

$$Q^{mod} = X \cdot b \quad (8)$$

$$\delta^{mod} = (Q^{mod} - Q^{эТ}) \cdot 100\% / Q^{эТ} \quad (9)$$

Таким образом, для каждой модели ФП получаем вектор погрешности измерения исследуемой модели, что и является ключевой характеристикой ВР. В таблице 2 задается погрешность по диапазонам расхода. Цель диссертационной работы – повышение точности измерения на малых расходах, поэтому допустимая погрешность в исследовании была задана 1% во всем диапазоне измерений.

Таблица 2 – Значения погрешности измерения расхода по диапазонам расхода

Относительная допустимая погрешность измерения исследуемых расходомеров:	Диапазон расходов		
	(Q max – 0.08 Q max)	(0.08 Q max – 0.04 Q max)	(0.04 Q max – Q min)
согласно технической документации	1%	1,5%	3%
в проведенном исследовании δ^{don}	1%	1%	1%

Условие выбора годных моделей выражено в виде (10), где δ^{mod}_{ij} – относительная погрешность модели для каждого исследуемого расхода и каждой температуры, $\delta^{don}(Q)$ – относительная погрешность измерения расходомера в исследуемом режиме расхода Q , δ^{don} – множество значений погрешности, заданное для диапазонов измерения расхода.

$$\forall \delta^{доп}(Q) \in \delta^{доп}, \delta_{ij}^{mod} < \delta^{доп} \quad (10)$$

Наиболее простые модели, полученные в ходе исследования, приведены в таблице ниже.

Таблица 3 – Модели, выбранные согласно предложенного алгоритма

ДУ	Вид модели	Показатель сложности С
25	$Q = b_0 + b_1 \cdot f + b_2 \cdot f^2 + b_5 \cdot t \cdot f + b_7 \cdot t \cdot f^3 + b_8 \cdot t^2 + b_9 \cdot t^2 \cdot f + b_{10} \cdot t^2 \cdot f^2$	1927
32	$Q = b_0 + b_1 \cdot f + b_2 \cdot f^2 + b_5 \cdot t \cdot f + b_7 \cdot t \cdot f^3 + b_9 \cdot t^2 \cdot f$	551
50	$Q = b_0 + b_1 \cdot f + b_3 \cdot f^3 + b_5 \cdot t \cdot f + b_7 \cdot t \cdot f^3 + b_8 \cdot t^2 + b_9 \cdot t^2 \cdot f + b_{10} \cdot t^2 \cdot f^2 + b_{12} \cdot t^3$	5899

Методика покомпонентного анализа уравнения измерения основана на уравнении измерения ВР, имеющего круглое сечение проточной части диаметром D , шириной тела обтекания d в виде выражения (11), где St - число Струхала, f – частота вихреобразования.

$$Q = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot d \cdot f \cdot \frac{1}{St} \quad (11)$$

Для оценки вклада каждого фактора найдены частные производные уравнения измерения (12-15), результирующая неопределённость выражена формулой (16).

$$\frac{\partial Q}{\partial D} = \frac{\pi}{4} \cdot d \cdot \frac{1}{St} \cdot f \cdot 2D \Delta D \quad (12)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial d} = \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{1}{St} \cdot f \cdot \Delta d \quad (13)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial S_t} = \frac{\pi D^2}{4} \cdot d \cdot f \cdot \left(-\frac{\Delta S_t}{S_t^2}\right) \quad (14)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial f} = \frac{\pi D^2}{4} \cdot d \cdot \frac{1}{S_t} \cdot \Delta f \quad (15)$$

$$\delta = \sqrt{\left(\frac{2\Delta D}{D}\right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2 + \left(-\frac{\Delta S_t}{S_t}\right)^2 + \left(\frac{\Delta f}{f}\right)^2} \quad (16)$$

Погрешность измерения частоты входит в результирующую погрешность измерения расхода напрямую и скомпенсировать данную составляющую моделью ФП невозможно. Точность определения частоты вихреобразования зависит от сигнала, получаемого с сенсора, установленного в проточной части, и применённых методов обработки информации о частоте вихреобразования.

Изменение диаметра проточной части и характерной ширины тела обтекания обусловлено температурным расширением, а не скоростью течения (расходом) жидкости. Воспользуемся формулой линейного температурного удлинения (17), где p – геометрический размер при температуре t , t и t_0 – температуры измеряемой среды, θ – коэффициент температурного расширения.

$$\Delta p = p \cdot \theta \cdot (t - t_0) \quad (17)$$

Таким образом, выражение (16) преобразуется в выражение (18), которое позволяет получить оценку величины погрешности, вызванной влиянием температуры на геометрические размеры проточной части.

$$\delta = \sqrt{(2 \cdot \theta \cdot (t - t_0))^2 + (\theta \cdot (t - t_0))^2} \cdot 100\% \quad (18)$$

Как видно из (18), погрешность, вызванная изменением геометрических размеров, зависит от диапазона изменения температуры и коэффициента расширения материала. Например, при изготовлении проточной части расходомера и тела обтекания из нержавеющей стали 12Х18Н10Т (коэффициент линейного расширения $\theta = 16 \text{ мкм } ^\circ\text{C}^{-1}$) в диапазоне температур измеряемой среды от 0°C до 150°C погрешность, вызванная температурным расширением, составляет 0,54 % и одинакова для всех ДУ.

Число Струхала в классическом представлении о вихревых расходомерах является постоянным во всем диапазоне измерения, однако, диапазон измерения вихреакустических расходомеров больше [4] и в области измерения малых расходов St изменяется как от расхода, так и от температуры измеряемой среды. На основе опытных данных были построены графики семейства кривых St для исследуемых ВР (рисунок 3).

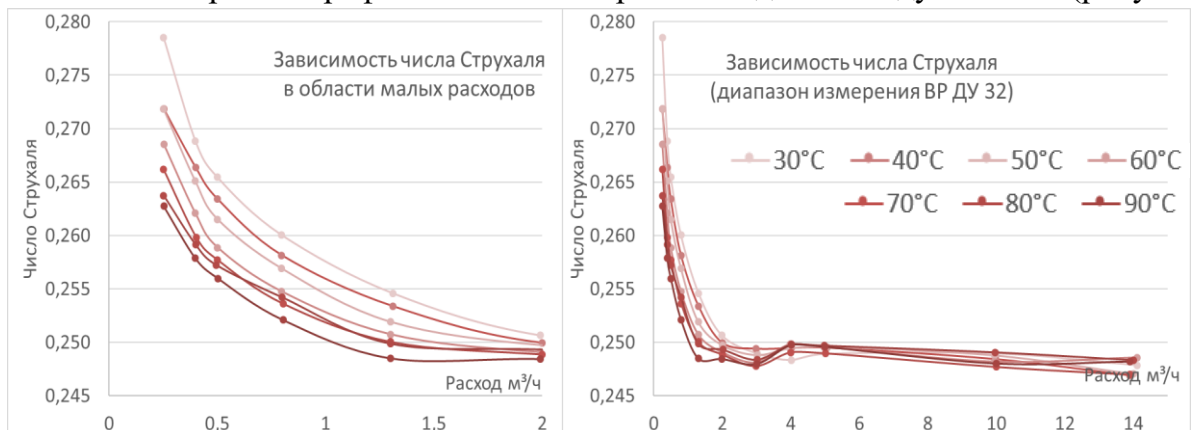


Рисунок 3 – Семейство кривых числа Струхала

Анализ графических данных показал, что при малых расходах значение числа Струхала изменяется нелинейно в зависимости от частоты вихреобразования f и температуры измеряемой среды t . Так в основном диапазоне измерения число Струхала (St) постоянно и приблизительно равно 0,248. Максимальное значение в области малых расходов достигает 0,280, тогда погрешность от изменения St составит 11,5 %.

С целью уменьшения погрешности измерения за счет компенсации измерения числа Струхала автором был описан и запатентован способ измерения объемного расхода в вихревых расходомерах. Новизна заявленного способа заключается в определении при испытаниях зависимости числа Струхала от обратного значения числа $(f \cdot d^2)/\mu$ и расчета текущего расхода на основе этой зависимости [10].

Автором было предложено уравнение (19), где f – частота вихреобразования за телом обтекания, d – ширина тела обтекания, μ – кинематическая вязкость измеряемой жидкости, a и b – коэффициенты уравнения, значения которых находятся по результатам натурных испытаний.

$$St = a + \frac{b}{(f \cdot d^2)/\mu} \quad (19)$$

Кинематическая вязкости среды – справочная величина, выбирается из таблиц зависимости от температуры $\mu(t)$ и для воды описывается эмпирической формулой:

$$\mu(t) = \frac{1,78 \cdot 10^{-6}}{1 + 0,0337 \cdot t + 0,000221 \cdot t^2} \quad (20)$$

Описание и использование зависимостей кинематической вязкости для других жидких сред является перспективным направлением исследований, позволяющим расширить предложенный подход на измерения других сред.

В результате покомпонентного анализа была разработана модель ФП для вычисления объемного расхода в зависимости от частоты вихреобразования f и температуры измеряемой среды t в виде:

$$Q(f, t) = \pi \cdot \frac{D'(t)^2}{4} \cdot d'(t) \cdot \frac{1}{a + \frac{b}{f \cdot d^2 / \mu(t)}} \cdot f, \quad (21)$$

где $D'(t)$ и $d'(t)$ – диаметр проточной части и характерный размер тела обтекания при соответствующей температуре, a и b – коэффициенты модели (индивидуальные для каждого отдельного расходомера), $\mu(t)$ – кинематическая вязкость измеряемой среды.

Разработанный алгоритм перебора, основанный на методе всех возможных регрессий и показателе сложности, является простым в понимании и реализации инструментом, и применим при наличии экспериментальных данных для исследуемой модели расходомера. Данный метод удобен для крупносерийного производства расходомеров небольших ДУ (менее 50 мм), однако, редкость горячеводных стендов для расходомеров больших ДУ ограничивает применение данного алгоритма.

Метод поэлементного анализа уравнения измерения лишен вышеупомянутого ограничения применения и имеет следующие преимущества:

- отсутствие необходимости испытаний расходомеров больших ДУ на горячеводном стенде, что достигается за счет разделения составляющих уравнения предложенной модели ФП на две части: зависящие от температуры измеряемой среды ($D'(t)$, $d'(t)$, $\mu(t)$)

и зависимые от влияния геометрических размеров проточной части и тела обтекания конкретного расходомера (коэффициенты а и б);

- уменьшение количества испытаний при производстве, необходимых для определения коэффициентов модели за счет уменьшения коэффициентов до двух.

В третьей главе описан адаптивный алгоритм обработки информации о частоте вихреобразования, позволяющий повысить точность измерения при установившемся и изменяющемся расходах.

В ВР существует зависимость между частотой (скоростью) поступления информации о частоте вихреобразования и расходом жидкости (скоростью течения). С целью демонстрации этого ключевого отличия вихревых расходомеров рассмотрим функциональную схему вихреакустического расходомера на рисунке 4. Конструкцию ВР укрупненно можно представить в виде шести блоков.

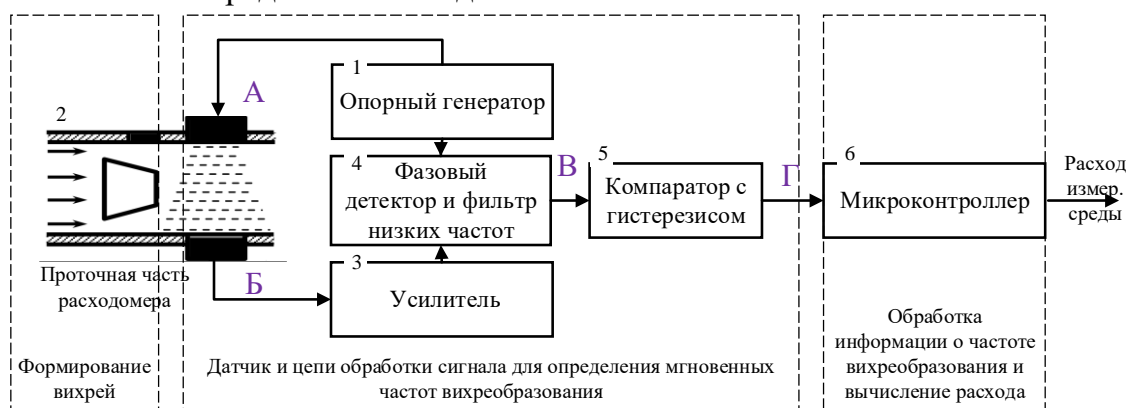


Рисунок 4 – Функциональная схема вихреакустического расходомера

На рисунке 5 приведены временные диаграммы сигналов в соответствующих точках функциональной схемы.

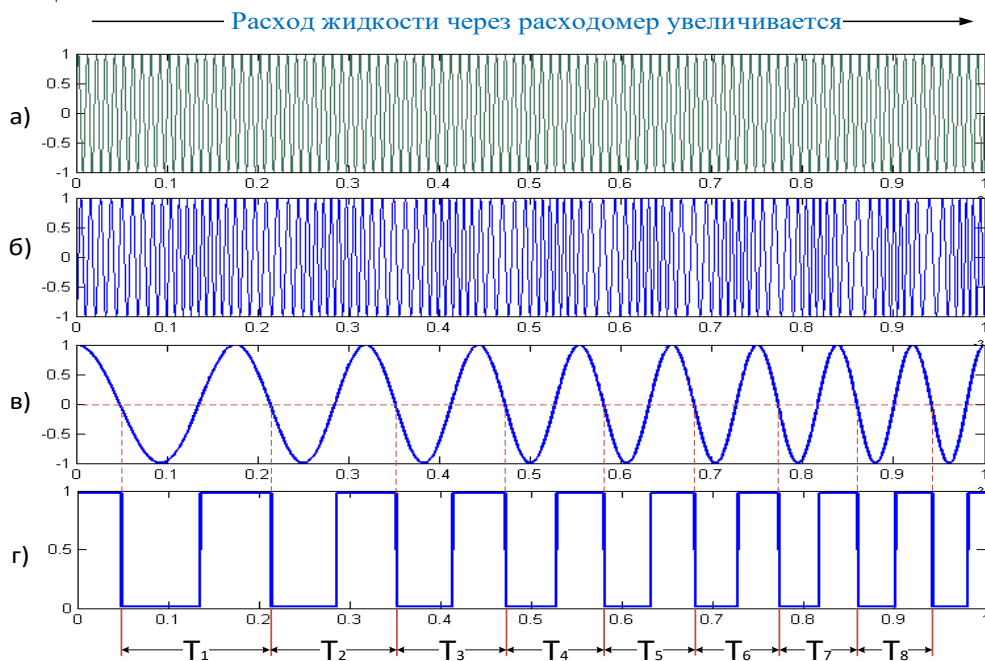


Рисунок 5 – Временная диаграмма работы вихреакустического расходомера.

В таблице 5 приведено описание сигналов, представленных на временной диаграмме и описан механизм формирования в памяти микроконтроллера временного ряда значений мгновенных частот вихреобразования.

Таблица 5 – Описание сигналов временной диаграммы

Сигнал	Характер сигнала	Назначение
Рис. 5 а	Высокочастотный сигнал постоянной частоты (точка А рисунок 4)	Опорный генератор формирует сигнал, необходимый для возбуждения пьезопреобразователя (излучатель). Высокочастотный электрический сигнал преобразуется в механические колебания и излучается в измеряемую среду в виде ультразвуковой волны.
Рис. 5 б	Высокочастотный сигнал, модулированный частотой вихреобразования (точка Б рисунок 4)	Приёмный пьезопреобразователь преобразует механические колебания в электрический высокочастотный модулированный сигнал. Ультразвуковой сигнал, проходя сквозь поток, в котором за телом обтекания образуются вихри, приобретает модулирование по фазе пропорциональное частоте вихрей.
Рис. 5 в	Низкочастотный сигнал с частотой вихреобразования (точка В рисунок 4)	Принятый сигнал усиливается и вместе с сигналом с опорного генератора подается на вход фазового детектора. В результате, с помощью фазового детектора и фильтра низких частот выделяется синусоидальный сигнал, частота которого равна частоте вихреобразования.
Рис. 5 г	Преобразованный низкочастотный сигнал прямоугольной формы (точка Г рисунок 4)	Полученный сигнал подается на компаратор и на вход микроконтроллера, где производится измерение длительности периодов сигнала. В результате получаем информацию о мгновенных значениях частоты ($1/T_i$ T_i -период) вихреобразования в виде цифровых отсчетов.

Из рисунка 5 и описания сигналов в таблице 5 видно, что появление отсчета в цифровом виде в микроконтроллере расходомера происходит неравномерно и зависит от частоты самого сигнала, то есть от измеряемого расхода. При применении алгоритмов обработки информации, таких как: скользящее среднее и медианное усреднение с фиксированной шириной окна (распространённые методы), вышеназванная особенность вносит существенный вклад в погрешность измерения накопленного объема в условиях импульсного изменения расхода.

Суть предложенного адаптивного алгоритма заключается в том, чтобы использовать разные методы обработки временного ряда мгновенных значений частоты вихреобразования (рисунок 6) в зависимости от режима измерения [8, 11].

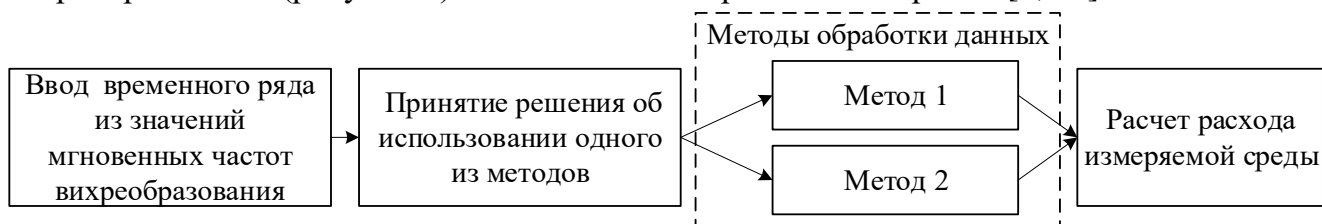


Рисунок 6 – Функциональная схема адаптивного алгоритма.

Выделены и описаны состояния, возникающие при измерении расхода в АСУ ТП (таблица 6). Работу расходомера можно рассматривать в виде последовательности режимов, сменяющих друг друга в произвольном порядке.

Для определения режима работы расходомера необходимо, в каждый момент времени определять изменчивость мгновенных значений частот вихреобразования и наличие тренда. Были выбраны два показателя: коэффициент вариации V_k и критерий обнаружения тренда – критерии инверсий.

Таблица 6 – Режимы работы расходомера

Режим расхода	Описание
Установившийся расход	Значения мгновенных частот вихреобразования (как следствие и расхода) изменяются незначительно. Во временном ряду не обнаруживается тренд.
Изменяющийся расход	Значения мгновенных частот изменяются в широком диапазоне. Во временном ряду присутствует однонаправленное увеличение или уменьшение расхода (тренд).
Внештатный режим	Работа вне заданного диапазона частот или изменение значений мгновенных частот в широком диапазоне при отсутствии тренда во временном ряду.

Коэффициент вариации V_k характеризует степень разброса частоты вихреобразования и находится по формуле (22), где числитель представляет собой среднеквадратическое отклонение для массива значений мгновенных частот F_n , состоящего из элементов f_i , а знаменатель f_{cp} - среднее значение массива F_n .

$$V_k = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (f_i - f_{cp})^2}{m}} / f_{cp} \cdot 100\% \quad (22)$$

Коэффициент вариации в области больших и средних расходов является постоянной величиной, равной единицам процентов (2 %-4 %), а в зоне малых расходов резко увеличивается до 10 %.

Критерий обнаружения тренда реализуется за счет применения статистического критерия инверсий. Он прост в вычислении и применим к объемам выборки, начиная с 30 элементов. Согласно критерию инверсий, для обнаружения тренда выдвигается гипотеза H_0 об отсутствии тренда в массиве данных F_n . Рассматривается последовательность из n элементов массива F_n и подсчитывается, сколько раз в последовательности имеет место неравенство $f_i > f_j$ при $i < j$. Каждое такое неравенство называется инверсией I . Далее переходим от числа инверсий I к нормализованному показателю I^* по формуле (23), где $E(n)$ - математическое ожидание, вычисляемое как $E(n) = n \cdot (n - 1) / 4$, $D(n)$ - дисперсия, вычисляемая как $D(n) = (2n^3 + 3n^2 - 5n) / 72$, n - количество элементов выборки.

$$I^* = \frac{I - E(n)}{\sqrt{D(n)}} \quad (23)$$

Гипотеза об отсутствии тренда не отклоняется (тренда в данных нет), если выполняется условие $I_{\alpha/2} < I^* < I_{1-\alpha/2}$, где α - уровень значимости, заданный для проверки гипотезы, в противном случае тренд в данных присутствует.

Если наличие тренда в проверяемом массиве данных F_n обозначим за «1», отсутствие «0», превышение порога L коэффициентом вариации V_k ($V_k \geq L$) обозначим «1», в противном случае ($V_k < L$) обозначим «0», то возможно составить таблицу состояний адаптивного алгоритма при принятии решения об определении режима расхода.

Таблица 7 – Таблица определения режима работы расходомера

Наличие тренда	Превышение порога коэффициентом вариации	Режим расхода	Метод обработки данных
1 (да)	1 ($V_k \geq L$)	Изменяющийся	Экспоненциальное сглаживание
1 (да)	0 ($V_k < L$)		
0 (нет)	1 ($V_k \geq L$)	Внештатный	Выдается сообщение об ошибке
0 (нет)	0 ($V_k < L$)	Установившийся	Скользящее среднее

При установившемся режиме оценка частоты вихреобразования M_i вычисляется с помощью скользящего среднего (24), где f_i – мгновенное значение частоты вихреобразования из массива F_n ;

$$M_i = \sum_{i=1}^n f_i/n \quad (24)$$

В случае изменяющегося расхода применяется экспоненциальное сглаживание первого порядка согласно формуле (25), где E_{i-1} – оценки частоты вихреобразования, полученные с помощью экспоненциального сглаживания на $i-1$ измерении, β – параметр экспоненциального сглаживания. Экспоненциальное сглаживание позволяет быстро приближаться к значению изменяющегося расхода и подавлять выбросы измерений.

$$E_i = f_i \cdot \beta + (1 - \beta) \cdot E_{i-1} \quad (25)$$

Взаимодействие подпрограмм адаптивного алгоритма обработки информации о частоте вихреобразования представлено на рисунке 7.

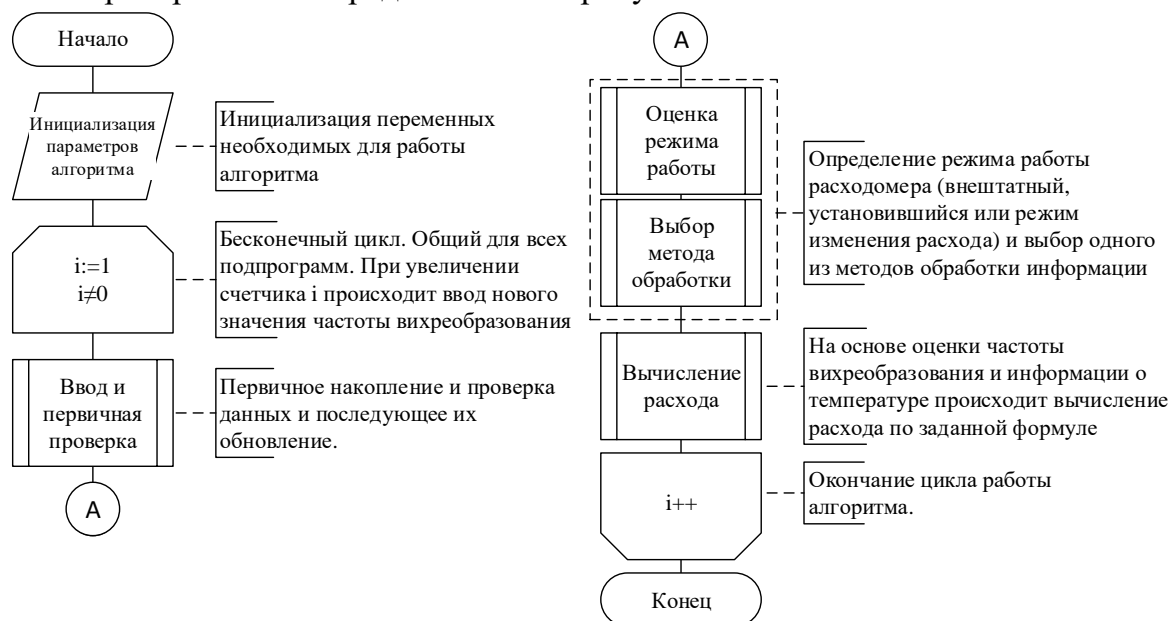


Рисунок 7 – Адаптивный алгоритм обработки информации о частоте вихреобразования

Далее рассмотрим подпрограммы (этапы) адаптивного алгоритма. *Накопление и первичная проверка данных.* Результатом работы данной части алгоритма является массив данных F_n о частоте вихреобразования. *Определение режима работы.* Результатом работы данной части алгоритма является заключение о режиме работы расходомера: установившийся режим, режим изменяющегося расхода, внештатный режим работы. В случаи детектирования последнего режима выдается сообщение пользователю. *Реализация выбранного метода обработки данных и вычисление расхода* на основе информации о частоте вихреобразования. Результатом работы является найденное значение действительной частоты вихреобразования и вычисленный расход с применением функции преобразования из главы 2.

В четвертой главе проведено экспериментальное исследование предложенной модели функции преобразования, полученной покомпонентным анализом, и адаптивного алгоритма обработки информации о мгновенных частотах вихреобразования.

На основе плана эксперимента, описанного в главе 2, разработана программа испытаний. Объект испытаний: 15 ВР (по 5 устройств, ДУ 25, 32, 50). Каждый расходомер

был испытан на 84 режимах (7 выбранных температур измеряемой среды, 12 режимов расхода измеряемой среды).

В результате выполнения программы испытаний [9] для каждого расходомера были получены массивы данных. На основе этих данных были вычислены остальные необходимые для исследования величины и сведены в таблицу 8. Таким образом, для каждого испытанного расходомера был получен массив данных из 1008 элементов.

Таблица 8 – Необходимые данные для нахождения функции преобразования

Обозначение, единицы измерения	Физический смысл и особенности обработки данных
Величины, полученные во время эксперимента	
$t, ^\circ\text{C}$	Температура измеримой среды. Вычисляется как среднее значение за время испытания
$V_{изм}, \text{M}^3$	Объем, измеренный испытуемым расходомером. Получен посредством импульсного выхода испытуемого расходомера
$V_{эт}, \text{M}^3$	Эталонный объем. Получен с импульсного выхода эталонного расходомера
$Q_{эт}, \text{M}^3/\text{ч}$	Эталонный расход. Определяется расходомерным стендом, как эталонный объем $V_{эт}$, деленный на длительность испытания
Конструкционные данные	
$D(t), \text{м}$ и $d(t), \text{м}$	Диаметр проточной части и характерный размер тела обтекания. Для каждой температуры измеряемой среды вычисляется с учетом поправки на линейное расширение материала проточной части
$\theta, ^\circ\text{C}^{-1}$	Коэффициент линейного расширения. Справочные данные
Вычисленные данные	
$Q_{изм}, \text{M}^3/\text{ч}$	Средний измеренный расход.
$f, \text{Гц}$	Средняя частота вихреобразования испытуемого расходомера. Рассчитывается на основе $Q_{изм}$ и знаний об используемой функции преобразования
$\mu(t), \text{Па}\cdot\text{с}$	Кинематическая вязкость воды (измеряемой среды).
St	Число Струхала. Безразмерная величина.
Ro	Число Рошко. Безразмерная величина.

Для диагностирования устойчивости работы расходомеров во время проведения тестов, а также для получения информации о мгновенных частотах, в ходе испытаний использовалась схема, приведенная на рисунке 8. Численные значения мгновенных частот испытуемого расходомера и расходов с эталонных расходомеров были получены, используя протокол Modbus, и сохранялись в ПК. Модуль ввода-вывода использовался для визуального контроля сигнала.

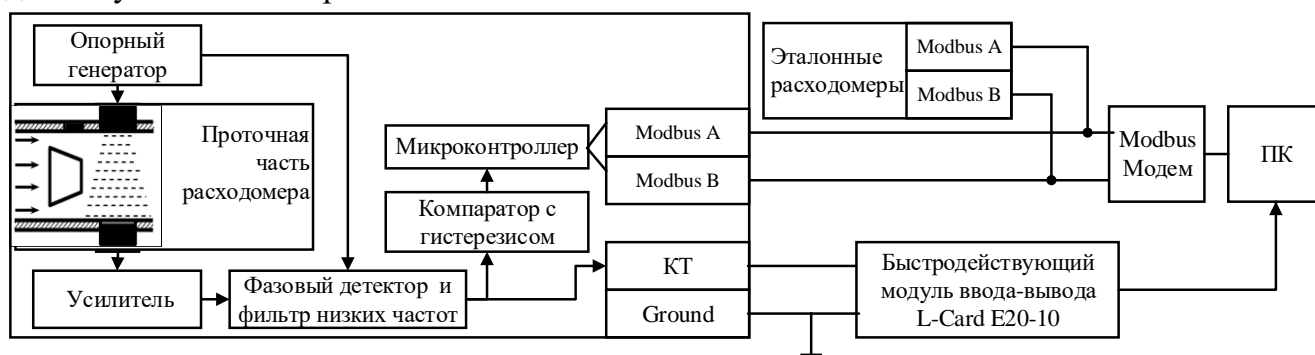


Рисунок 8 – Схема соединений для регистрации информации о мгновенных частотах при проведении эксперимента

Полученные данные о мгновенных частотах вихреобразования и мгновенных расходах были подвергнуты проверке на отклонение распределения вероятностей от нормального закона распределения с помощью критерия Эпса-Палли. Было показано,

что распределения мгновенных частот и мгновенных расходов не противоречат нормальному распределению вероятностей при уровне значимости $\alpha=0,05$. С помощью критерия обнаружения промахов (МИ 2091-90) было установлено, что в выборках мгновенных частот количество промахов не превышает 0,5%.

Для данных о мгновенной частоте вихреобразования и мгновенных расходов с эталонных расходомеров рассчитан коэффициент вариации V_k по формуле (26), где x_i – значение мгновенных значений в выборке, n – количество элементов в выборке, \bar{x} – среднее значение выборки. Результаты расчётов представлены на рисунке 9.

$$V_k = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}{\bar{x}} \cdot 100\% \quad (26)$$

В области малых расходов коэффициент вариации мгновенных частот возрастает до (8-10) %, однако, коэффициент вариации мгновенных значений эталонного расхода не демонстрирует какого-либо тренда и колеблется от 0,15% до 0,3% во всем диапазоне расходов, что демонстрирует независимость стабильности воспроизведения эталонного расхода и коэффициента вариации мгновенных частот вихреобразования.

Полученные данные о характере временного ряда мгновенных частот вихреобразования позволяют использовать их для моделирования временного ряда мгновенных частот для расходомеров различных ДУ в диапазоне их измерения [6].

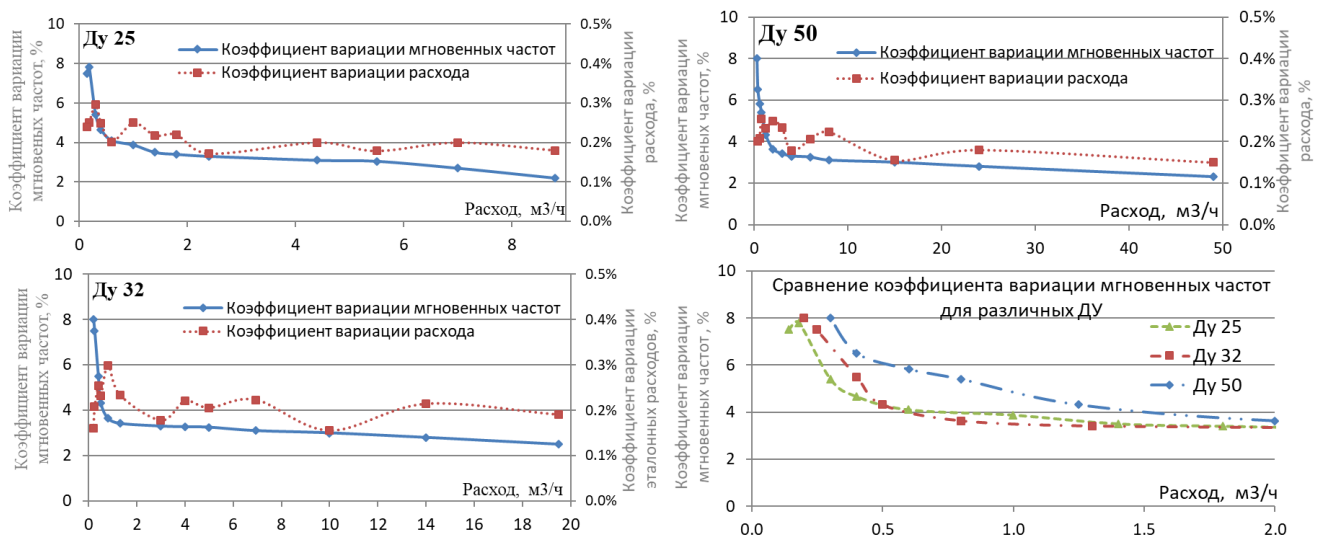


Рисунок 9 – Зависимость коэффициента вариации от величины расхода

Для демонстрации того, что модель, полученная методом поэлементного анализа, ведет к повышению точности измерения на малых расходах в широком диапазоне температур измеряемой среды, применим простую линейную однофакторную (классическую ФП) и разработанную модель к одному и тому же набору данных. На рисунке 10 приведены экспериментальных данных расходомера ДУ 32, в качестве классической ФП была использован функция $Q(f) = k_1 \cdot f + k_2$ с значениями $k_1 = 0,0548$, $k_2 = -0,04327$, в то время как предлагаемая функция имеет вид (22) и значения коэффициентов $a = 0,2472$ и $b = 11,192$. Для исследуемого образца, согласно конструкторской документации, диаметр проточной части D составил 0.026 м, ширина тела обтекания d составила 0.007 м, коэффициент линейного расширения стали α равен $16 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

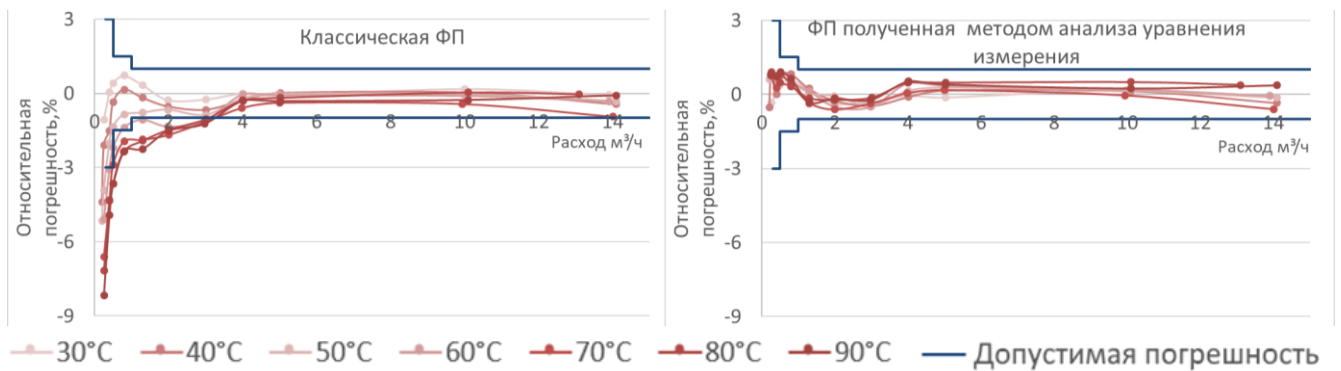


Рисунок 10 – Сравнение простой однофакторной модели и предложенной модели

Рисунок 10 демонстрирует недостаток классической модели функции преобразования при измерении малых расходов (для данного ДУ менее $2 \text{ м}^3/\text{ч}$), в то время как предлагаемая модель функции преобразования обеспечивает повышение точности измерения на малых расходах и в широком диапазоне измеряемых температур. Данный подход был применен ко всем исследованным ДУ (25, 32, 50), погрешности измерения во всем диапазоне расходов и температур не превысили 1%.

Экспериментальным доказательством разделения модели ФП на две части (зависимые от температуры измеряемой среды и от влияния геометрических размеров проточной части и тела обтекания) является то, что применение коэффициентов a и b , вычисленных в ходе испытаний при 30°C измеряемой среды, позволило обеспечить требуемую точность при температурах от 40°C до 90°C . Иными словами, при использовании предлагаемой ФП для различных ДУ сохраняются температурные зависимости и варьируются только коэффициенты a и b . Таким образом, обеспечивается возможность применения модели ФП для других типоразмеров ВР – *масштабируемость*.

Полученные экспериментальные данные показывают, что при соблюдении подобия геометрических размеров проточной части, коэффициенты модели различных ДУ близки друг к другу, и значение коэффициента a зависит от параметра d/D . На рисунке 11 нанесены индивидуальные значения коэффициента a для каждого исследованного расходомера, среднее значение коэффициента a внутри каждого ДУ и значение d/D для каждого типа ДУ. Существует наглядная корреляция между значениями коэффициента a и отношением диаметра проточной части и характерного размера тела обтекания d/D , отклонения коэффициентов могут объясняться отклонениями от номинального размера тела обтекания и диаметра проточной части.

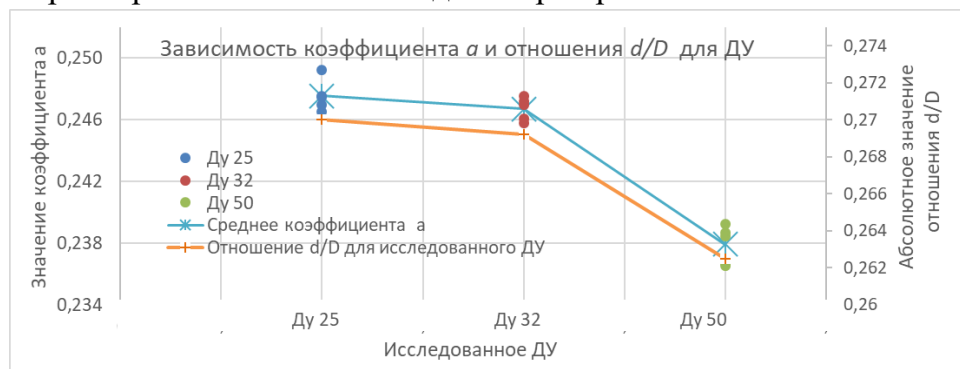


Рисунок 11 – Зависимость коэффициента a от конструкции расходомера

Практическая ценность предложенной ФП заключается в том, что она не требует горячеводных испытаний. При стандартных условиях производства и поверки ВР (комнатная температура измеряемой среды), ФП позволяет сократить количество испытуемых точек до двух, поскольку имеет всего два коэффициента.

С целью проверки разработанного алгоритма обработки информации о частоте вихреобразования была предложена имитационная модель (рисунок 12), позволяющая моделировать временной ряд мгновенных частот и производить его обработку с применением различных алгоритмов.

На вход модели подаются моделируемые значения эталонного расхода Q_d и характер изменения его во времени. Мгновенные значения частот вихреобразования в любой момент времени находятся, согласно линейной зависимости $F_d = Q_d/K$, где F_d – массив мгновенных частот, K – коэффициент пропорциональности. Шум, характерный для заданного расхода и моделируемого ВР, добавляется к мгновенным значениям частот. На выходе сумматора получаем массив моментов времени появления отсчетов мгновенных частот и временной ряд частот с заданным коэффициентом вариации. Влияние ФП на результат работы имитационной модели исключено за счет применения одинакового коэффициента K как при преобразовании входного значения расхода Q_d во временной ряд мгновенных частот, так и при преобразовании оценки частоты вихреобразования в измеренный расход $Q_{изм}$. Выход модели – погрешность измерения мгновенных расходов и накопленного объема, т.е. оценка качества примененного алгоритма.

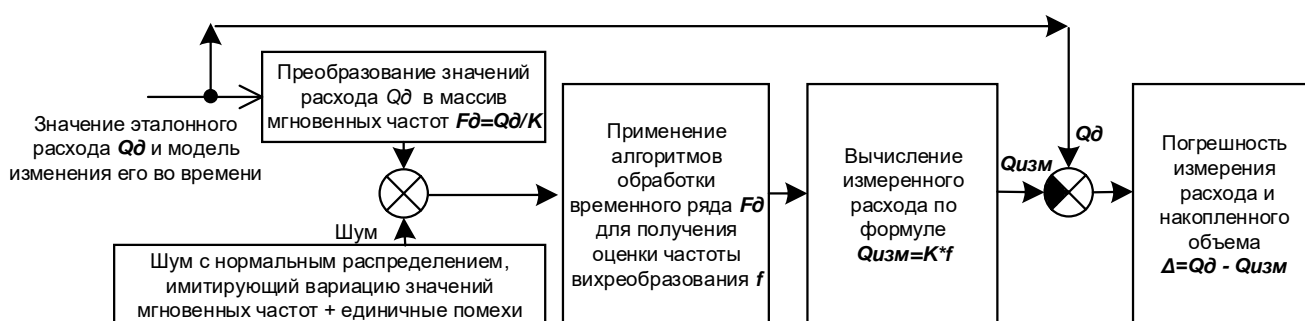


Рисунок 12 – Имитационная модель обработки информации о частоте вихреобразования

На основе имитационной модели была разработана программа в среде Matlab, позволяющая реализовать моделирование временного ряда мгновенных частот ВР и применение к нему любого алгоритма. Для проверки разработанного адаптивного алгоритма было проведено сравнение предложенного алгоритма с широко распространенными (скользящее среднее и медианное усреднение).

В качестве объекта для испытания в программе имитируем поведение расходомера Ду32 с ФП $Q = K*f$, где $K=0,054$, а диапазон измерения расходомера составляет от $0,25 \text{ м}^3/\text{ч}$ до $20 \text{ м}^3/\text{ч}$ (мгновенные частоты варьируются от 4,5 до 370 Гц). В качестве воздействия был выбран режим изменения расхода, состоящий из трех отрезков времени с постоянным расходом и двух с изменением расхода. Функционирование ВР в подобном режиме характерно для тепlopункта многоквартирного дома.

Для трех испытуемых алгоритмов было задано окно усреднения 61 отсчетов, при этом для адаптивного алгоритма заданы еще два параметра. Порог срабатывания L при

изменении коэффициента вариации задан равным 10%, так как коэффициент вариации исследованных расходомеров (рисунок 9) не превышал эту величину. С целью получения сглаженного значения мгновенного расхода на выходе расходомера коэффициент экспоненциального сглаживания задан равным 0,1. На рисунке 13 представлены результаты проведенного моделирования.

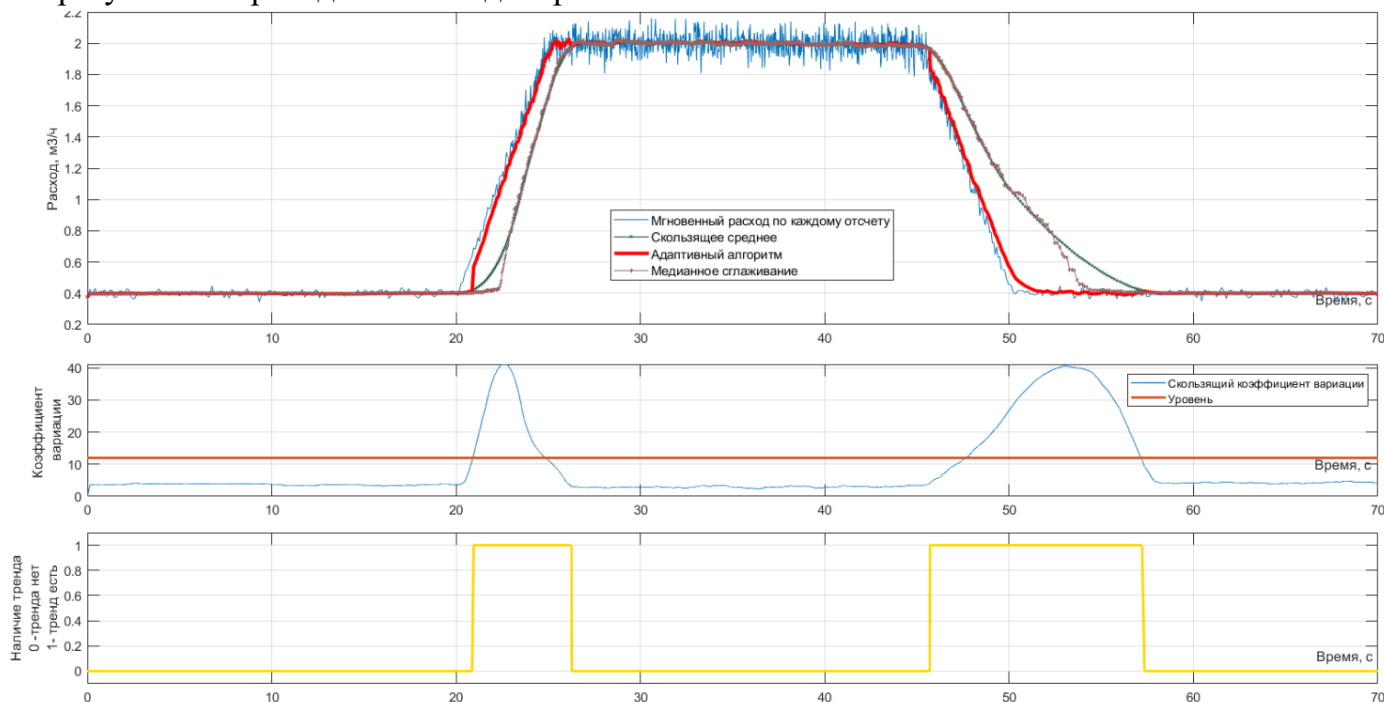


Рисунок 13 – Сравнение работы трех алгоритмов и особенности обработки информации о частоте вихреобразования адаптивным алгоритмом

Мгновенные значения частот вихреобразования, сформированные имитационной моделью на выходе сумматора, нестабильны ввиду добавленного шума обусловленного конструктивными особенностями ВР, что при вычислении расхода по каждому из отсчетов мгновенных значений частоты приводит к значительным колебаниям мгновенных значений расхода. Алгоритмы, основанные на скользящем и медианном среднем, сглаживают эти колебания, однако, имеют заметное запаздывание при изменении расхода, причем запаздывание при уменьшении расхода значительно больше, чем при его возрастании, что и приводит к погрешности измерения накопленного объема. Разработанный адаптивный алгоритм демонстрирует значительно меньшее запаздывание по сравнению с другими алгоритмами, особенно при снижении расхода.

Для численного сравнения качества работы алгоритмов в таблице 9 приведены погрешности измерения накопленного объема для трех алгоритмов. Ввиду наличия случайной составляющей для получения средней погрешности измерения накопленного объема эксперимент проведен 10 раз и вычислено среднее значение. Из таблицы видно, что вне зависимости от характера изменения расхода (линейное изменение, экспоненциальное изменение) разработанный адаптивный алгоритм обеспечивает наименьшую погрешность измерения накопленного объема. Таким образом, эксперимент показал, что преимущество адаптивного алгоритма будет более ярко проявляться при динамичном измерении расходах.

Таблица 9 – Сравнение алгоритмов обработки информации о частоте вихреобразования.

№	Линейное изменение расхода			Экспоненциальное изменение расхода		
	Относительная погрешность подсчета наколенного объема (в %) при применении:					
	скользящего среднего	медианной фильтрации	адаптивного алгоритма	скользящего среднего	медианной фильтрации	адаптивного алгоритма
1	1.789	1.098	0.018	4.459	3.887	0.399
2	1.722	1.011	-0.035	4.572	3.937	0.776
3	1.772	1.136	-0.077	4.366	3.811	0.087
..
10	1.735	1.040	-0.059	4.464	3.853	0.122
Сред	1.794	1.126	0.014	4.490	3.903	0.364

С целью демонстрации преимуществ предлагаемой модели ФП и алгоритма обработки информации в различных режимах работы расходомера был запланирован и проведен натурный эксперимент. Схема эксперимента приведена на рисунке 14. В качестве испытуемых образцов были использованы два одинаковых по конструкции ВР ДУ 32, при этом различия алгоритмического обеспечения приведены на рисунке 14. В качестве эталонного расходомера использовался кориолисовый расходомер.

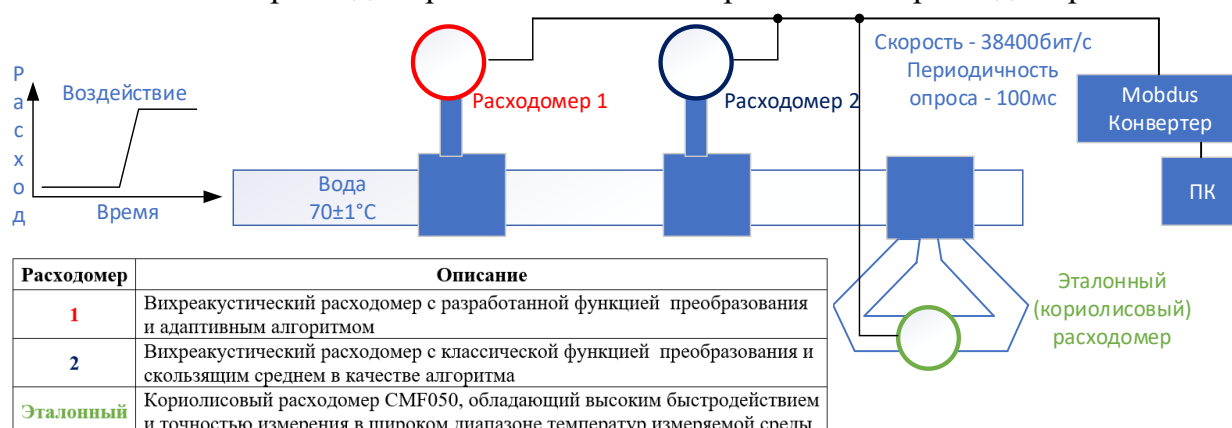


Рисунок 14 – Схема натурального эксперимента

С целью одновременной фиксации показаний с трех расходомеров связь с каждым была установлена по цифровому протоколу Modbus с максимально возможной скоростью обмена для испытуемого оборудования 38400 бит/с. Периодичность поступления информации о мгновенных расходах со всех расходомеров составляла 100 мс.

Описание хода эксперимента. Измерительная среда (вода) была нагрета до $70\pm 1^\circ\text{C}$. Расходомеры установлены в измерительную линию последовательно друг за другом с соблюдением рекомендаций производителя по длине участков до и после расходомеров. Во время эксперимента исследовалось поведение расходомеров 1 и 2 относительно эталонного на следующих режимах: стабильный установившийся расход $(0,4\pm 0,02) \text{ м}^3/\text{ч}$ и изменение расхода от $(0,4\pm 0,02) \text{ м}^3/\text{ч}$ до $(2\pm 0,5) \text{ м}^3/\text{ч}$ за 5-8 секунд. В результате эксперимента были получены синхронизированные во времени массивы данных о мгновенных расходах с 3-х расходомеров.

На рисунке 15 представлены результаты измерения мгновенных расходов при стабильном расходе $0,4 \text{ м}^3/\text{ч}$ и значения погрешности измерения испытуемых расходомеров относительно эталонного. Погрешность измерения расходомера 1 колеблется в районе (0-1) %, а расходомера 2 порядка (5-6) %, что демонстрирует

преимущество предложенных ФП и адаптивного алгоритма над классической однофакторной ФП и алгоритмом скользящего среднего при измерении малых расходов и температуре измеряемой среды, значительно отличающейся от НКУ.

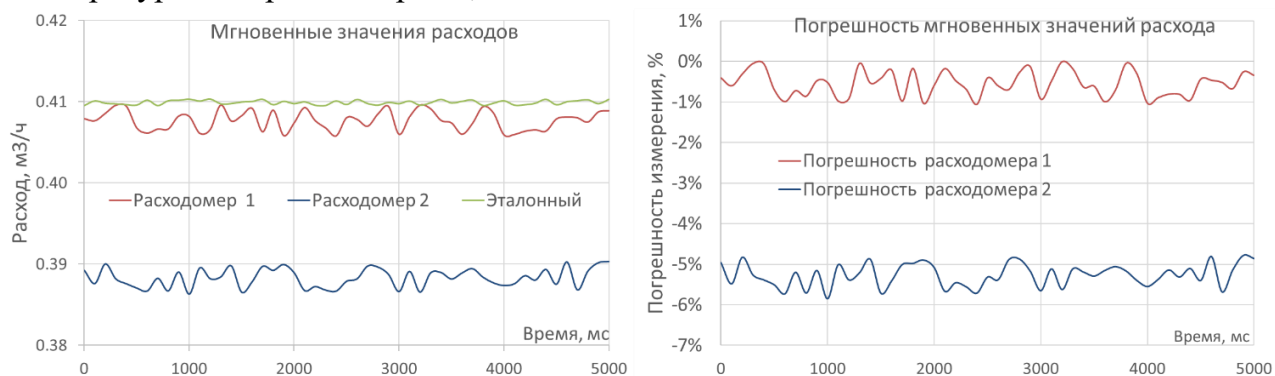


Рисунок 15 – Результаты при стабильном установившемся расходе $0,4 \text{ м}^3/\text{ч}$

При резком изменении расхода результаты измерения мгновенных значений расходов каждого из трех расходомеров изменялись как показано на рисунке 16. Расходомер 2 значительно запаздывает, в то время как расходомер 1 (с адаптивным алгоритмом) начал быстро стремиться к показаниям эталонного расходомера за счет изменения метода обработки информации о мгновенных частотах (экспоненциальное сглаживание вместо скользящего среднего).

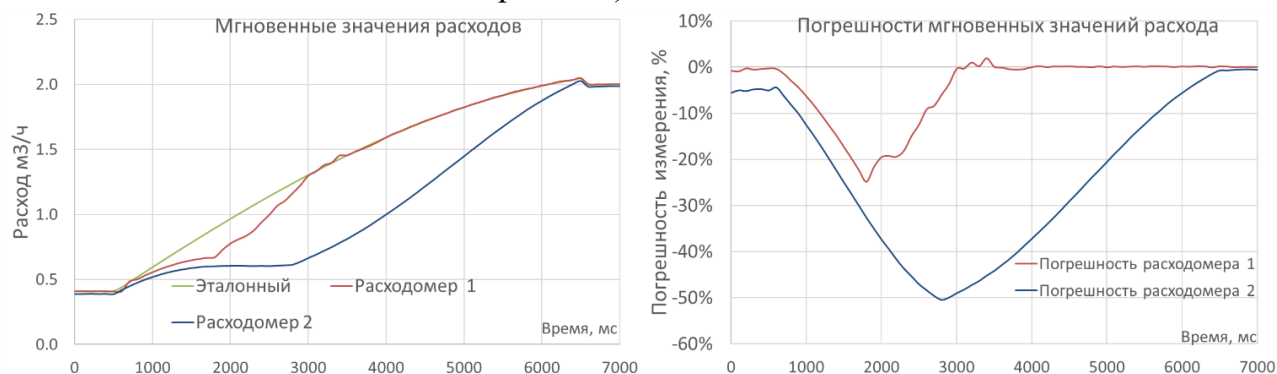


Рисунок 16 – Результат при изменении расхода от $(0,4 \pm 0,02) \text{ м}^3/\text{ч}$ до $(2 \pm 0,5) \text{ м}^3/\text{ч}$

Из рисунка видно, что до начала реакции на изменение расхода (первые 500 мс), разница погрешностей расходомеров 1 и 2 составляла $\sim 5\%$. Причины возникновения такой разницы описаны выше. Рассматривая промежуток времени от начала изменения расхода до выхода на установившийся расход, стоит отметить, что погрешность мгновенных расходов расходомера 2 доходила до 50% , погрешность же расходомера 1 не превышала вдвое меньшей величины, и к моменту достижения расходомером 2 максимальной погрешности, расходомер 1 уже вернулась к около нулевым значениям.

Для каждого расходомера были проинтегрированы значения отсчетов мгновенных расходов за 7 секунд эксперимента. В результате было установлено, что погрешность накопленного объема расходомера 2 составила минус $22,5\%$ (по отношению к эталонному расходомеру), в то время как погрешность накопленного объема расходомера 1 равна минус $2,77\%$.

Таким образом, проведенный эксперимент показывает, что предложенная модель ФП и адаптивный алгоритм позволяют повысить точность измерения ВР в широком диапазоне расходов, температур измеряемой среды и режимах работы расходомера.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

По итогам диссертационной работы соискателем были получены следующие основные результаты и выводы:

1 Разработан алгоритм поиска моделей функции преобразования, основанный на методе регрессионного анализа всех возможных регрессий и показателе сложности модели. Показано, что исходные данные для построения моделей гетероскедастичны, и для поиска коэффициентов модели необходимо использовать взвешенный метод наименьших квадратов.

2 Разработана методика поэлементного анализа уравнения измерения вихреакустического расходомера, оценено влияние каждого компонента, разработана модель функции преобразования, основой которой является описание поведения числа Струхала (как компонента, дающего наибольший вклад в результирующую погрешность) в широком диапазоне расходов и температур измеряемой среды.

Предложенная двухфакторная модель функции преобразования позволяет повысить точность измерения во всем диапазоне измерения расходов, позволяет проводить масштабированность модели ФП на расходомеры больших типоразмеров (ДУ) и не требует горячеводных испытаний при выпуске расходомеров из производства.

3 Продемонстрирована ключевая особенность вихреакустического расходомера, а именно зависимость скорости поступления информации о частоте вихреобразования от измеряемого расхода. Разработан адаптивный алгоритм обработки информации о частоте вихреобразования, позволяющий за счет введенного критерия адаптации сократить погрешность измерения расхода при установившемся и изменяющемся режимах измерения расхода.

4 Предложена имитационная модель вихреакустического расходомера и на ее основе разработано программное обеспечение, позволяющее производить моделирование временного ряда мгновенных частот вихреобразования с учетом показанной ключевой особенности вихреакустического расходомера (см п.3).

5 Экспериментально подтверждено, что предлагаемые модели функции преобразования и алгоритм обработки информации о частоте вихреобразования позволяют повысить точность измерения в области малых расходов вихреакустических расходомеров в широком диапазоне температур измеряемой среды (воды) при установившемся и изменяющемся режимах расхода.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в ведущих изданиях, рекомендованных ВАК:

- 1 Дружков, А.М. Выбор модели функции преобразования вихреакустических расходомеров / А.П. Лапин, А.М. Дружков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2012. – Вып. 17 (294). – С. 161–164.
- 2 Дружков, А.М. Применение взвешенного метода наименьших квадратов при исследовании функции преобразования вихреакустических расходомеров / А.П. Лапин, А.М. Дружков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2013. – Т. 12, № 2. – С. 109–113.

- 3 Дружков, А.М. Выбор и исследование двухфакторной модели функции преобразования вихреакустических расходомеров / А.П. Лапин, А.М. Дружков // Вестник ЮУрГУ. Серия. «Компьютерные технологии управление, радиоэлектроника». – 2013. – Т.13, № 3. – С. 4–12.
- 4 Дружков, А.М. Анализ зависимости числа Струхала в уравнении измерения вихреакустического расходомера / А.П. Лапин, А.М. Дружков, К.В. Кузнецова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии управление, радиоэлектроника». – 2013. – Том.13, № 4. – С. 70-77.
- 5 Дружков, А.М. Вихревой метод измерения расхода: история вопроса и направления исследований / А.П. Лапин, А.М. Дружков, К.В. Кузнецова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии управление, радиоэлектроника». – 2014. – Том. 14, № 3. – С 19-28.
- 6 Дружков, А.М. Исследование стабильности частоты вихреобразования в вихреакустическом расходомере. / А.П. Лапин, А.М. Дружков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии управление, радиоэлектроника». – 2014. – Том.14, № 4. – С 89-98.
- 7 Дружков, А.М. Вихревой метод измерения расхода: модели вихреобразования и современные средства моделирования / А.П. Лапин, А.М. Дружков, К.В. Кузнецова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии управление, радиоэлектроника». – 2014. – Том. 14, № 4. – С.28-34.
- 8 Druzhkov, A.M. Adaptive algorithm for estimating vortex frequencies in vortex sonic flowmeters / A.P. Lapin, A.M. Druzhkov // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии управление, радиоэлектроника». – 2016. – Том.16, № 3. – С. 75-82.
- 9 Дружков, А.М. Проблемы поверки средств измерений в «Индустрии 4.0» на примере удалённой поверки расходомеров / А.М. Дружков, Н.Ю. Петров, А.Л. Шестаков // Приборы. – 2020. – № 6 (240). – С. 1-8.

Патент:

- 10 Пат. 2717701 Российская Федерация, МПК G 01 F 1/32. Способ измерения объемного расхода в вихревых расходомерах / Богданов В.Д., Дружков А.М. – № 2019128486; заявл. 10.09.19; опубл. 25.03.20, Бюл. № 9 – 16 с.

Публикации в других изданиях:

- 11 Дружков, А.М. Алгоритм обработки информации в вихреакустических расходомерах В кн.: Научная сессия ТУСУР - 2016: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых. Томск, 25-27 мая 2016 г. – С. 50-52.