

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»

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)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Шестаков Александр Леонидович

Челябинск-2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 ВИХРЕАКУСТИЧЕСКИЕ РАСХОДОМЕРЫ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ И МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ИХ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК10	
1.1 Типовые применения вихреакустических расходомеров в автоматизированных схемах управления технологическим процессом11	
1.2 Вихревой принцип измерения расхода, функциональная схема вихреакустического расходомера.....	19
1.3 Классификация методов улучшения метрологических характеристик вихревого расходомера.....	22
1.4 Цель и задачи исследования	30
2 ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ МОДЕЛИ ФУНКЦИИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ВИХРЕАКУСТИЧЕСКИХ РАСХОДОМЕРОВ	33
2.1 Предпосылки и планирование эксперимента для построения модели функции преобразования	34
2.2 Поиск модели на основе регрессионного анализа.....	43
2.3 Поиск модели путем покомпонентного анализа уравнения измерения57	
2.4 Качественное сравнение разработанного алгоритма и метода	63
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2	65
3 АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ О ЧАСТОТЕ ВИХРЕОБРАЗОВАНИЯ В ВИХРЕАКУСТИЧЕСКИХ РАСХОДОМЕРАХ .	67
3.1 Разработка требований к алгоритму оценки частоты вихреобразования в вихреакустических расходомерах	68
3.2 Структура адаптивного алгоритма оценки частоты вихреобразования72	
3.3 Сравнение предложенного алгоритма с применяемыми в настоящее время.....	82
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3	84
4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДЛОЖЕННЫХ АЛГОРИТМОВ И МЕТОДА ДЛЯ ВИХРЕАКУСТИЧЕСКИХ РАСХОДОМЕРОВ.....	85

4.1	Получение экспериментальных данных.....	86
4.2	Демонстрация возможностей предложенной модели функции преобразования.....	92
4.3	Сравнение работы алгоритмов обработки информации о частоте вихреобразования.....	100
4.4	Демонстрация совместной работы предложенной двухфакторной функции преобразования и адаптивного алгоритма в реальных условиях эксплуатации.....	107
	ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4	111
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	114
	Библиографический список	116
	Приложение А Исследование простых однофакторных моделей и значимости фактора температуры измеряемой среды	128
	Приложение Б Описание грядководного стенда.....	133
	Приложение В Проверка данных на гетероседастичность.....	136
	Приложение Г Методы обработки данных о мгновенных частотах	141
	Приложение Д Результаты применения предлагаемой модели функции преобразования.....	145
	Приложение Е Патент РФ	150
	Приложение Ж Акт внедрения	151

ВВЕДЕНИЕ

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 входят большое количество технических устройств, в том числе и средства измерения физических величин.

Одной из наиболее распространённых задач в АСУ ТП является измерение расхода жидкости. Для реализации данных измерений в тяжелых условиях эксплуатации хорошо себя зарекомендовали вихревые расходомеры (в частности, вихреакустические). Однако, им присущи недостатки в виде больших погрешностей измерения малых расходов.

Согласно МИ 2301-2000 «ГСИ. Обеспечение эффективности измерения 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 [3]. Повышение точности измерения вихреакустического расходомера особенно актуально при измерении в области малых расходов, так как нормируемая погрешность именно в этой области в 3–5 раза больше, чем в остальном диапазоне измерения [16, 17, 56].

Согласно работам [34, 94], существуют разнообразные технические решения для повышения точности измерения вихревых расходомеров, большинство из которых предполагают значительные изменения в конструкции расходомеров. Однако, благодаря широкому внедрению микроконтроллеров в конструкцию средств измерения, стал возможным переход от схемотехнических решений к алгоритмическим методам повышения точности измерения. В качестве алгоритмических методов повышения точности измерения малых расходов в вихреакустических расходомерах применимы выбор функции преобразования [29, 36] и разработка алгоритмов обработки данных [19]. Вышеперечисленные методы являются наименее затратными для использования в рамках уже

разработанных и серийно выпускаемых расходомерах, они не влекут изменения в конструкции, и для их применения требуется лишь изменение программного обеспечения используемого микроконтроллера. В этой связи алгоритмические методы представляются наиболее перспективными.

Цель диссертационной работы: разработка алгоритмов обработки информации для повышения точности измерения вихреакустических расходомеров при измерении малых расходов жидкости в широком диапазоне температур измеряемой среды в АСУ ТП.

Основные задачи, решаемые в ходе исследования:

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 методов.

Предметом исследования являются алгоритмы обработки информации в вихреакустических расходомерах в составе АСУ ТП.

Описание содержания глав:

Первая глава посвящена рассмотрению нескольких типовых структур АСУ ТП, в которых используются вихревые расходомеры. Продемонстрировано, что вихреакустические расходомеры (разновидность вихревых), наиболее полно удовлетворяют требованиям со стороны АСУ ТП. Отмечено, что повышение точности измерения расхода является одним из существенных резервов повышения эффективности управления АСУ ТП. Проведен обзор используемых методов повышения точности измерения вихревых расходомеров, таких как: выбор формы и геометрических параметров тела обтекания и проточной части расходомера, выбор места размещения чувствительного элемента, фильтрация сигналов с

чувствительного элемента, увеличение количества каналов измерения, введение цифровой обработки сигналов, использование алгоритмических методов обработки информации.

В результате проведенного анализа выбраны алгоритмические методы обработки информации как наиболее универсальные и наименее затратные методы повышения точности измерения вихревых расходомеров, а именно: методы выбора модели функции преобразования расходомера и алгоритм обработки информации о частоте вихреобразования.

Вторая глава диссертационной работы посвящена выбору и обоснованию функции преобразования для вихреакустического расходомера. Составлены планы проведения эксперимента для выбора двухфакторной модели функции преобразования. Предложены два подхода к поиску модели функции преобразования для вихреакустического расходомера. Один основан на регрессионном анализе, в частности на методе всех возможных регрессии, а второй на поэлементном анализе уравнения измерения. Оба подхода дают возможность получить модель функции преобразования, позволяющую повысить точность измерения малых расходов и работающую в широком диапазоне температур измеряемой среды. Проанализированы плюсы и минусы каждого из подходов.

В третьей главе рассмотрена функциональная схема вихреакустических расходомеров и механизм получения информации о частоте вихреобразования за телом обтекания. Продемонстрировано ключевое отличие вихреакустических расходомеров от остальных видов расходомеров и сформулированы ключевые требования к алгоритму обработки информации о частоте вихреобразования. Предложен и описан в виде блок-схем адаптивный алгоритм, позволяющий производить определение режима работы расходомера за счет разработанного критерия и выбирать соответствующий метод обработки временного ряда мгновенных частот вихреобразования. Разработана имитационная модель с целью демонстрации работы предложенного алгоритма и сравнения его с распространенными аналогами.

В четвертой главе приведено описание экспериментов, проведенных с целью получения данных для построения моделей функции преобразования и изучения работы алгоритма обработки информации о частоте вихреобразования.

На основе полученных данных для серийно выпускаемых расходомеров продемонстрировано, что предложенные модели позволяют увеличить точность измерения малых расходов в два раза, а также расширить диапазон измерения в области малых расходов. Показано, что предложенные модели обеспечивают заданную точность в широком диапазоне температур измеряемой среды. Демонстрированы преимущества модели функции преобразования, построенной на основе анализа уравнения измерения вихреакустического расходомера в условиях производства.

На основе анализа данных о частоте вихреобразования статистическими методами выявлены характерные особенности исследуемого временного ряда данных. Разработана программа для проведения численного моделирования изменения частоты вихреобразования в зависимости от расхода измеряемой среды, позволяющая проводить численный эксперимент для всего диапазона измерений исследуемых вихревых расходомеров с различными условными диаметрами. Таким образом, получен инструмент для проверки работоспособности предложенного адаптивного алгоритма обработки информации и сравнения его с другими широко распространёнными алгоритмами. Представлены результаты численного эксперимента, моделирующего реальный режим работы тепловыделяющего элемента. Результаты показали, что предложенный алгоритм способен обеспечивать уменьшение погрешности накопленного объема.

Научная новизна:

1 Разработан алгоритм поиска математической модели функции преобразования вихреакустических расходомеров методом всех возможных регрессий с использованием показателя сложности и взвешенного метода наименьших квадратов, позволяющей повысить точность измерения на малых расходах.

2 Предложен метод поэлементного анализа уравнения измерения вихреакустического расходомера и разработана модель функции преобразования 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, позволяющего 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.

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 работы: Результаты работы докладывались на трех конференциях: Научная сессия ТУСУР - 2016: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых. Томск, 25-27 мая 2016 г., Научно-практические конференции «Измерения: состояния, перспективы развития» (г. Челябинск, 2013 г. и 2014 г.).

Публикации: Всего по теме диссертации опубликовано 11 работ, в том числе 9 статей в отечественных изданиях из перечня ВАК. Получен патент на способ измерения. Из работ, выполненных в соавторстве, в диссертацию включены только результаты, полученные ее автором.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 104 наименований, изложенных на 151 страницах машинописного текста, включая 54 рисунка, 33 таблицы и 7 приложений.

На защиту выносятся следующие результаты, соответствующие пунктам паспорта специальности 05.13.01 Системный анализ, управление и обработка информации (промышленность):

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.

1 ВИХРЕАКУСТИЧЕСКИЕ РАСХОДОМЕРЫ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ И МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ИХ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

С целью определения возможностей и выбора пути повышения эффективности управления автоматизированными системами управления технологическими процессами рассмотрим несколько структурных схем АСУ ТП в различных отраслях производства. Особое внимание уделим средствам измерения, так как на основе информации от них разрабатываются управляющие действия [3]. В рассматриваемых системах выделим ключевые требования, предъявляемые к средствам измерения расхода. Опираясь на эти требования, выберем тип расходомеров, который наиболее полно им соответствует, и определим его ключевые характеристики, улучшение которых позволит повысить эффективность управления в рассматриваемых АСУ ТП.

Для систематизации рассмотрения возможных методов повышения метрологических характеристик расходомеров разделим методы на группы. В качестве критерия систематизации выберем принадлежность метода к определенному функциональному блоку расходомера. Проведем обзор методов повышения точности расходомеров на основе опыта отечественных и зарубежных исследователей и определим наиболее перспективные методы повышения точности. Обозначим задачи, необходимые для реализации поставленной цели диссертационной работы.

1.1 Типовые применения вихреакустических расходомеров в автоматизированных схемах управления технологическим процессом

Вопрос повышения эффективности работы систем управления технологическим процессом в различных отраслях производства приобрел высокую значимость с момента создания самих систем и остается актуальным по настоящее время. Задача измерения расхода жидкости является ключевой в целом ряде АСУ ТП. Выбор конкретного типа расходомера с целью применения в том или ином типе системы управления является сложной инженерной задачей и зависит от условий эксплуатации расходомера в системе. С целью выявления ключевых требований, предъявляемых к средствам измерения расхода, рассмотрим несколько АСУ ТП, используемых в промышленности.

1.1.1 АСУ ТП поддержания пластового давления

Интенсификация добычи нефти с уже эксплуатируемых месторождений порождает потребность повышения качества контроля за состоянием продуктивных пластов. Анализ комплекса параметров, по которым судят о состоянии разработки месторождений, показывает, что большая их часть связана с измерением расходов и объемов жидкостных, газовых и газожидкостных потоков [9].

Регулирование процесса разработки пласта осуществляется путем поддержания определенной скорости перемещения контура нефтеносности за счет регулирования количества отобранной из пласта жидкости и закачанной в него воды. При этом разность объемов, закачанной в него воды, и суммарный отбор жидкости из пласта должна стремиться к нулю [15, 26].

Весь процесс добычи нефти можно разделить на два этапа. К первому следует отнести технические средства, с помощью которых осуществляется нагнетание в нефтеносный пласт реагентов, ко второму этапу нефтедобывающие установки и систему внутрипромыслового транспорта и переработки нефти. Операции двух перечисленных этапов связаны между собой [15, 26].

Нагнетание в пласт воды производится посредством системы поддержания пластового давления (ППД). Данная система представляет собой комплекс технических сооружений, создаваемый в целях поддержания заданного распределения давления в продуктивном пласте в процессе его разработки [9]. Цель достигается путем закачки в отдельные точки пласта через нагнетательные скважины вытесняющего реагента (в подавляющем большинстве случаев это вода). Вода от источников водозабора и водоподъема закачивается в сеть низкого давления и далее поступает на прием насосов кустовых насосных станций. С этих станций под высоким давлением вода подается в нагнетательные скважины. Под влиянием перепада давления поступающая в пласт вода вытесняет нефть к устьям эксплуатационных скважин. Далее отобранная жидкость из скважин поступает в систему внутрипромыслового транспорта нефти, представляющую собой совокупность насосных станций, связанных системой трубопроводов [9].

С целью учета количества закачанного реагента, а также контроля его потерь при транспортировке на каждом из участков, устанавливаются расходомеры (Рисунок 1.1). Они позволяют получать информацию об объемах закачиваемой жидкости, которая необходима для обеспечения правильного заводнения скважин, а также производить контроль утечек, возникающих при транспортировке реагента.

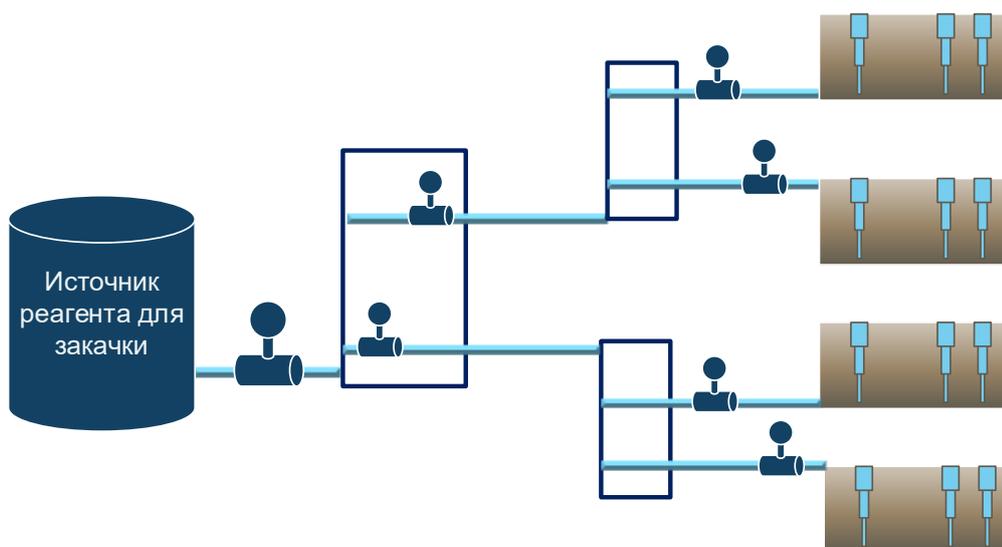


Рисунок 1.1 – Структурная схема АСУ ТП поддержания пластового давления

Исходя из условий эксплуатации, к расходомерам, применяемым в рассмотренной АСУ ТП, предъявляются ряд требований:

1 В связи с жесткими условиями эксплуатации, а также составом закачиваемого реагента (в зависимости от источника закачиваемого реагента в нем присутствуют различные соли, нефть и другие примеси), конструкция расходомера должна обеспечивать устойчивость к загрязнению и отложениям.

2 В зависимости от технологических режимов добычи нефти и от возраста нефтеносного слоя расход реагента, закачиваемого в пласт, варьируется в широких пределах, поэтому используемые расходомеры должны обладать широким диапазоном измерений.

3 В соответствии с технологией закачки реагента в пласт расходомер должен выдерживать давление, достигающее 30 Мпа.

В системах ППД могут использоваться расходомеры, относящиеся к разным принципам измерений: электромагнитные, ультразвуковые, вихревые. Однако, наиболее приспособленными к условиям эксплуатации и требованиям рассматриваемой АСУ ТП являются вихревые расходомеры. Данный тип наиболее устойчив к тяжелым условиям эксплуатации, в частности к загрязнениям (заростанию) проточной части, за счет самоочищающейся конструкции [56].

В исследовании систем ППД внимание сфокусировано на повышении эффективности управления процессом заводнения скважин и уменьшением при этом издержек [55]. Работы [50, 59, 60] направлены на создание моделей систем ППД и систем нефтедобычи в целом [62], позволяющих производить оптимальное управление ими. Входными параметрами для этих моделей являются данные, полученные с измерительных приборов. Как было отмечено ранее, расходомеры являются одним из основных средств измерения в составе систем поддержания пластового давления. От точности и достоверности информации, получаемой от средств измерения, зависит качество функционирования системы в целом, а также применяемых в ней моделей. В работах [21, 51] предлагается технология дискретных закачек в системах ППД. В связи с этим обостряется актуальность

требования широкого диапазона измерений к используемым расходомерам, а также требования к точному измерению малых расходов.

В настоящее время на рынке представлены вихревые расходомеры, применение которых ориентированно на системы ППД. Многие характеристики для расходомеров в данной отрасли стандартизированы и одинаковы для расходомеров всех производителей. Например, расходомеры рассчитаны на избыточное давление от 20 до 30 МПа и присоединительные размеры ДУ (50 80 100 150) мм. Расходомеры имеют стандартные выходные сигналы (импульсный/частотный, токовый 4-20мА, Hart, Modbus и ЖКИ), а также эксплуатационные температуры (минус 40 – плюс 70 С). В таблице 1.1 представлены расходомеры для систем ППД различных производителей, приведены характеристики точности и диапазона измерений.

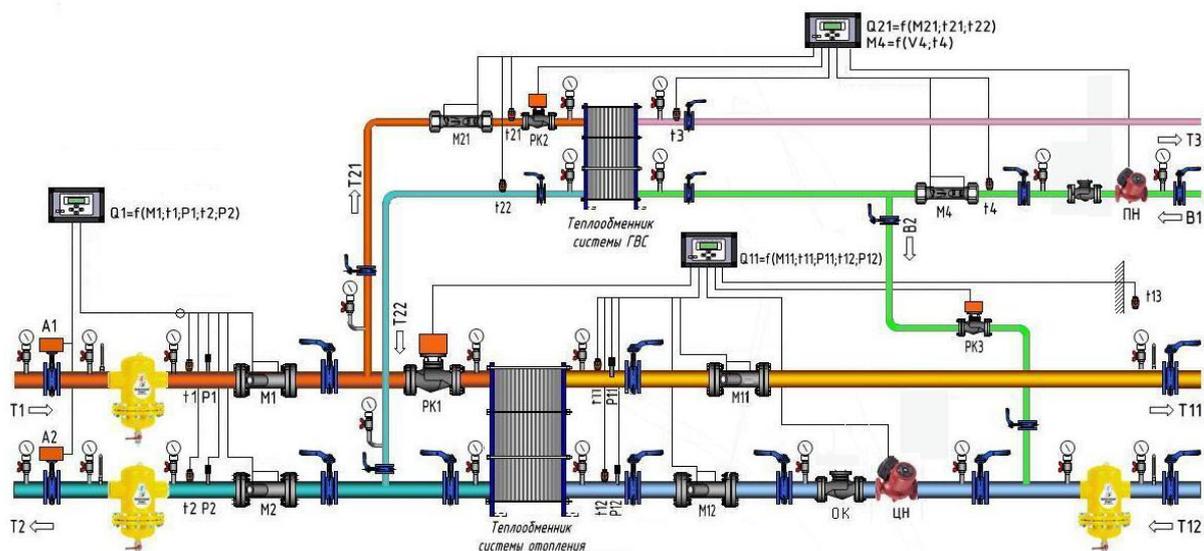
Таблица 1.1 – Расходомеры, выпускаемые для АСУ ТП ППД

Производитель Марка расходомера	Диапазон измерений	Точность измерений, не более
Группа компаний «Эмис» г. Челябинск Эмис Вихрь 200 ППД (вихревой расходомер)	Ду 50/50: $Q_{\min} = 0,9 \text{ м}^3/\text{ч}$, $Q_{\max} = 50 \text{ м}^3/\text{ч}$ $Q_{\text{перех}} = 1,3 \text{ м}^3/\text{ч}$ Диапазон измерений $\approx 1:56$ Ду 100/200: $Q_{\min} = 6 \text{ м}^3/\text{ч}$, $Q_{\max} = 200 \text{ м}^3/\text{ч}$ $Q_{\text{перех}} = 8 \text{ м}^3/\text{ч}$ Диапазон измерений $\approx 1:34$	$Q_{\text{перех}} < Q < Q_{\max} - 1\%$ $Q_{\min} < Q < Q_{\text{перех}} - 2\%$
ЗАО Даймет г. Тюмень ДУМЕТИС-1204М-Г (вихревой расходомер)	Ду 50/50: $Q_{\min} = 1,2 \text{ м}^3/\text{ч}$, $Q_{\max} = 50 \text{ м}^3/\text{ч}$ $Q_{\text{перех}} = 1,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ Диапазон измерений $\approx 1:42$ Ду 100/200: $Q_{\min} = 6 \text{ м}^3/\text{ч}$, $Q_{\max} = 200 \text{ м}^3/\text{ч}$ $Q_{\text{перех}} = 7,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ Диапазон измерений $\approx 1:34$	$Q_{\text{перех}} < Q < Q_{\max} - 1,5\%$ $Q_{\min} < Q < Q_{\text{перех}} - 10\%$
Россия, ОАО ИПФ «Сибнефте-автоматика» г. Тюмень Датчик расхода ДРС (вихреакустический расходомер)	Ду 50/50: нет Ду 100/200: $Q_{\min} = 5 \text{ м}^3/\text{ч}$, $Q_{\max} = 200 \text{ м}^3/\text{ч}$ $Q_{\text{перех}} = 8 \text{ м}^3/\text{ч}$ Диапазон измерений $\approx 1:40$	$Q_{\text{перех}} < Q < Q_{\max} - 1\%$ $Q_{\min} < Q < Q_{\text{перех}} - 4\%$
ОАО "Опытный завод "Электрон" г. Тюмень Датчик расхода ДРС.М (вихреакустический расходомер)	Ду 50/50: нет Ду 100/200: $Q_{\min} = 6 \text{ м}^3/\text{ч}$, $Q_{\max} = 200 \text{ м}^3/\text{ч}$ $Q_{\text{перех}} = 8 \text{ м}^3/\text{ч}$ Диапазон измерений $\approx 1:40$	$Q_{\text{перех}} < Q < Q_{\max} - 1,5\%$ $Q_{\min} < Q < Q_{\text{перех}} - 2,5\%$
ЗАО ПГ Метран г. Челябинск Метран 305ПР (вихреакустический расходомер)	Ду 50/50: $Q_{\min} = 0,4 \text{ м}^3/\text{ч}$, $Q_{\max} = 50 \text{ м}^3/\text{ч}$ $Q_{\text{пер}1} = 1 \text{ м}^3/\text{ч}$, $Q_{\text{пер}2} = 2 \text{ м}^3/\text{ч}$ Диапазон измерений $\approx 1:125$ Ду 100/200: $Q_{\min} = 1,5 \text{ м}^3/\text{ч}$, $Q_{\max} = 200 \text{ м}^3/\text{ч}$ $Q_{\text{перех}1} = 4 \text{ м}^3/\text{ч}$, $Q_{\text{перех}2} = 8 \text{ м}^3/\text{ч}$ Диапазон измерений $\approx 1:133$	$Q_{\text{пер}1} < Q < Q_{\max} - 1\%$ $Q_{\text{пер}2} < Q < Q_{\text{пер}1} - 1,5\%$ $Q_{\min} < Q < Q_{\text{перех}} - 3\%$
Примечание: В условное обозначение Ду ХХХ/УУУ, где ХХХ - Присоединительный размер диаметра трубопровода, УУУ - Максимальный расход		

Анализ таблицы 1.1 показывает перспективность использования расходомеров вихреакустического типа (например, серии Метран-305) в силу их расширенного диапазона измерений в области малых расходов по сравнению со стандартными вихревыми расходомерами.

1.1.2 АСУ ТП в жилищно-коммунальном хозяйстве

Вихревые расходомеры также получили распространение в сфере жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ). Согласно правилам учета тепловой энергии требуется проводить учет во многих точках централизованного водоснабжения, начиная от объектов производства энергии, по путям ее передачи и до конечных потребителей [5]. Для слежения за технологией производства тепловой энергии выводы тепловой сети, а также точки передачи тепловой энергии в другие сети, в обязательном порядке оснащались приборами учета, но непосредственные потребители - нет. По Федеральному Закону [6] расчеты за энергетические ресурсы должны осуществляться на основании данных о количественном значении энергетических ресурсов, произведенных, переданных, потребленных, определенных при помощи приборов учета используемых энергетических ресурсов. В связи с этим обострилась потребность в использовании общедомовых приборов учета тепловой энергии и водоснабжения, основой которых являются расходомеры (рисунок 1.2).



Параметры расходомеров, применяющихся для учета тепловой энергии, потребления холодной и горячей воды, регламентируются рядом документов, таких как: правила учета тепловой энергии, правила предоставления коммунальных услуг, СНиП-ами [5, 7, 8] и другими нормативными актами. С другой стороны, анализ требований к приборам можно встретить в работах приборостроителей [22], а также в статьях проектных и эксплуатирующих организаций [23, 27]. Рассмотрев требования к расходомерам, можно выделить следующие наиболее важные из них:

1 Широкий диапазон измерения расходов. В следствие неравномерной нагрузки на сеть (в зависимости от времени суток) востребован широкий диапазон измеряемых расходов.

2 Точность измерения малых расходов. Приборы общедомового учета работают преимущественно в области малых расходов. Действующее законодательство регламентирует скорость движения воды в зданиях. Скорость не должна превышать 3 м/с [7]. В то же время, по оценкам специалистов, чтобы избежать появления шумов в трубопроводах, скорость течения жидкости в трубах должна составлять от 0,3-0,7 м/с. Такая скорость соответствует работе общедомовых приборов учета в области малых расходов.

3 Широкий диапазон температур измеряемой среды. Температура жидкости, поступающей в здание по подающему теплопроводу, может варьироваться от 75 до 150 °С, а по обратному трубопроводу температура теплоносителя может опускаться до 40 °С [23].

4 Надежность и устойчивость расходомера к различным отложениям. Отсутствие движущихся частей и самоочищающаяся конструкция, являются крайне востребованными для минимизации затрат на обслуживание приборов.

В ЖКХ с целью учета тепловой энергии, горячей и холодной воды в общедомовых приборах как правило используются электромагнитные, ультразвуковые и вихревые расходомеры. При централизованном водоснабжении в теплоносителях нередко присутствуют примеси ржавчины, ферромагнитные примеси и железобактерии [44]. Устройство проточной части вихревого

расходомера позволяет избежать зарастаний, отложений и загрязнений поверхностей измерительного участка [56], что является причиной изменения метрологических характеристик других типов расходомеров. Особенно сильно отложения влияют на метрологические характеристики электромагнитных расходомеров, при образовании отложений в проточной части ультразвуковых расходомеров метрологические характеристики также будут отличаться [63].

В числе преимуществ вихревых расходомеров над другими рассматриваемыми следует отметить допущение меньших длин прямых участков до и после места установки [56], что является актуальным при размещении тепловыделителя в небольших по размерам подвалах домов.

Значимость и актуальность проблемы повышения точности измерения расходомеров, используемых в ЖКХ, трудно переоценить. От точности расходомера, используемого в составе теплосчетчика, напрямую зависит правильность расчётов осуществляемых между потребителем ресурсов и компаниями, предоставляющими данные ресурсы [6]. В работах [37, 47] представлены исследования демонстрирующие тенденции перехода принципов управления тепловыми пунктами от режимов с преимущественно установившимся расходом к режимам с импульсным изменением расхода.

При изучении рынка вихревых расходомеров (таблица 1.2), используемых в ЖКХ, можно выделить следующие общие особенности: рабочее давление 1,6 МПа, температура измеряемой жидкости (от +4 до 150) °С, наиболее распространённые размеры проточных частей с диаметрами условного прохода 25, 32, 50, 80, 100, 200, 300 мм. При рассмотрении приборов разных производителей наибольший интерес вызывает диапазоны и погрешности измерений.

В рассмотренных АСУ ТП, в связи со спецификой приведенных требований, широкое распространение получили вихреакустические расходомеры. Следует отметить, что области применения вихреакустических расходомеров не ограничиваются только вышеописанными примерами. Таким образом, приведенные примеры АСУ ТП позволяют четко выделить ключевые преимущества вихреакустических расходомеров над другими типами

расходомеров и, в то же время, продемонстрировать их недостаток в виде значительного увеличения допустимой погрешности измерения (3-10 раз) в нижнем диапазоне измерения расходов (в области малых расходов).

Таблица 1.2 – Вихревые расходомеры, используемые в АСУ ТП в ЖКХ

Производитель Марка расходомера	Диапазон измерений	Точность измерений, не более %
ЗАО Флоукор г. Москва ДРК- ВМ (ультразвуковое детектирование)	Ду 25: $Q_{\min} = 0,2 \text{ м}^3/\text{ч}$ $Q_{\max} = 10 \text{ м}^3/\text{ч}$ $Q_{\text{пер}1} = 0,3 \text{ м}^3/\text{ч}$ $Q_{\text{пер}2} = 0,6 \text{ м}^3/\text{ч}$ Диапазон измерений $\approx 1:50$ Ду 50: $Q_{\min} = 0,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ $Q_{\max} = 50 \text{ м}^3/\text{ч}$ $Q_{\text{пер}1} = 1 \text{ м}^3/\text{ч}$ $Q_{\text{пер}2} = 2 \text{ м}^3/\text{ч}$ Диапазон измерений $\approx 1:125$	$Q_{\text{пер}1} < Q < Q_{\max} - 1\%$ $Q_{\text{пер}2} < Q < Q_{\text{пер}1} - 1,5\%$ $Q_{\min} < Q < Q_{\text{пер}2} - 3\%$
ЗАО Даймет г. Тюмень ДУМЕТИС-1001 (вихреакустический расходомер)	Ду 25: $Q_{\min} = 0,16 \text{ м}^3/\text{ч}$ $Q_{\max} = 10 \text{ м}^3/\text{ч}$ $Q_{\text{пер}1} = 0,2 \text{ м}^3/\text{ч}$ $Q_{\text{пер}2} = 0,25 \text{ м}^3/\text{ч}$ Диапазон измерений $\approx 1:62$ Ду 50: $Q_{\min} = 0,8 \text{ м}^3/\text{ч}$ $Q_{\max} = 40 \text{ м}^3/\text{ч}$ $Q_{\text{пер}1} = 1 \text{ м}^3/\text{ч}$ $Q_{\text{пер}2} = 1,25 \text{ м}^3/\text{ч}$ Диапазон измерений $\approx 1:50$	$Q_{\text{пер}1} < Q < Q_{\max} - 1,5\%$ $Q_{\text{пер}2} < Q < Q_{\text{пер}1} - 2,5\%$ $Q_{\min} < Q < Q_{\text{пер}2} - 5\%$
ЗАО ПГ Метран г. Челябинск Метран 305ПР (вихреакустический расходомер)	Ду 25: $Q_{\min} = 0,18 \text{ м}^3/\text{ч}$ $Q_{\max} = 9 \text{ м}^3/\text{ч}$ $Q_{\text{пер}1} = 0,3 \text{ м}^3/\text{ч}$ $Q_{\text{пер}2} = 0,6 \text{ м}^3/\text{ч}$ Диапазон измерений $\approx 1:50$ Ду 50: $Q_{\min} = 0,4 \text{ м}^3/\text{ч}$ $Q_{\max} = 50 \text{ м}^3/\text{ч}$ $Q_{\text{пер}1} = 1 \text{ м}^3/\text{ч}$ $Q_{\text{пер}2} = 2 \text{ м}^3/\text{ч}$ Диапазон измерений $\approx 1:125$	$Q_{\text{пер}1} < Q < Q_{\max} - 1\%$ $Q_{\text{пер}2} < Q < Q_{\text{пер}1} - 1,5\%$ $Q_{\min} < Q < Q_{\text{пер}2} - 3\%$

С целью выявления путей повышения точности измерения в области малых расходов следует рассмотреть основы физического принципа функционирования вихреакустического расходомера и его конструкцию, а также провести обзор известных методов повышения точности измерения для вихревых (вихреакустических) расходомеров.

1.2 Вихревой принцип измерения расхода, функциональная схема вихреакустического расходомера

Принцип работы вихреакустического расходомера основан на эффекте называемым вихревая дорожка Кармана, то есть поочередным образованием вихрей с разных сторон плохообтекаемого тела в потоке жидкости или газа [25, 67].

Образование вихрей за преградой, находящейся в канале с текучей средой, изучалось учеными с древнейших времен. Еще в XV веке в записках Леонардо да Винчи найдены пометки о наблюдении и изучении вихрей, образующихся в реке [94]. Исследование данного вопроса связано с такими учеными как Винсент Струхаль и Джон Уильям Стретт. В. Струхаль обнаружил, что причиной возникновения звука при колебании струны являются периодический отрыв воздуха и связанное с ним вихреобразование и предложил критерий (число Струхаля), связывающий частоту колебаний потока со скоростью направленного течения и характерным размером тела обтекания [97]. Дж. У. Стретт открыл существование сил подъема, сопровождающих вихреобразование и направленных перпендикулярно направлению потока [61].

Наибольший вклад в теорию, положенную в основу работы вихревого расходомера, внес Теодор Ван Карман. Изыскания, проведенные им, привели к открытию периодичности явления вихреобразования. В 1911 году он опубликовал работу [84], посвященную математическому анализу перемежающегося двойного ряда вихрей, которые образуются за плохообтекаемым телом в турбулентном потоке жидкости. Несмотря на давнюю историю наблюдения эффекта вихреобразования за плохообтекаемым телом, первый коммерческий вихревой расходомер был выпущен лишь в 1967 году [101].

В основе принципа измерения вихревого расходомера лежит зависимость частоты вихреобразования f за телом обтекания от скорости потока (1.1), где v – скорость потока, d – характерный размер тела обтекания, St – число Струхаля.

$$f = St \cdot \frac{v}{d}, \quad (1.1)$$

Измеряя частоту вихреобразования, возможно вычислить скорость потока жидкости v , а зная площадь сечения проточной части расходомера, найти расход Q (1.2), где S – площадь поперечного сечения проточной части расходомера, k – коэффициент пропорциональности расхода и частоты вихреобразования, D – внутренний диаметр проточной части расходомера с круглым сечением

$$Q = S \cdot v = S \cdot \frac{d}{S_t} \cdot f = \frac{\pi D^2 \cdot d}{4 \cdot S_t} \cdot f = k \cdot f, \quad (1.2)$$

Из выражения (1.2) видно, что для того, чтобы частота вихреобразования была пропорциональна расходу необходимо, чтобы коэффициент k был постоянен, однако, число Струхалия непостоянно и зависит от числа Рейнольдса. Например, приведем такую зависимость (Рисунок 1.3), полученную в ходе исследований [71].

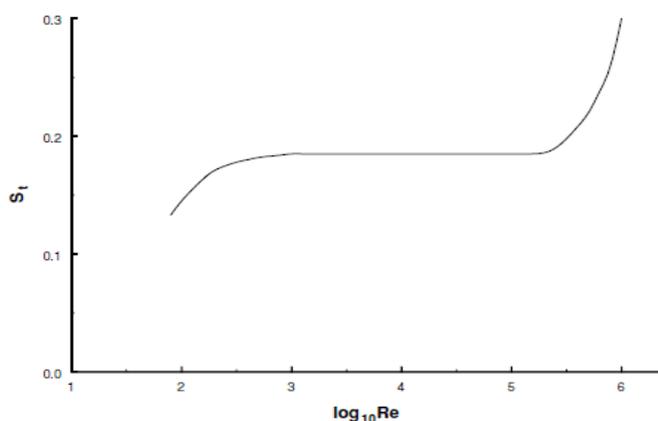


Рисунок 1.3 – Зависимость числа Струхалия от числа Рейнольдса (цилиндрическое тело обтекания)

Из рисунка 1.3 следует, что число Струхалия постоянно в определенном диапазоне чисел Рейнольдса [46], что обеспечивает в этом диапазоне линейную зависимость измеряемого расхода от частоты вихреобразования в выражении (1.2). При остальных значениях числа Рейнольдса зависимость числа Струхалия становится существенно нелинейной. Форма кривой зависимости числа Струхалия определяется формой и геометрическими размерами тела обтекания, а также целым комплексом параметров проточной части [67]. Далее будет показано, что исторически большое внимание исследователи уделяли изучению зависимости числа Струхалия по причине того, что участок зависимости, на котором число Струхалия постоянно, определяет диапазон измерения вихревых расходомеров.

Описание конструкции вихревого расходомера целесообразно начать с изучения проточной части расходомера и установленного в ней тела обтекания.

Проточная часть и тело обтекания образуют систему, определяющую параметры физического явления вихреобразования в расходомере. От силы, стабильности и регулярности образующихся вихрей зависит сложность цепей обработки измерительной информации [25].

Для вычисления расхода необходимо точно определять частоту вихреобразования за телом обтекания. Для этого в конструкции расходомера установлен датчик (первичный сенсор) и устройство обработки сигналов с него. Датчик позволяет преобразовывать энергию вихрей, образующихся попеременно с двух сторон тела обтекания, в электрический сигнал. Устройство обработки сигналов служит для выделения полезной компоненты на фоне шума и дальнейшего ее преобразования для вычисления частоты вихреобразования [100].

Тип сенсора в значительной степени определяет эксплуатационные возможности и технический уровень вихревого расходомера. Известны анемометрические, индуктивные, оптические и другие виды сенсоров. Однако, в промышленности наибольшее распространение получили вихревые приборы с двумя видами сенсоров: сенсор переменного перепада давления и ультразвуковые сенсор (такие расходомеры получили название вихреакустические) [9, 34].

Далее требуется обработка сигнала и преобразование его в расход. В современных вихревых расходомерах расход вычисляется с помощью микропроцессора на основе информации о частоте вихреобразования, при этом используется функция преобразования (ФП) расходомера. От правильности выбора модели ФП вихревого расходомера зависит точность измерения расхода.

Таким образом, конструкцию вихревого расходомера можно представить в виде трех взаимосвязанных блоков (рисунок 1.4), каждый из которых выполняет функцию, необходимую для определения расхода измеряемой среды.

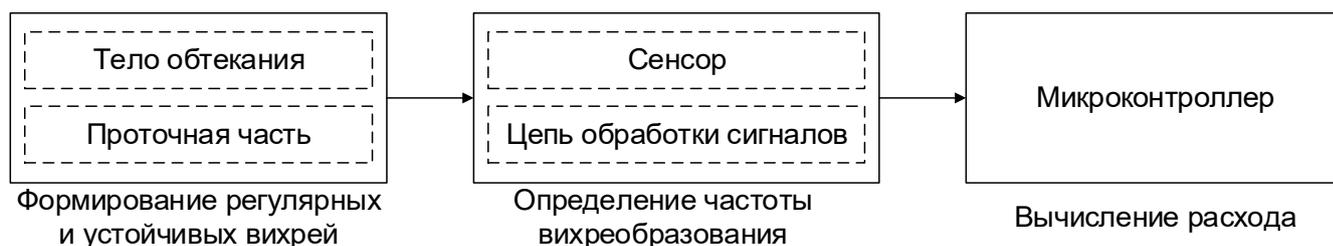


Рисунок 1.4 – Функциональная схема вихревого расходомера

1.3 Классификация методов улучшения метрологических характеристик вихревого расходомера.

Сформулируем классификацию методов улучшения метрологических характеристик вихреакустических (вихревых) расходомеров на основании функциональной схемы, описанной ранее. Признаком классификации методов является его применимость к одному из рассмотренных функциональных блоков (таблица 1.3). Особенности каждого из методов рассмотрены далее подробнее.

Таблица 1.3 – Пути улучшения метрологических характеристик

№	Группа	Методы
1	Оптимизация геометрии проточной части	а) Выбор формы тела обтекания; б) Выбор размера тела обтекания относительно размеров проточной части.
2	Оптимизация чувствительного элемента	а) Выбор места установки датчика; б) Аппаратные методы обработки сигнала; в) Аппаратно-программная обработка сигналов.
3	Алгоритмические методы	а) Выбор функции преобразования; б) Алгоритмы обработки информации о частоте вихреобразования.

К группе оптимизации геометрии проточной части относятся *методы, направленные на исследования формы и геометрических параметров тела обтекания или проточной части расходомера.*

С момента создания первого вихревого расходомера исследовательский поиск был направлен на выбор формы тела обтекания и параметров проточной части. Тело обтекания должно обеспечивать формирование сильных и стабильных вихрей. На первых этапах исследовались, в основном, цилиндрические и призматические тела, образующие в своем сечении прямоугольник и треугольник. В первом расходомере использовался цилиндр [101]. Такая форма тела обтекания в должной мере не обеспечивала стабильности точки отрыва вихрей, что вызывало изменение числа Струхала и значительную нелинейность зависимости расхода от частоты образования вихрей. Позднее, с целью обеспечения более устойчивого отрыва вихрей, в конструкциях вихревых расходомеров начали использовать тела обтекания с острыми краями [89, 87]. В дальнейшем, именно тела с острыми

краями зарекомендовали себя наилучшим образом при серийном производстве коммерческих вихревых расходомеров.

В поисках улучшения стабильности и силы вихреобразования было исследовано тело обтекания с разрезом [81, 80, 90, 93], его применение значительно улучшало качество сигнала на датчике расходомера. Также были проведены многочисленные исследования сложных конструкций тел обтекания таких как: Т-образное тело обтекания [74], двойная и тройная конструкция тела обтекания [68, 69, 70] и кольцевое тело обтекания [98, 88].

Проводились исследования, посвященные ориентации треугольных и Т-образных тел обтекания «по» и «против» потока [77], а также были проведено большое количество исследований [40, 74, 76, 83, 91, 93], показывающих, что даже небольшие изменения в геометрии тела обтекания вызывают значительные изменения качества вихревого сигнала. Большинство подобных исследований проводились путем моделирования вихреобразования в проточной части расходомера [35].

Исследователи уделяли внимание изучению геометрии не только тела обтекания, но и проточной части [70]. В работе [71] было доказано, что параметры проточной части вихревого расходомера играют важную роль в стабилизации дорожки Кармана, что привело к необходимости исследовать тело обтекание не в свободном потоке, а в потоке, ограниченном стенками проточной части. В ряде работ были опубликованы рекомендации по выбору геометрических размеров тел обтекания по отношению к геометрии проточной части в целом [41,58,71].

Производители вихревых расходомеров предпочитают использовать тела обтекания простых в изготовлении форм, например, трапециевидная призма. Выбор конкретных геометрических параметров при конструировании производится на основании особенностей эксплуатации конкретной марки расходомера [86].

Ко второй группе (таблица 1.3) отнесены *методы исследования, посвященные датчику и цепям обработки сигналов измерительной информации с сенсора вихревого расходомера*, направленные на повышение точности

детектирования частоты вихреобразования за телом обтекания. Данные методы призваны обеспечить наилучшее соотношение сигнал/шум для сигналов, получаемых с датчика.

Направления научного поиска для этих методов сосредоточены на:

- 1) выборе наилучшего места установки сенсора;
- 2) применении аппаратных методов обработки сигнала с сенсора;
- 3) использовании аппаратно-программных методов обработки сигнала с сенсора.

Проблема выбора оптимального места установки при проектировании и исследовании вихревых расходомеров решается путем проведения экспериментов или моделирования. Сенсор датчика должен быть расположен в области формирования максимально развитого вихревого потока для получения максимально возможного полезного сигнала и обеспечения наибольшей линейности зависимости расхода (выходной сигнал) от частоты вихреобразования [13, 41, 58].

Поиск путей повышения точности определения частоты вихреобразования с помощью аппаратных средств можно разделить на два основных направления: увеличение количества каналов измерения и применение фильтров. Увеличение количества каналов измерения дает возможность значительно уменьшить шумовые составляющие, оказывающие воздействие на сигнал [25, 72, 20]. В работе [72] показано, что увеличение количества каналов в цепи обработки сигналов с датчика позволяет повысить точность определения вихрей за счет индивидуальной настройки цепи для двух отличающихся друг от друга диапазонов измерения расхода. В работе [10] показана возможность получения информации о плотности жидкости путем добавления дополнительного канала в виде решётки Брега. Применение фильтрующих элементов позволяет повысить соотношение сигнал/шум, что является важным при измерении малых расходов. Для решения данной задачи в работах [75, 95] используется адаптивный полосовой фильтр.

С развитием вычислительной мощности микроконтроллеров отмечается повышенный интерес исследователей к аппаратно-программным методам повышения точности. Рассматриваемые методы предполагают применение

определенной аппаратной платформы, основными элементами которой являются: аналогово-цифровой преобразователь и микропроцессор [42], а также различные математические методы обработки цифровых данных [85]. Принципиальным различием среди предлагаемых аппаратно-программных методов повышения точности вихревых расходомеров, являются алгоритмы, с помощью которых и производится обработка сигнала.

Можно выделить три математических метода, наиболее востребованных при исследовании вихревых расходомеров: спектральный анализ, основанный на преобразовании Фурье, Вейвлет - преобразование и преобразование Гильберта-Хуанга. Методы перечислены в хронологическом порядке их возникновения.

Наиболее разработанным и изученным методом является преобразование Фурье. В работах [72, 82, 85] показано, что применение рассматриваемого метода в аппаратной части вихревого расходомера позволяет выделить полезный сигнал, несущий информацию о расходе на фоне шума, тем самым обеспечивается стабильное распознавание полезного сигнала, что является важным при измерении малых расходов. Однако, применение классического спектрального анализа с помощью преобразования Фурье не дает возможности учета изменения спектральных характеристик во времени. Например, в классическом спектре мощности невозможно отличить сигнал, содержащий переключение частоты гармонической функции, от сигнала, образованного суммой двух гармонических колебания с разными частотами [49].

Вейвлет - преобразование и преобразование Гильберта-Хуанга избавлены от указанного недостатка и предназначены для обработки нестационарных процессов в динамике, что важно при определении частоты вихреобразования в проточной части расходомера.

В работе [78] показано, что Вейвлет - преобразование позволяет выделить полезный сигнал при уровне шума превосходящем его. Подобное свойство рассматриваемого преобразования при применении его в вихревых расходомерах позволяет значительно расширить диапазон измерения в области малых расходов, где шумовая составляющая в сигнале может быть больше полезного сигнала.

Преобразование Гильберта-Хуанга [79] является современным методом обработки сигналов. Применение преобразования Гильберта-Хуанга к задачам решаемым для вихревых расходомеров нашли свое отражение в ряде работ [73, 103, 104]. В исследованиях [103, 104] на основе экспериментальных данных показано, что преобразование Гильберта-Хуанга позволяет значительно повысить точность измерения на малых расходах, а также расширить диапазон измерения расходомера в сторону малых расходов.

Данные методы являются перспективными, однако, они требуют достаточно мощных вычислительных средств [14] или усложнения конструкции, что экономически оправдывается лишь в высокоточных и дорогостоящих расходомерах.

К третьей группе отнесены *алгоритмические* методы повышения точности. Как было отмечено ранее, за счет широкого распространения микроконтроллеров в конструкции измерительных приборов, алгоритмические методы стали одними из наиболее востребованных при решении задач улучшения технических характеристик приборов и систем. Для вихреакустических расходомеров основными методами являются: выбор и обоснование функции преобразования расходомера и алгоритмы обработки информации о частоте вихреобразования.

Выбор и обоснование функции преобразования. В настоящее время четкие и универсальные методики выбора модели функций преобразования средств измерений не разработаны, однако в отдельных областях достигнуты значительные успехи. Например, в работе [36] предложены методики выбора модели ФП измерительных преобразователей давления, позволяющие выбрать наиболее простые модели ФП для каждого типа измерительного преобразователя давления.

Для вихревых расходомеров в качестве функции преобразования принято использовать коэффициент пропорциональности, условно называемый k [94, 25], который можно вычислить по следующей формуле:

$$k = \frac{\pi D^2 \cdot d}{4 \cdot S_t}, \quad (1.3)$$

Как видно из выражения выше, коэффициент k является интегральной характеристикой проточной части вихревого расходомера и может быть найден

строго из расчётов. Однако, из-за наличия технологических допусков при изготовлении проточной части расходомера, значение коэффициента k определяется индивидуально для каждого экземпляра расходомера при проведении испытаний каждого конкретного расходомера.

Также недостатком описанного подхода к функции преобразования расходомера является возможность его применения только в области, где значение числа Струхалия постоянно. Поэтому такая простая (классическая) модель функции преобразования применяется для расходомеров с малым диапазоном измерения и для расходомеров, не предназначенных для измерения в области малых расходов (малых чисел Рейнольдса). Несмотря на вышеперечисленные недостатки большое количество производителей расходомеров всё же используют вышеописанный подход, при этом увеличивают предельно допустимую погрешность измерения в области измерения малых расходов [17, 16, 56].

В качестве ФП в исследовании [102] предложено использовать однофакторную кусочно-линейную модель. Использование такой модели позволяет расширить диапазон измерения в область, где число Струхалия не является постоянным. В данном исследовании показано, что даже в основном диапазоне измерения значения числа Струхалия не равно константе, а изменяется относительно среднего при различных расходах. Для компенсации этих изменений предлагается использовать кусочно-линейную функцию, позволяющую наиболее точно описать поведение расходомера во всем диапазоне измерения. Точки изменения такой функции предлагается выбирать с использованием нейронной сети и использовать их при проведении калибровки на установке для калибровки расходомеров.

В описанных выше подходах используются однофакторные модели, которые не учитывают влияние фактора температуры. В патентах [52, 53] показана значимость фактора температуры измеряемой среды при измерении объемного расхода с помощью вихревых расходомеров. Предложены пути учета влияния температуры измеряемой жидкости при описании числа Струхалия St . Однако, в данных работах не рассмотрено влияние фактора на другие составляющие функции

преобразования (1.2). Также не рассмотрено влияние предлагаемого подхода при измерении малых расходов, где поведение числа Струхаля существенно нелинейно. Обзор литературы, посвященной поиску оптимальной модели функции преобразования вихреакустического расходомера, показывает, что количество работ в этой области не велико. Исследования, дающие описание методики поиска подходящей модели функции преобразования для вихреакустических (вихревых) расходомеров в режимах малых расходов, найдены не были.

Алгоритмы обработки информации о частоте вихреобразования. Вне зависимости от типа сенсора вихревого расходомера, с этого сенсора, после определённых преобразований, в микроконтроллер прибора поступает информация о частоте вихреобразования. Далее микроконтроллер обрабатывает массив информации со значениями мгновенных частот вихреобразования по заданному алгоритму.

Как правило, в расходомерах для получения оценки информации о частоте вихреобразования используется метод скользящего среднего [12]. При большом количестве данных для усреднения и высокой частоте поступления информации данный метод зарекомендовал себя хорошо. Однако, ключевым отличием, вихревых расходомеров от расходомеров всех иных типов является то, что периодичность поступления информации о частоте вихреобразования изменяется в зависимости от измеряемого расхода и численно равна самой частоте вихреобразования. Например, с уменьшением расхода измеряемой среды частота вихреобразования снижается и, как следствие, информация о частоте вихреобразования поступает реже. Применение скользящего среднего в описанной ситуации приведет к появлению значительных задержек реакции расходомера на изменение расхода, что, в свою очередь, приведет к появлению погрешности накопленного объема, измеренного расходомером [19, 28]. Результат обзора научных публикаций показал, что проблема повышения точности измерения вихревых расходомеров с учетом ключевой особенности самих вихревых расходомеров, описанной выше, не освещена ни в ведущих зарубежных, ни отечественных журналах.

Алгоритмы обработки информации, представленной временным рядом, широко распространены во многих областях науки и техники. Задачи, рассматриваемые при анализе временных рядов, разделяются на задачи идентификации и прогнозирования [12]. Основной задачей идентификации является поиск зависимостей, позволяющих описать поведение исследуемого явления. Задачей прогнозирования является предсказание поступающих новых данных в рассматриваемом временном ряду. В обеих задачах исследователи стремятся к созданию модели процесса и на ее базе выполняют обработку данных и выделение наиболее существенных признаков исследуемого ряда или осуществляют предсказание значений новых членов рассматриваемого процесса.

При рассмотрении возможности описания поведения вихревого (вихреакустического) расходомера в виде математической модели становится понятным, что поведение расходомера определяется не конструкцией расходомера, а технологическими процессами, конфигурацией и алгоритмами АСУ ТП, в которую интегрирован рассматриваемый расходомер. Отсюда следует невозможность применения к вихреакустическим расходомерам алгоритмов обработки, требующих априорного знания модели поведения расходомера, например, алгоритмов Колмановского типа и других.

Проведение анализа временного ряда мгновенных частот вихреобразования на основе современных методов, не требующих априорных сведений о поведении прибора (таких как Вейвлет анализ, метод ННТ и т.д.), затруднено в виду необходимости проведения ресурсоемких вычислений в реальном времени, что практически невозможно в реальных условиях эксплуатации расходомеров. Также вышеперечисленные методы требуют большого количества данных для обработки, поэтому применяются в основном для обработки исторических данных, например, данные о сейсмоактивности [57].

Таким образом, при разработке требований к алгоритму обработки информации о частоте вихреобразования необходимо учесть указанные выше особенности как самого вихреакустического расходомера, так и его условий эксплуатации.

1.4 Цель и задачи исследования

В первой главе данной работы рассмотрены типовые структурные схемы двух АСУ ТП. Для этих систем одним из важнейших параметров, задействованным в процессе управления системой, является расход жидкости. Сформулированы требования к средствам измерения расхода применяемых в этих АСУ ТП. Показано, что наиболее полно им удовлетворяют вихреакустические расходомеры. Также отмечено, что для вихреакустических расходомеров характерно увеличение погрешности при измерении малых расходов в 3 и более раз по сравнению с основным диапазоном измерения, что оказывает влияние на качество управления рассматриваемых АСУ ТП [3].

Актуальность проблемы точности измерения малых расходов обостряется еще тем, что большую распространенность набирают способы управления, при которых расход жидкости регулируется от нулевого до технологически необходимого [21, 51, 37, 47], а также требование организации работы системы в условиях малых скоростей потока [7, 51]. В таких условиях расходомер неизбежно работает в режиме изменяющихся и малых расходов. Согласно МИ 2301-2000 [3], повышение точности измерений малых расходов позволит повысить качество управления в АСУ ТП.

Рассмотрена конструкция вихреакустического расходомера, выделены функциональные блоки вихревых расходомеров на основании осуществляемых функций. С целью систематизации проведения обзора методов повышения точности измерений вихревых расходомеров предложена классификация, согласно которой методы разделяются по их принадлежности к функциональному блоку расходомера.

На основе предложенного деления, проведен обзор методов повышения точности и рассмотрены результаты ранее проведенных исследований. Было показано, что наиболее перспективными методами улучшения метрологических характеристик являются алгоритмические методы.

Повышение точности измерения алгоритмическими методами является комплексной задачей и может быть решена внедрением дополняющих друг друга алгоритмических методов: поиск модели функции преобразования и алгоритмических методов обработки информации о частоте вихреобразования.

Функция преобразования позволяет вычислить выходное значение объемного расхода жидкости вихреакустического расходомера по значениям прямых измерений с сенсоров расходомера (частоты вихреобразования и температуры измеряемой среды). Распространение и примеры успешного применения методов поиска функции методами регрессионного анализа и методом анализа уравнения измерений средства измерения показывают актуальность использования этих двух методов для поиска модели функции преобразования для вихреакустического расходомера.

Алгоритм обработки информации о частоте вихреобразования предназначен для вычисления оценки частоты вихреобразования по временному ряду при различных режимах измерения расхода.

Таким образом, задача функции преобразования – поставить в соответствие входным величинам выходной расход в широком диапазоне измерения условий измерения в АСУ ТП (значения расхода и температуры измеряемой среды) в любой момент работы. Задача алгоритма обработки информации о частоте вихреобразования – обеспечить точную оценку значения частоты вихреобразования, которая будет использована для вычисления расхода в функции преобразования, при различных условиях измерения в АСУ ТП (установившийся и изменяющийся режимы расхода).

Цель диссертационной 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.

Основные задачи решаемые в ходе исследования:

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 методов.

2 ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ МОДЕЛИ ФУНКЦИИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ВИХРЕАКУСТИЧЕСКИХ РАСХОДОМЕРОВ

Средства измерения обладают рядом общих свойств. Характеристики, описывающие эти свойства и оказывающие влияние на результаты и погрешности измерений, называются метрологическими характеристиками [4]. Одной из основных нормируемых метрологических характеристик средств измерений является функция преобразования [2]. С помощью данной характеристики устанавливается зависимость между выходной величиной средства измерения и входными величинами (информацией с сенсоров средства измерений, полученной прямыми измерениями).

С целью поиска вышеупомянутой зависимости могут быть применены различные подходы. В данной работе были выбраны два наиболее распространённых: подход, основанный на регрессионном анализе, зарекомендовавший себя при применении в других измерительных приборах [36], и выбор модели ФП на основе уравнения измерения.

При разработке модели ФП для вихреакустических расходомеров необходимо учитывать тот факт, что их диапазон измерения расходов больше, чем у классических вихревых за счет повышенной чувствительности [65]. При этом особое внимание следует уделить измерениям малых расходов, где нарушается основная предпосылка работы классических вихревых расходомеров - постоянство числа Струхалия [67, 71]. Также необходимо провести исследование значимых факторов для моделей ФП.

Следует учесть, что применение регрессионного анализа требует экспериментальных данных, поэтому необходимо осуществить планирование и, затем, выполнить эксперимент (глава 4).

2.1 Предпосылки и планирование эксперимента для построения модели функции преобразования

2.1.1 Предпосылки для планирования эксперимента

В основу уравнения измерения [4] расходомеров объемного расхода Q положено выражение (2.1), где S - площадь поперечного сечения проточной части расходомера, v - скорость потока измеряемой среды.

$$Q = S \cdot v, \quad (2.1)$$

Площадь поперечного сечения проточной части расходомера с круглым сечением выражается формулой (2.2), где D - внутренний диаметр проточной части вихревого расходомера с круглым сечением.

$$S = \frac{\pi D^2}{4} \quad (2.2)$$

В главе 1 был описан принцип работы вихревого расходомера и приведены фундаментальные исследования, демонстрирующие связь между скоростью течения жидкости и частотой вихреобразования. Скорость потока измеряемой среды в вихревых расходомерах пропорциональна частоте вихреобразования за телом обтекания [25, 34] и определяется выражением (2.3)

$$v = \frac{f \cdot d}{S_t}, \quad (2.3)$$

где f - частота образования вихрей за телом обтекания,

d - характерный размер тела обтекания,

S_t - число Струхала, безразмерная величина.

Подставив уравнения (2.2) и (2.3) в (2.1), получим уравнение (2.4), являющееся основным уравнением измерения объемного расхода для вихревого расходомера с круглым сечением проточной части:

$$Q = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot d \cdot f \cdot \frac{1}{S_t}. \quad (2.4)$$

Работа большинства вихревых расходомеров основана на том факте, что в определенной области расходов число Струхала (S_t) постоянно, и измеряемый

расход прямо пропорционален частоте во всем диапазоне измерения [25, 67, 94]. Согласно этому уравнение (2.4) можно представить в виде

$$Q = K \cdot f, \quad (2.5)$$

где K - постоянное число во всем диапазоне измерения и равно $K = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot d \cdot \frac{1}{S_t}$.

Такая математическая модель хорошо описывает поведение вихревого расходомера, однако, обеспечивает небольшой диапазон измерения (от Q_{\max} до $Q_{\max}/30$, где Q_{\max} – это максимальный расход расходомера) [71, 96]. Если рассмотреть зависимость числа Струхаля (S_t) в большем диапазоне измерений, то легко заметить значительную его нелинейность в области малых расходов, что продемонстрировано в работах [22, 33, 76].

Вихреакустические расходомеры (вид вихревых) отличаются от классических расходомеров повышенной чувствительностью в области малых расходов [56] и способны измерять расход в широком диапазоне, однако, производителями таких приборов отмечается необходимость коррекции показаний расхода [16, 30, 56] и/или нормирование погрешности измерения таким образом, что допустимая погрешность измерения в области малых расходов значительно возрастает и может достигать 20% [17].

Некоторые производители внедряют в конструкцию вихревых расходомеров датчик для измерения температуры с целью компенсации влияния температуры на результат измерений [56, 53, 22].

Вышеизложенные факты демонстрируют, что поиск модели функции преобразования вихреакустического расходомера является нетривиальной задачей. Простые модели применимы лишь в узком диапазоне измерений и не обеспечивают требуемой точности в области малых расходов. Не разработан однозначный подход к использованию данных о температуре измеряемой среды. Существующие решения являются частными и применимы лишь к конкретным конструкциям конкретных производителей.

2.1.2 Планирование эксперимента.

Поиск модели функции преобразования измерительного устройства всегда сопряжен с экспериментом, при этом важным этапом для его успеха является планирование. Важность планирования эксперимента трудно переоценить, так как грамотное планирование позволяет на основе минимально возможного количества опытов достичь требуемого результата. Цель любого планирования заключается в минимизации (оптимизации) затрат на проводимый эксперимент.

Основные этапы планирования, согласно работе [65], для наших целей можно модифицировать в стройную последовательность из 6 пунктов. С целью адаптации выделенной последовательности к конкретной прикладной задаче по каждому из пунктов приведем краткое описание и для наглядности сведем эту информацию в таблицу 2.1

Таблица 2.1 - последовательность этапов планирования эксперимента

№	Название этапа	Примечание
1	Описание объекта, инструментов и задач планирования эксперимента	Основной инструмент исследования расходомеров — это специализированные установки, воспроизводящие поток определённого расхода жидкости через проточную часть расходомера (проливочные установки). Некоторые из установок позволяют изменять и поддерживать температуру измеряемой среды.
2	Выбор отклика и варьируемых переменных	Измеряемой величиной (откликом) вихревого расходомера является объёмный расход. Как было показано ранее, расход зависит от частоты вихреобразования и температуры измеряемой среды.
3	Выбор уровней и сочетаний факторов	Выбор производится на основе технических возможностей установки и выдвинутых предпосылок о исследуемых расходомерах.
4	Обоснование схемы планируемого эксперимента	Выбор схемы производится в виде компромисса между реализуемостью эксперимента и необходимого числа наблюдений для построения адекватной модели.
5	Сбор, первичная обработка данных, проверка гипотез	Для поиска моделей необходимо выполнение некоторых предпосылок, наличие которых необходимо статистически проверить.
6	Выбор исследуемых математических моделей и методов их поиска	Выбор структуры математической модели и методов ее поиска.

С целью детального планирования эксперимента рассмотрим подробно каждый из выделенных этапов.

1 Описание объекта и инструментов реализации эксперимента

Принципы функционирования вихревых (вихреакустических) расходомеров подробно описаны в главе 1, поэтому сосредоточим рассмотрение на инструментах проведения эксперимента.

Установки, способные воспроизводить и поддерживать заданный расход, а также производить сравнение показаний испытуемого расходомера и эталона массы, объема и расхода, являются редкими и дорогостоящими инструментами. Установки, способные изменять и поддерживать температуру измеряемой среды, являются уникальными и их доступность в России крайне ограничена. Из-за технической сложности последних они имеют ряд ограничений по воспроизводимым расходам и тестируемым диаметрам условного прохода, а также температурам измеряемой среды, что необходимо брать во внимание при планировании эксперимента.

С целью проведения экспериментов для вихревых расходомеров в распоряжение автора была предоставлена «Установка поверочная для поверки счетчиков воды УПСЖ», внесенная в Государственный реестр средств измерения под № 29893-05. Используемая установка аттестована в качестве эталона и проходит ежегодную калибровку, проводимую государственным научным метрологическим центром ФГУП «ВНИИР» г. Казань. Передача единицы произведена согласно нормативному акту «Государственной поверочной схемы для средств измерений массы и объема жидкости в потоке, объема жидкости и вместимости при статических измерениях, массового и объемного расходов жидкости, утвержденной приказом Федерального Агентства по техническому регулированию и метрологии от 07 февраля 2018 г. № 256.»

Полное техническое описание и характеристики, а также копии официальных документов, таких как: описание типа, калибровочный сертификат и полное название эталона, представлено в Приложении Б.

Вышеизложенное позволяет считать данные, полученные в процессе проведения эксперимента, достоверными.

2 Выбор отклика и варьируемых переменных

Выходной измеряемой величиной вихревого (вихреакустического) расходомера является объемный расход Q . Анализ уравнения измерения вихревого расходомера (2.4), а также предпосылок необходимости учета температуры (раздел 2.1), ведет к однозначному выбору варьируемых переменных: *частота вихребразования f* и *температура измеряемой среды t* . Таким образом, функция преобразования может быть представлена в виде $Q = f(f, t)$.

3 Выбор уровней влияющих факторов и их сочетаний

Уровни и сочетание влияющих факторов выбираются исходя из целей исследования, технических возможностей оборудования и экономической целесообразности. Для этого перечислим имеющиеся предпосылки в виде списка.

- Воспроизводимые расходы выбранной установки от 0,1 м³/ч до 25 м³/ч. Особенность организация эксперимента на расходомерной установке, заключается в задании требуемого режима расхода и на его основе расчёта частоты вихребразования исследуемого вихреакустического расходомера.
- Согласно исследованиям [25, 67, 94], в области средних и малых расходов у вихревых расходомеров наблюдается значительная нелинейность ФП.
- У установки нет режима охлаждения, температура нагрева, согласно спецификации, ограничена 90°С.
- Условные диаметры трубопроводов установки и диапазон воспроизводимых расходов позволяют испытать расходомеры ДУ 25, 32 и 50 мм.

Исходя из вышеперечисленного, необходимо определить значения фактора температуры измеряемой среды и выбрать режимы расхода. В таблице 2.2 приведены уровни и подходы к выбору влияющих факторов и отклика.

Следует отметить, что согласно предпосылкам о линейности характеристик в области больших расходов и о нелинейности в области малых расходов, необходимо сосредоточить испытания в зоне нелинейности функции преобразования. Таким образом, большая часть выбранных точек расположена в области малых расходов. Выбранные уровни расхода для каждого ДУ продемонстрированы в таблица 2.3.

Таблица 2.2 – Уровни и подходы к выбору влияющих факторов и отклика

Факторы и отклик	Диапазон значений	Выбранные значения
T, температуры измеримой среды (воды)	от 25°C до 90°C,	8 уровней, равномерно распределенные во всем диапазоне: 25°C, 30°C, 40°C, 50°C, 60°C, 70°C, 80°C, 90°C
Q, объемный расход	От 0,18 м ³ /ч до 25 м ³ /ч	Выбраны 12 точек по расходу. Абсолютные значения зависят от диапазона расхода исследуемого ДУ
F, частота вихреобразования	от 0,1 Гц до 500 Гц	Конкретные значения зависят от заданного расхода и температуры и определяются по результатам проведённого эксперимента

Таблица 2.3 – Заданные уровни расхода для исследуемых расходомеров

ДУ расходомера	Режимы расхода проведения эксперимента и допустимая относительная погрешность
ДУ 25	<p>График для ДУ 25. Показывает предельно допустимую погрешность измерения расхода (красная пунктирная линия) и точки проведения эксперимента (зеленые точки). Основной график охватывает расход от 0 до 9 м³/ч, а вставочный график — от 0 до 0,7 м³/ч. Погрешность в основном находится в пределах ±1,0%.</p>
ДУ 32	<p>График для ДУ 32. Показывает предельно допустимую погрешность измерения расхода (красная пунктирная линия) и точки проведения эксперимента (зеленые точки). Основной график охватывает расход от 0 до 20 м³/ч, а вставочный график — от 0 до 1,4 м³/ч. Погрешность в основном находится в пределах ±1,0%.</p>
ДУ 50	<p>График для ДУ 50. Показывает предельно допустимую погрешность измерения расхода (красная пунктирная линия) и точки проведения эксперимента (зеленые точки). Основной график охватывает расход от 0 до 50 м³/ч, а вставочный график — от 0 до 2,5 м³/ч. Погрешность в основном находится в пределах ±1,0%.</p>

Таким образом, эксперимент выглядит как последовательное повторение двух этапов:

1 Измеряемая среда (вода) нагревается в установке до выбранного значения температуры измеряемой среды.

2 При выбранной температуре производится испытание тестируемого расходомера при заданных значениях расхода. На каждом из испытываемых расходов фиксируется значения эталонного объема $V_{эт}$, накопленного объема испытуемого расходомером $V_{изм}$, эталонный расход $Q_{эт}$ и температуру измеряемой жидкости t . Затем, происходит переход к шагу 1.

По результатам испытаний для каждого режима расхода и температуры измеримой среды вычисляется среднее значение частоты вихреобразования испытуемого расходомера. В результате проведения испытаний получается массив данных, представленный в виде таблицы 2.4, где m – количество задаваемых уровней температуры измеряемой среды, n – количество уровней испытываемых режимов расхода.

Таблица 2.4 – Структура получаемых экспериментальных данных

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}

Искомая модель функции преобразования ставит в соответствие каждой паре значений температуры измеряемой среды t и частоты вихреобразования f объемный расход Q среды. Набор полученных экспериментальных данных Q , F и T будет использоваться для разработки/проверки модели функции преобразования вихреакустического расходомера вида (2.6) вне зависимости от используемого алгоритма и метода поиска (регрессионный анализ, поэлементный анализ уравнения измерения), а как следствие и конкретного вида модели функции преобразования.

$$Q = f(f, t) \quad (2.6)$$

4 Обоснование схемы планируемого эксперимента

Рассмотрим влияющий фактор: температура измеряемой среды.

Согласно техническим ограничениям используемой установки точность задания (установки) температуры $\pm 2^\circ\text{C}$. Точность поддержания температуры во время эксперимента, исходя из практических данных, составила $\pm 0,3^\circ\text{C}$, что сравнимо с погрешностью применяемых средств измерения температуры и не является критичным для проведения эксперимента.

Для каждого тестируемого расхода необходимо производить измерение температуры среды в начале и в конце испытания при каждом расходе, при этом в качестве истинного значения принимать среднее значение температуры двух измеренных температур. Данные о температуре необходимы для расчёта кинематической вязкости.

Рассмотрим влияющий фактор: частота вихреобразования. Для поиска функции преобразования частота вихреобразования является интегральной (средней) за время проведения эксперимента, следовательно, стабильность поддержания расхода не является критичным параметром. Следует отметить, что точность оценки частоты вихреобразования, получаемой в ходе эксперимента, зависит от точности измерения эталонного расхода поверочной установкой, которая составляет 0,2% во всем диапазоне работы установки (Приложение Б).

Ввиду приведенной точности эталона и допустимой погрешности измерения в 1 % в основном диапазоне расходов и в 3 % на малых расходах можно увидеть, что выбранный эталон более, чем в 3 раза точнее, что подтверждает корректность выбора эталона.

С целью исключения промахов из результатов измерения в ходе проведения испытаний был установлен визуальный контроль за сигналом в контрольной точке расходомера [56], что позволяет в момент начала эксперимента на каждом из расходов определить достоверность получаемых данных.

На основании вышесказанного следует сделать вывод, что в ходе эксперимента можно применять однократное повторение при заданном расходе.

5 Сбор, первичная обработка данных, проверка гипотез

С целью проверки применимости метода наименьших квадратов (МНК) для исследования моделей ФП были проверены предпосылки применения этого метода. В приложении В приведены исследования полученных экспериментальных данных с помощью двух статистических критериев, используемых для проверки гипотезы о наличии гетероскедастичности в исходных данных.

Было обнаружено, что исходные данные для построения математической модели гетероскедастичны [39], что противоречит предпосылкам использования МНК и, в случае нарушения данной предпосылки, рекомендуется использовать взвешенный метод наименьших квадратов (ВМНК) [48]. Также в приложении В продемонстрировано, что для устранения гетероскедастичности данных при исследовании вихреакустического расходомера в качестве весового коэффициента может быть выбрано выражение $w_i = 1/f_i$. Таким образом, показано, что при применении ВМНК возможно добиться значительного повышения точности модели функции преобразования при измерении малых расходов.

Вывод по разделу 2.1. В результате рассмотрения предпосылок исследования ФП и планирования эксперимента сделаны следующие выводы:

- В качестве значимых входных факторов модели функции преобразования следует рассматривать частоту вихреобразования и температуру измеряемой среды. Выходным фактором является объемный расход.
- Для получения данных, необходимых для построения двухфакторной модели, решено использовать горячеводный стенд, аттестованный в качестве эталона объёма и объёмного расхода жидкости.
- Проведён выбор уровней влияющих факторов, описана последовательность проведения эксперимента и структура данных, получаемая в результате эксперимента.
- На основании проверки данных с помощью статистических критериев сделан вывод о наличии гетероскедастичности в данных и предложен метод ВМНК с весовым коэффициентом $w_i = 1/f_i$ в качестве метода нахождения значений коэффициентов моделей функции преобразования.

2.2 Поиск модели на основе регрессионного анализа

Развитие аппарата регрессионного анализа позволило разработать подходы поиска зависимости выходной величины от входных влияющих факторов [18]. Одним из универсальных подходов является применение метода всех возможных регрессий. Несмотря на громоздкость, этот метод легко применим при наличии быстродействующей вычислительной техники. Метод заключается в построении всех возможных регрессионных полиномиальных уравнений и оценки каждого уравнения по выбранному критерию. Другие методы, приведенные в работах [18], являются по сути оптимизацией процедуры поиска подходящей регрессии среди всех возможных вариантов.

Ключевыми этапами реализации метода всех возможных регрессий являются:

- 1 Выбор типа исследуемой модели,
- 2 Поиск значений коэффициентов модели,
- 3 Определение условия выбора модели.

Выбор типа исследуемой модели. На основе успешного опыта исследования полиномиальных моделей для поиска оптимальной функции преобразования для датчиков давления используем полином для поиска двухфакторной модели функции преобразования вихреакустических расходомеров вида $Q(f, t)$. Общая полиномиальная модель имеет следующий вид:

$$Q(f, t) = \sum_{j=0}^{P_t} \sum_{i=0}^{P_f} b_{P_t \cdot j + 1} \cdot f^i \cdot t^j \quad (2.7)$$

где P_t – максимальный показатель степени полинома по фактору температуры,
 P_f – максимальный показатель степени полинома по фактору частоты вихреобразования,
 f – фактор частоты вихреобразования,
 t – фактор температуры измеряемой среды,
 b – коэффициенты полинома (математической модели).

На основе анализа разностей значений эталонных расходов и результатов регрессионных моделей (остатков моделей) с большими показателями степени и успешного применения к вихревым расходомерам двухфакторных моделей степени по факторам частоты и температуры не более 3-х [29, 11], выберем показатель степени $P_f=3$ и $P_t=3$. Таким образом, из уравнения (2.7) выведем полную модель для дальнейшего исследования методом всех возможных регрессий:

$$\begin{aligned}
 Q(f, t) = & b_0 + b_1 \cdot f + b_2 \cdot f^2 + b_3 \cdot f^3 \\
 & + b_4 \cdot t + b_5 \cdot t \cdot f + b_6 \cdot t \cdot f^2 + b_7 \cdot t \cdot f^3 \\
 & + b_8 \cdot t^2 + b_9 \cdot t^2 \cdot f + b_{10} \cdot t^2 \cdot f^2 + b_{11} \cdot t^2 \cdot f^3 \\
 & + b_{12} \cdot t^3 + b_{13} \cdot t^3 \cdot f + b_{14} \cdot t^3 \cdot f^2 + b_{15} \cdot t^3 \cdot f^3,
 \end{aligned} \tag{2.8}$$

Согласно методу всех возможных регрессий, необходимо последовательно исследовать все возможные варианты и выбрать модели, удовлетворяющие заданным критериям.

Количество коэффициентов b для модели (2.7) с показателями степени $P_f=3$ и $P_t=3$ находятся по формуле $P = (P_f + 1) \cdot (P_t + 1)$. Для осуществления перебора введем вектор B , представляющий собой 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 говорит, что коэффициент входит в модель, «0» - коэффициент отсутствует. Соответственно, общее количество вариантов определяется длиной двоичного вектора C' и находятся по формуле (2.9). Таким образом, для модели (2.8) число всех возможных регрессий равно 65 536.

$$W = 2^{(P_t+1)(P_f+1)} \tag{2.9}$$

С целью сокращения количества шагов перебора перебор 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 ($b_{12}t^3$, $b_{13}t^3f$, $b_{14}t^3f^2$, $b_{15}t^3f^3$). Для этого будем использовать показатель сложности S модели в виде суммы весов коэффициентов, входящих в исследуемую

модель. Значения весов коэффициентов определены в таблице 2.5. Формулу расчёта показателя сложности можно записать в виде (2.10), где c_i – вес i -го члена, входящего в исследуемую модель (таблица 2.5).

$$C = \sum_i c_i \quad (2.10)$$

Основываясь на показателе сложности для каждой исследуемой модели, можно организовать перебор моделей от простой к сложной, то есть последовательное рассмотрение моделей с показателем сложности от 1 до 65536. При этом модели с показателем сложности $C=1$ будет соответствовать частная модель вида $Q=b_0$, а показателю сложности $C=65536$ полная модель вида (2.8).

Таблица 2.5 – Весовые коэффициенты членов 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	$2^{15}=32768$

Определение введенного показателя сложности в виде суммы весов членов модели, где вес каждого члена модели определяется как 2^i (i – это индекс члена полной модели (2.8)), дает возможность простой реализации формирования частных моделей (модели, в которых присутствует ограниченный набор коэффициентов).

При переводе числа C из десятичного представления в двоичное C' мы получаем вектор (битовую маску, состоящую из «0» и «1»), где «1» в соответствующем разряде вектора говорит, что коэффициент входит в модель,

«0» - что коэффициент отсутствует. Таким образом, получение набора входящих коэффициентов B_j каждой частной j -ой модели $Q(f, t)_j$ можно описать выражением алгебры логики (2.11), где C_j' – показатель сложности j -ой модели выраженный в двоичной системе счисления.

$$B_j = B \& C_j' \quad (2.11)$$

Таким образом, показатель сложности (вектор C') является инструментом формирования частных моделей из полной (2.8) путем применения логического «И» и позволяет упорядочить перебор моделей от простой к более сложной.

Поскольку, как было показано выше, температура является значащим фактором, рассмотрение моделей стоит начинать с показателя сложности модели $C=16$ (то есть с битовой маски 0000 0000 0001 0000).

Окончание поиска происходит при выполнении следующего условия: погрешность очередной исследуемой модели меньше заданной погрешности измерения на каждом из исследуемых режимов расхода при каждой исследуемой температуре. Алгоритм перебора всех возможных регрессий от простой к более сложной представлен на рисунке 2.1.

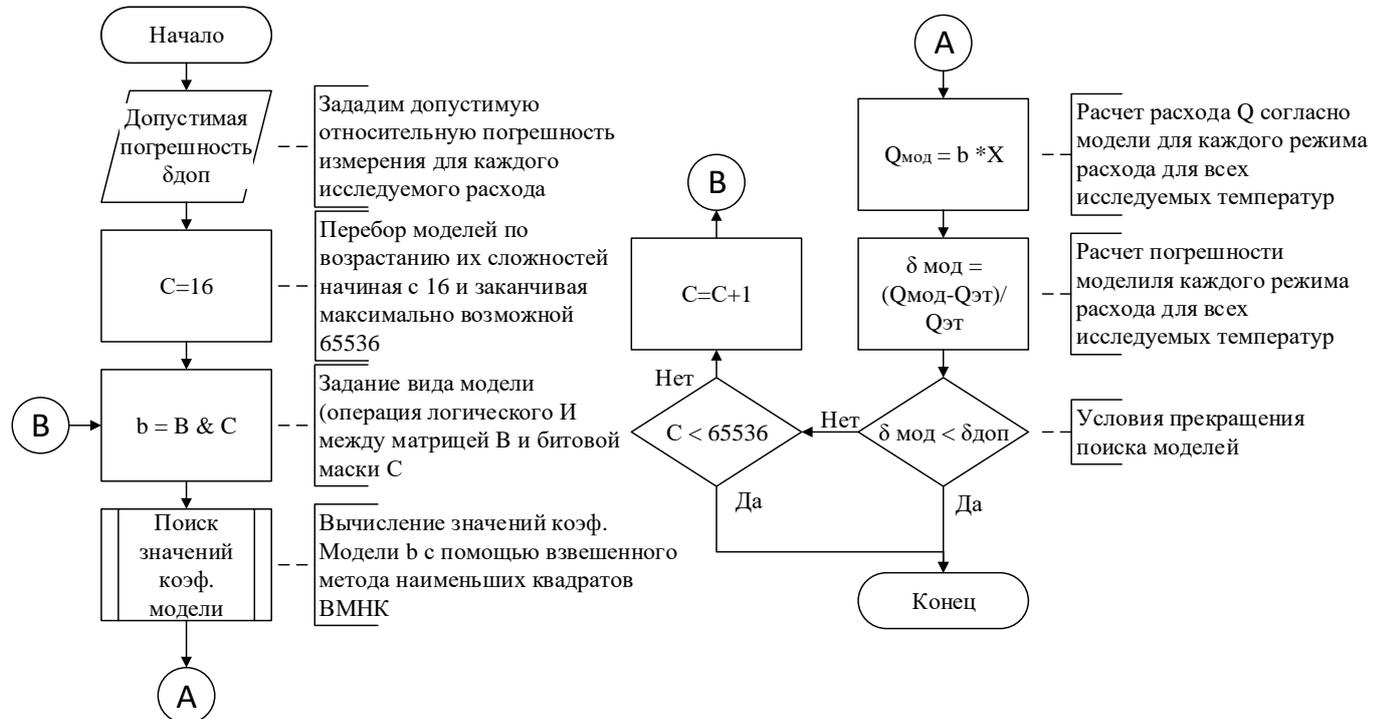
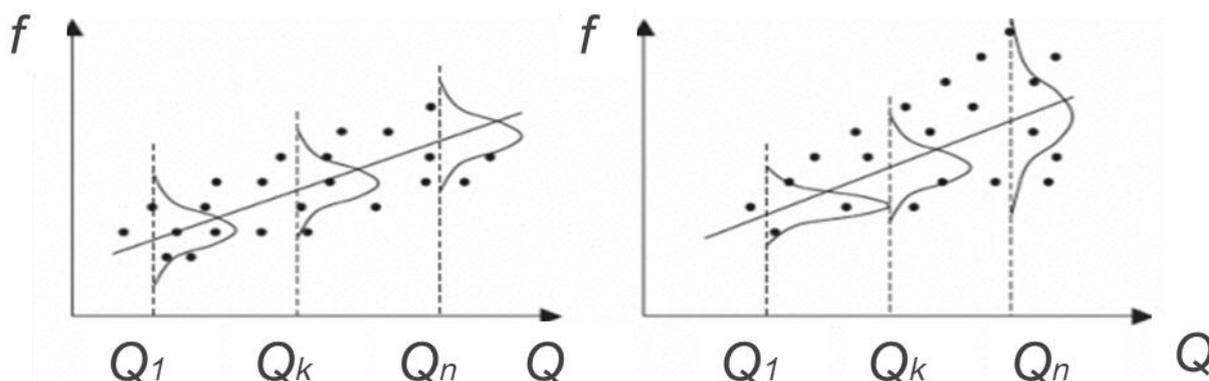


Рисунок 2.1 – Алгоритм поиска модели методом всех возможных регрессий

Поиск значений коэффициентов модели. Традиционным методом поиска значений коэффициентов является метод наименьших квадратов (МНК), одной из ключевых предпосылок использования которого является однородность дисперсии случайной ошибки регрессионной модели (гомоскедастичность данных полученных в ходе эксперимента).

В результате первичной обработки экспериментальных данных (приложение В) было обнаружено, что абсолютные значения дисперсии входной величины частоты вихреобразования f растет при росте исследуемого расхода что, в общем случае, можно наглядно продемонстрировать рисунком 2.2 б, что свидетельствует о гетероскедастичности данных. В таких случаях рекомендуется использовать метод взвешенных наименьших квадратов (ВМНК), что фактически сводится к приведению данных к гомоскедастичному виду и последующему применению МНК [32, 39, 45].



а) случай гомоскедастичности данных б) случай гетероскедастичности данных

Рисунок 2.2 - Пример гомоскедастичных и гетероскедастичных данных

Представим полную модель функции преобразования в матричном виде (2.12) и рассмотрим пример приведения (преобразования) данных на примере «полной» модели функции преобразования для выбранной задачи. «Полная» модель включает в себя все возможные коэффициенты (для исследуемой задачи 16) и поэтому имеет самый большой показатель сложности, «частные» же модели образуются путем исключения некоторых коэффициентов из «полной», что при реализации алгоритма достигается путем логической конъюнкции (2.11) последовательно ко всем матрицам, входящим в уравнение (2.12).

$$Q = X \cdot b + \varepsilon, \quad (2.12)$$

где X – матрица размером ($n \cdot m$, 16) вида:

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

i – изменяется от $1 \dots n$, где n – количество испытанных режимов расхода,

j – изменяется от $1 \dots m$, где m – количество температур измеряемой среды.

b – вектор-столбец, равный транспонированному вектору строки B ($b=B^T$);

ε – случайная ошибка модели;

Q – вектор столбец размером ($n \cdot m$, 1) эталонных расходов $Q_{ij}^{эт}$, полученных в ходе эксперимента и соответствующих паре значений f_{ij} и t_j .

Нарушение условия постоянства дисперсий случайных остатков (гетероскедастичность данных) означает, что ковариационная матрица остатков на главной своей диагонали имеет дисперсии случайных остатков σ_{ij}^2 для различных наблюдений [38]. Если известно значение σ_{ij}^2 для каждого наблюдения, то можно устранить гетероскедастичность, разделив каждое наблюдение на соответствующее ему значение σ_{ij}^2 . Тогда дисперсия случайная ошибка модели представляется в виде (2.13). В результате проделанной процедуры каждое измерение будет иметь случайную ошибку с единичной дисперсией.

$$D(\varepsilon_{ij}/\sigma_{ij}) = \frac{1}{\sigma_{ij}^2} D(\varepsilon_{ij}) = \sigma_{ij}^2/\sigma_{ij}^2 = 1 \quad (2.13)$$

Применение вышеописанного метода в значительной степени ограничено тем, что на практике фактические значения σ_{ij}^2 неизвестны. Данная трудность преодолевается с помощью выдвижения гипотезы, например, о наличии приближенной зависимости вида $\sigma_{ij}^2 = K \cdot f_{ij}^2$, тогда дисперсия случайных остатков $D(\varepsilon_{ij})'$ становится постоянной в независимости от величины f_{ij} .

$$D(\varepsilon_{ij})' = \frac{1}{f_{ij}^2} D(\varepsilon_{ij}) = K. \quad (2.14)$$

Чтобы уменьшить неоднородность дисперсий, разделим обе части уравнения (2.12) на f_{ij} , что приводит к уравнению вида (2.15).

$$Q/f_{ij} = X/f_{ij} \cdot b + \varepsilon/f_{ij}, \quad (2.15)$$

Заменяя $Q/f_{ij} = Q'$, $X/f_{ij} = X'$, $\varepsilon/f_{ij} = \varepsilon'$ получаем уравнение (2.16) и можно заметить, что оно идентично уравнению (2.12).

$$Q' = X' \cdot b + \varepsilon', \quad (2.16)$$

Запишем стандартное решение уравнения (2.16) методом наименьших квадратов с учетом проведенного преобразования данных.

$$b = (X'^T \cdot X')^{-1} \cdot X'^T \cdot Q', \quad (2.17)$$

Как видно из выражений (2.16, 2.17), задача поиска значений коэффициентов ВМНК равносильна применению широко известного МНК, но к заранее преобразованным данным $Q/f_{ij} = Q'$, $X/f_{ij} = X'$. Величина $1/f_{ij}$ интерпретируется как вес, приписываемый квадрату отклонения в ij -ом наблюдении. Этот вес будет тем меньше, чем больше значение f_{ij} , которое в силу наших допущений пропорционально дисперсии случайной ошибки в ij -м наблюдении. В приложении В показано, что применение предложенного весового коэффициента позволяет применять ВМНК с целью повышения точность модели функции преобразования при измерении малых расходов.

Вычислив значения коэффициентов для исследуемой модели $b_{\text{мод}}$, находим значения расхода модели $Q_{\text{мод}}$ для каждого режима расхода ij и каждой температуры j измеряемой среды согласно формулы:

$$Q_{\text{мод}} = X \cdot b_{\text{мод}} \quad (2.18)$$

где $b_{\text{мод}}$ – вектор-столбец численных значений коэффициентов исследуемой модели,

$Q_{\text{мод}}$ – вектор-столбец расходов рассчитанных моделью вида
$$\begin{bmatrix} Q_{11} \\ \dots \\ Q_{ij} \\ \dots \\ Q_{nm} \end{bmatrix},$$

i – изменяется от $1 \dots n$, где n – количество испытанных режимов расхода,

j – изменяется от $1 \dots m$, где m – количество температур измеряемой среды.

Вычисление погрешностей измерения обеспечиваемых моделью δ^{mod}_{ij} для режима расхода ij и каждой температуры j измеряемой среды производится по формуле (2.19) где δ^{mod} – вектор-столбец погрешностей модели размерами $(n \cdot m, 1)$ состоящий из элементов δ^{mod}_{ij} .

$$\delta^{mod} = (Q_{mod} - Q_{эт}) \cdot 100\% / Q_{эт} \quad (2.19)$$

Таким образом, для каждой модели функции преобразования мы получаем вектор δ^{mod} , показывающий погрешности измерения исследуемой модели.

Определение условия выбора моделей. Ключевой характеристикой вихреакустического расходомера является относительная погрешность измерения расхода, нормируемая в технической документации [16, 17, 56]. Поэтому обязательным критерием выбора «годных» моделей является следующий:

$$\forall \delta^{доп}(Q) \in \delta^{доп}, \delta_{ij}^{mod} < \delta^{доп} \quad (2.20)$$

где δ^{mod}_{ij} – относительная погрешность модели для каждого исследуемого расхода ij и каждой температуры j ,

$\delta^{доп}(Q)$ – относительная погрешность измерения расходомера в исследуемом режиме расхода Q , задается в технической документации или определяется целями исследования,

$\delta^{доп}$ – множество значений погрешности, задаваемое для различных диапазонов измерения расхода.

Как отмечалось ранее, для вихреакустических расходомеров погрешность нормируется в зависимости от диапазонов измеряемых расходов, поэтому выбор «годных» моделей сводится к сравнению погрешности модели для каждой исследуемой точки (рисунок 2.3) при каждой исследуемой температуре измеряемой среды.

Так как задачей диссертационной работы ставится повышение точности измерения на малых расходах, то после отбора моделей, удовлетворяющих требованиям технической документации, необходимо выбрать модели, обеспечивающие меньшую погрешность в области малых расходов. В таблице 2.4. приведены значения допустимой относительной погрешности в зависимости от диапазона измерения расхода.

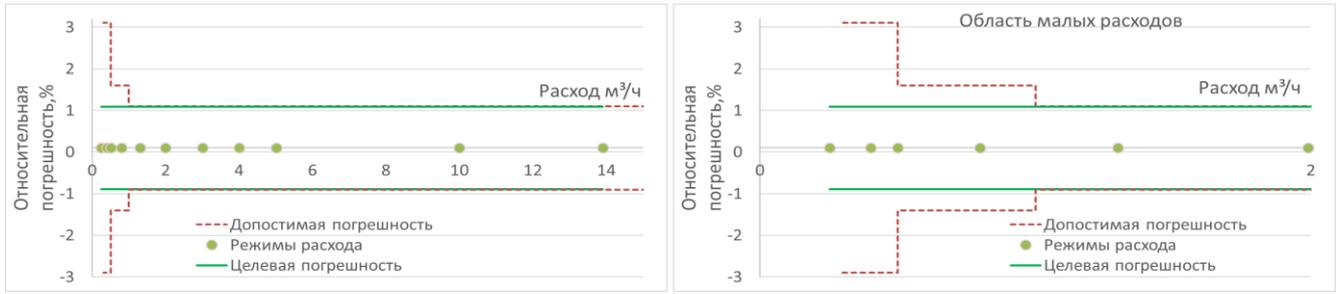


Рисунок 2.3 – Границы допустимой погрешности измерения расхода согласно технической документации (для ДУ 32) и исследуемые точки по расходу

Поставим цель добиться одинаковой погрешности (1%) во всем диапазоне измерения, назовем такую погрешность $\delta^{доп\ зап}$ (целевая погрешность исследования). Таким образом, следующим критерием отбора моделей будет обеспечение моделью необходимого метрологического запаса. Метрологический запас находится по формуле (2.21), и для поставленной задачи повышения точности его значения приведены в таблице 2.6.

$$R = \delta^{доп} / \delta^{доп\ зап} \cdot 100\% \tag{2.21}$$

Таблица 2.6 – Значения погрешности измерения расхода при исследовании

Относительная допустимая погрешность	Диапазон расходов		
	$(Q_{max} - 0.08 Q_{max})$	$(0.08 Q_{max} - 0.04 Q_{max})$	$(0.04 Q_{max} - Q_{min})$
измерения исследуемых расходомеров согласно технической документации, $\delta^{доп}$, %	1%	1,5%	3%
с метрологическим запасом, заданным в данной работе $\delta^{доп\ зап}$, %	1%	1%	1%
Величина метрологического запаса R , %	0%	35%	66%

С учетом вышесказанного, приведем описание этапов исследования функции преобразования методом всех возможных регрессий для расходомеров различных типоразмеров (рисунок 2.4).

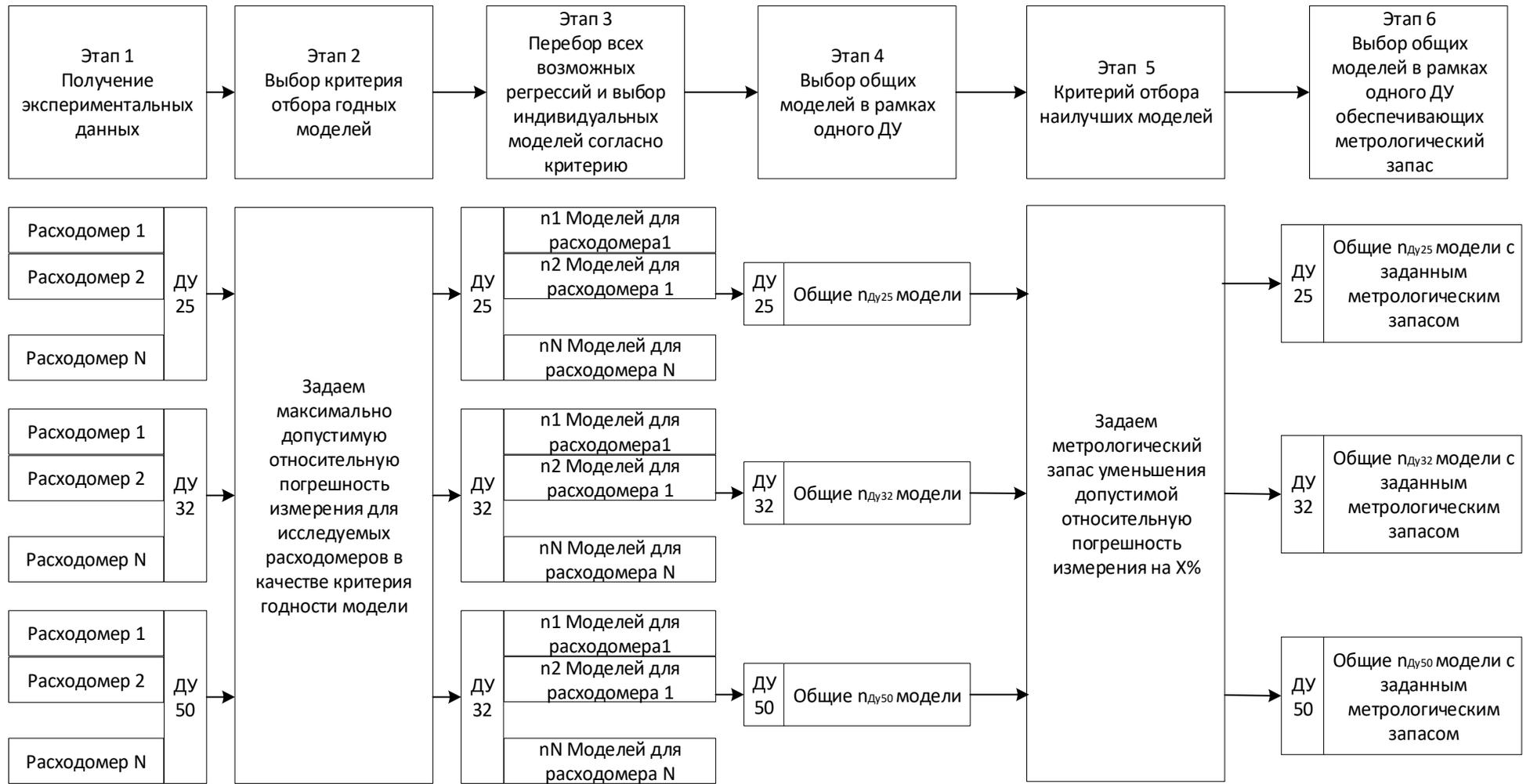


Рисунок 2.4 – Этапы исследования функции преобразования для расходомеров разных типоразмеров

Опишем этапы исследования с упором на его применение к спланированному и проведённому эксперименту (глава 4). В исследовательских целях был реализован перебор всех возможных частных моделей, найденной полной модели функции преобразования без остановки поиска после нахождения первой (наиболее простой) модели, удовлетворяющей заданным условиям.

1 На первом этапе исследуемые расходомеры были разделены на группы (по ДУ). Были исследованы три ДУ: 25, 32, 50 мм.

2 Для расходомеров одной модели погрешность нормируется по одним и тем же правилам [16, 17, 56]. Таким образом, максимально допустимая погрешность δ^{don} , нормируемая в технической документации, является первым критерием исследовательского поиска.

3 На данном этапе происходит перебор всех возможных регрессий и выбираются модели функции преобразования, удовлетворяющие условию (2.20). В результате, для каждого датчика получаем множество «годных» моделей x_{DU}^i , которое формируется согласно формуле:

$$\delta_m^{mod} < \delta^{don} \rightarrow Q_{DU,m}^x \in x_{DU}^i \quad (2.22)$$

где $Q_{DU,m}^x$ – модель множества x_{DU}^i номер m при переборе методом всех регрессий,

δ_m^{mod} – погрешность исследуемой модели m ,

m – номер модели 1...65 536,

DU – исследуемое ДУ, в рассматриваемой задаче возможные значения [25, 32, 50],

i – порядковый номер датчика, в рассматриваемой задаче [1, 2, 3, 4, 5].

4 Для каждой исследуемой группы выбираются общие модели y_{DU} из множеств x_{DU}^i . То есть те модели, которые могут быть применены для всех исследованных расходомеров одного ДУ:

$$y_{DU} = x_{DU}^1 \cap x_{DU}^2 \cap \dots \cap x_{DU}^i \quad (2.23)$$

где y_{DU} – множества общих моделей для ДУ, при этом модель из этого множества,

для которой справедливо $Q_{DU}^y \in y_{DU}$, обозначим Q_{DU}^y ,

i – порядковый номер датчика.

5 В результате работы алгоритма на 4-ом этапе представлено большое количество моделей. Так как цель данной работы является повышение точности измерения на малых расходах, то максимальный метрологический запас в % был задан на участке малых расходов. С целью соответствия исследуемых расходомеров 1 % допускаемой относительной погрешности измерения $\delta^{доп\ зап}$ во всем диапазоне и метрологический запас R был задан согласно таблице 2.4.

6 На этом этапе производится перебор моделей $Q_{DU}^y \in y_{DU}$ и формирование множества z_{DU} , согласно выражению (2.24), то есть отбор общих моделей для каждого ДУ, обеспечивающий заданный уровень погрешности $\delta^{доп\ зап}$

$$\delta_m^{mod} < \delta^{доп\ зап} \rightarrow Q_{DU}^z \in z_{DU} \quad (2.24)$$

где Q_{DU}^z – модель, обеспечивая заданный на этапе 5 уровень погрешности,

z_{DU} – множество моделей, общие для каждого ДУ [25, 32, 50], обеспечивающие заданный на этапе 5 уровень погрешности.

Результаты исследования, основанные на экспериментальных данных, полученных в ходе испытаний на горячеводном стенде (глава 4), приведены в таблице ниже.

Таблица 2.7 – Результаты этапов исследования функции преобразования

		Количество моделей		
		удовлетворяющих требованиям технической документации		с метрологическим запасом
ДУ	Сер. № сенсора	Для каждого сенсора (множество x_{DU}^i)	Для каждого ДУ (множество y_{DU})	Для каждого ДУ (множество z_{DU})
25	...9414	15232	12597	6852
	...9415	16264		
	...9416	14467		
	...9417	15393		
	...9418	12823		
32	...9419	11683	10018	1387
	...9420	11554		
	...9421	10952		
	...9422	13992		
	...9423	10308		
50	...9424	11992	11252	432
	...9425	12831		
	...9426	12815		
	...9427	13851		
	...9428	11500		

Из таблицы видно, что при выполнении этапов 1-5 найдено большое количество общих моделей для каждого ДУ, что демонстрирует возможность нахождения моделей, обеспечивающих повышение точности измерения на малых расходах в широком диапазоне температур.

В производстве предпочтительными к использованию являются модели, имеющие более низкий показатель степени влияющих факторов, поскольку степень фактора определяет необходимое количество экспериментов. С точки зрения снижения затрат на проведение эксперимента предпочтение стоит отдать моделям с низким показателем степени температуры в полиноме, так как проведение испытаний при дополнительной температуре измеряемой среды является более затратным и трудоемким, чем добавление дополнительного режима расхода. Введённый ранее показатель сложности модели S придает значительно больший вес моделям, содержащим члены с высокой степенью температуры ($b_{12}t^3$, $b_{13}t^3f$, $b_{14}t^3f^2$, $b_{15}t^3f^3$), поэтому организация поиска модели для каждого ДУ, начиная с наименьшего показателя S , ведет к выбору оптимальной модели. Наиболее простые модели для каждого ДУ, полученные в ходе исследования, приведены в таблице ниже.

Таблица 2.8 – Модели, выбранные согласно предложенного алгоритма

ДУ	Вид модели	Показатель сложности
25	$Q(f, t) = b_0 + b_1 \cdot f + b_2 \cdot f^2 +$ $+b_5 \cdot t \cdot f + b_7 \cdot t \cdot f^3 +$ $+b_8 \cdot t^2 + b_9 \cdot t^2 \cdot f + b_{10} \cdot t^2 \cdot f^2$	$2^0 + 2^1 + 2^2$ $+2^5 + 2^7$ $+2^8 + 2^9 + 2^{10} = 1927$
32	$Q(f, t) = b_0 + b_1 \cdot f + b_2 \cdot f^2 +$ $+b_5 \cdot t \cdot f + b_7 \cdot t \cdot f^3 +$ $+b_9 \cdot t^2 \cdot f$	$2^0 + 2^1 + 2^2$ $+2^5 + 2^7$ $+2^9 = 551$
50	$Q(f, t) = b_0 + b_1 \cdot f + b_3 \cdot f^3 +$ $+b_5 \cdot t \cdot f + b_7 \cdot t \cdot f^3 +$ $+b_8 \cdot t^2 + b_9 \cdot t^2 \cdot f + b_{10} \cdot t^2 \cdot f^2 +$ $+b_{12} \cdot t^3$	$2^0 + 2^1 + 2^3$ $+2^5 + 2^7$ $+2^8 + 2^9 + 2^{10}$ $+2^{12} = 5899$

На основе полиномиальной модели функции преобразования, метода всех возможных регрессий и взвешенного метода наименьших квадратов было показано, что предлагаемая методика выбора модели функции преобразования является работоспособной и позволяет осуществить поиск функции

преобразования подходящей для вихреакустических расходомеров различных ДУ, а также, что разработанный алгоритм действий является легким для применения.

Описанный выше подход прост в понимании и использовании. Однако, для вихреакустических расходомеров метод регрессионного анализа имеет ключевой недостаток, обусловленный его сутью: применение метода возможно только на анализе экспериментальных данных. Таким образом:

- Метод трудно распространить на расходомеры с большим диаметром условного прохода (ДУ), поскольку, в силу редкости горячеводных испытательных стендов, практически невозможно получить экспериментальные данные для расходомеров ДУ более 50 мм.

- Метод требует большого количества испытаний.

Иными словами, распространение использования метода анализа всех возможных регрессий возможно только при условии существенного роста числа горячеводных стендов, их доступности, а также снижения затрат на получение экспериментальных данных, необходимых для применения этого метода.

2.3 Поиск модели путем покомпонентного анализа уравнения измерения

С целью устранения недостатка вышеописанного алгоритма (раздел 2.2) была разработана оригинальная методика поиска модели функции преобразования. Методика основана на детальном анализе составных частей уравнения измерения вихреакустических расходомеров. Уравнение измерения для расходомера объемного расхода (2.4) можно разложить на составляющие и исследовать каждое из них. Для этого проведем оценку влияния каждого составляющего уравнения измерения вихревого расходомера на результирующую выходную величину - расход.

Влияние геометрических размеров внутреннего диаметра проточной части и характерного диаметра тела обтекания описывается следующими уравнениями:

$$\frac{\partial Q}{\partial D} = \frac{\pi}{4} \cdot d \cdot \frac{1}{S_t} \cdot f \cdot 2D\Delta D \quad (2.25)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial d} = \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{1}{S_t} \cdot f \cdot \Delta d \quad (2.26)$$

Влияние значения числа Струхала и частоты вихреобразования представлены выражениями:

$$\frac{\partial Q}{\partial S_t} = \frac{\pi D^2}{4} \cdot d \cdot f \cdot \left(-\frac{\Delta S_t}{S_t^2}\right) \quad (2.27)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial f} = \frac{\pi D^2}{4} \cdot d \cdot \frac{1}{S_t} \cdot \Delta f \quad (2.28)$$

Суммируя все составляющие и переходя к относительным погрешностям, получим следующее выражение:

$$\delta = \sqrt{\left(\frac{2\Delta D}{D}\right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2 + \left(-\frac{\Delta S_t}{S_t}\right)^2 + \left(\frac{\Delta f}{f}\right)^2} \quad (2.29)$$

Погрешность измерения частоты будет напрямую входить в результирующую погрешность измерения расхода, однако, при рассмотрении модели функции преобразования скомпенсировать данную составляющую невозможно. Точность определения частоты вихреобразования зависит от качества сигнала, получаемого с используемого сенсора, установленного в проточной части, и применённых методов обработки информации о частоте вихреобразования.

Диаметр проточной части и характерная ширина тела обтекания в зависимости от скорости течения жидкости изменяться не будут. Геометрические размеры проточной части могут изменяться только от температуры измеряемой среды. С увеличением температуры диаметр проточной части и характерный размер тела обтекания увеличиваются. Для того, чтобы учесть вышеперечисленные изменения в модели функции преобразования, воспользуемся формулой линейного температурного удлинения:

$$\Delta p = p \cdot \theta \cdot (t - t_0) \quad (2.30)$$

где p – геометрический размер при температуре t_0 ;

t и t_0 – температуры измеряемой среды;

θ – коэффициент температурного расширения;

С целью оценки величины погрешности от изменений геометрических размеров проточной части, вызванной влиянием температуры, подставим выражение (2.30) в (2.29), исключив остальные составляющие:

$$\delta = \sqrt{(2 \cdot \theta \cdot (t - t_0))^2 + (\theta \cdot (t - t_0))^2} \cdot 100\% \quad (2.31)$$

Из выражения (2.31) видно, что погрешность, вызванная изменением геометрических размеров (под действием температуры), не зависит от абсолютных размеров диаметра проточной части, а зависит только от изменения температуры и коэффициента расширения материала, из которого изготовлена проточная часть расходомера. Например, при использовании для изготовления проточной части расходомера и тела обтекания нержавеющей стали 12Х18Н10Т (коэффициент линейного расширения $\theta = 16 \text{ мкм К}^{-1}$) и в диапазоне температур измеряемой среды от 0°С до 150°С погрешность, вызванная температурным расширением, составит 0,54 %.

Составляющая, включающая в себя число Струхала, в классическом представлении о вихревых расходомерах, является постоянным числом во всем диапазоне измерения [25, 67], однако, для вихреакустических расходомеров, в силу их большей чувствительности, в области измерения малых расходов число Струхала значительно изменяется.

На основе опытных данных были построены графики семейства кривых числа Струхала для исследуемых вихреакустических расходомеров. Анализ графических данных показал, что при малых расходах значение числа Струхала изменяется нелинейно в зависимости от частоты вихреобразования f и температуры измеряемой среды t . Внешний вид семейства кривых, приведенных на рисунке 2.5, позволяет предположить, что зависимость числа Струхала от частоты образования вихрей имеет гиперболический характер.

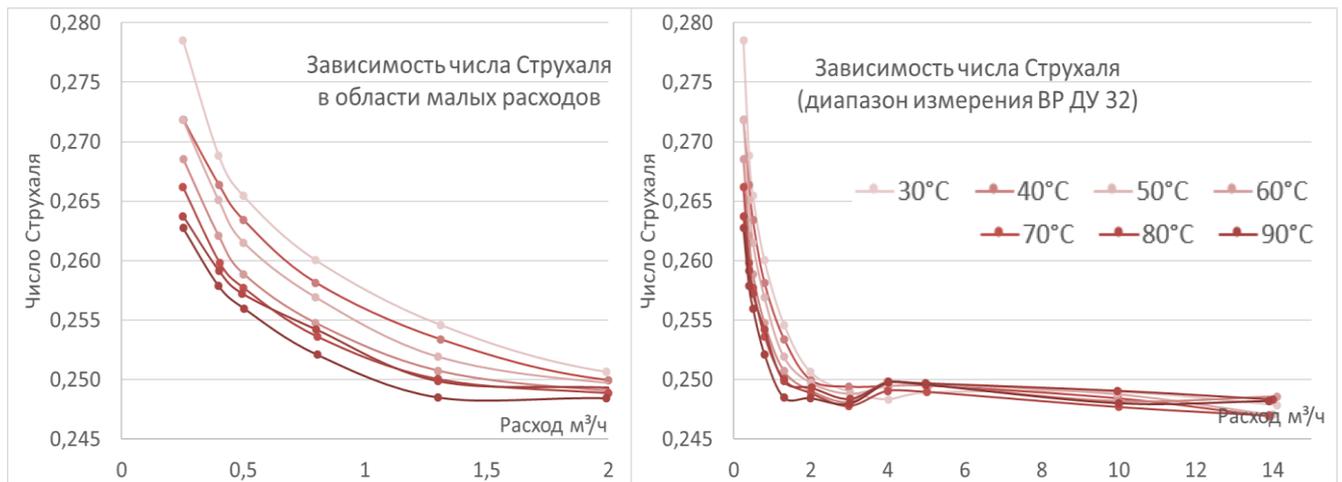


Рисунок 2.5 – Семейство кривых числа Струхала

Согласно формуле (2.29) относительное изменение числа Струхала входит в погрешность измерения расхода. С целью получения численного значения погрешности, которую может вызвать изменение числа Струхала (рисунок 2.5), предположим, что в основном диапазоне измерения число Струхала постоянно и приблизительно равно 0,248. Максимальное значение в области малых расходов достигает 0,280, тогда погрешность от изменения числа Струхала составит 11,4 %.

С целью описания изменения числа Струхала в работе [33] авторами был представлен подход, подобный описанному в главе 2.2, базирующийся на переборе возможных моделей описания числа Струхала одинаковой структуры, но с различными показателями степени при влияющих факторах и выбор согласно критерию минимума относительной погрешности измерения. В результате была выбрана модель, описывающая зависимость числа Струхала от частоты вихреобразования и температуры измеряемой среды $St (1/f, t)$ с показателем степени равным трем при частоте вихреобразования и температуре измеряемой

жидкости. С учетом зависимости числа Струхалия модель уравнения, согласно работе [33], имеет следующий вид:

$$Q = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot d \cdot \frac{1}{a_0 + \frac{(b_0 + b_1 \cdot t + b_2 \cdot t^2 + b_3 \cdot t^3)}{f} + \frac{a_2}{f^2} + \frac{a_3}{f^3}} \cdot f \quad (2.32)$$

Данное уравнение за счет корректировки значения Струхалия позволяет повысить точность измерения расхода, однако, имеет схожие недостатки, описанные в заключении раздела 2.2, поэтому применение его ограничено и не является перспективным.

Ниже приводится альтернативный метод описания зависимости числа Струхалия, лишенный упомянутых выше недостатков.

С целью уменьшения погрешности измерения за счет компенсации измерения числа Струхалия в широком диапазоне режимов расходов и температур измеряемой среды (рисунок 2.5) автором был описан и запатентован способ измерения объемного расхода в вихревых расходомерах [54] (приложение Е). Новизна заявленного способа заключается в определении при калибровке (испытаниях) линейной аппроксимирующей зависимости числа Струхалия от обратного значения соотношения $(f \cdot d^2)/\mu$ и расчета текущего расхода на основе этой зависимости.

В качестве модели, описывающей поведение числа Струхалия, было предложено уравнение (2.33), позволяющее описать поведение числа Струхалия в широком диапазоне расходов и при различных температурах измеряемой среды.

$$St = a + \frac{b}{(f \cdot d^2)/\mu} \quad (2.33)$$

где f – частота вихреобразования за телом обтекания,

d – ширина тела обтекания, согласно технической документации на расходомер,

μ – кинематическая вязкость жидкости,

a и b – значения коэффициентов уравнения, которые зависят от фактических размеров внутреннего диаметра проточной части и тела обтекания и находятся по результатам натурных испытаний.

Отметим, что соотношение $(f \cdot d^2)/\mu$ используется в гидро-, газо- динамике в качестве одного из критериев подобия для описания колеблющегося потока и называется числом Рошко Ro . $Ro = (f \cdot d^2)/\mu$

Кинематическая вязкости жидкой измеряемой среды – справочная величина, выбирается из таблиц зависимости от температуры. Зависимость кинематической вязкости для воды μ с большой точностью может быть аппроксимирована эмпирической формулой (2.34), приведенной в работе [67]. Данная зависимость справедлива для широкого диапазона измерений расхода от 5 °С до 300°С, что перекрывает весь диапазон эксплуатации расходомера.

$$\mu(t) = \frac{1,78 \cdot 10^{-6}}{1 + 0,0337 \cdot t + 0,000221 \cdot t^2} \quad (2.34)$$

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

В результате покомпонентного анализа уравнения измерения вихреакустического расходомера автором была разработана модель функции преобразования для вычисления объемного расхода в зависимости от частоты вихребразования f и температуры измеряемой среды t в следующем виде:

$$Q(f, t) = \pi \cdot \frac{D'(t)^2}{4} \cdot d'(t) \cdot \frac{1}{a + \frac{b}{f \cdot d^2 / \mu(t)}} \cdot f \quad (2.35)$$

где $D'(t)$ – диаметр проточной части при соответствующей температуре,

$d'(t)$ – характерный диаметр тела обтекания при соответствующей температуре,

a и b – коэффициенты модели, в общем случае индивидуальные для каждого расходомера,

$\mu(t)$ – выражение, описывающее изменение кинематической вязкости измеряемой среды, для воды может быть использовано выражение (2.34).

Как видно из уравнения, предложенный подход имеет следующие преимущества:

– поведение числа Струхаля описано как зависимость от температуры (влияние температуры на кинематическую вязкость жидкости) и разброса

геометрических размеров проточной части (коэффициенты a и b , определяемые при изготовлении расходомера), что приводит к повышению точности измерения малых расходов причем в широком диапазоне температур измеряемой среды;

– уменьшение количества экспериментов, необходимых для определения коэффициентов модели за счет уменьшения коэффициентов до 2-х;

– отсутствие необходимости испытаний расходомеров больших DU на горячеводном стенде (что связано со сложностями, описанными в разделе 2.2.) достигается за счет выделения составляющих уравнения, зависящих от температуры измеряемой среды и от остальных составляющих.

Отметим, что в ходе исследований разных DU расходомеров одного модельного ряда, в конструкции которых сохраняется соотношение размеров диаметра проточной части к характерному диаметру тела обтекания (одинаковой формы), было обнаружено и показано в главе 4, что числовые значения коэффициентов модели, описывающей поведение числа Струхалия, являются очень близкими, а их разброс зависит от конструктивных допусков исполнения проточной части и тела обтекания вихревого расходомера, что несет дополнительные выгоды при организации производства и калибровки вихревых расходомеров.

2.4 Качественное сравнение разработанного алгоритма и метода

Плюсы и минусы разработанных моделей функции преобразования описаны разделах 2.2 и 2.3.

В ходе поиска моделей методом перебора всех возможных регрессий был предложен простой в понимании и реализации алгоритм поиска моделей, легко применимый при наличии экспериментальных данных для исследуемой модели расходомера. Выбранные модели позволили достичь повышения точности измерения малых расходов для исследуемой модели вихреакустических расходомеров. Отмечена возможность использования этого метода для крупносерийного производства расходомеров небольших ДУ (менее 50 мм). Однако, применимость данного метода ограничивается наличием специализированного оборудования (горячеводные стенды для ДУ более 100 мм очень редкие) и необходимостью проведения испытаний для поиска значений моделей ФП при различных температурах измеряемой среды при выпуске из производства.

Модель ФП на основе метода поэлементного анализа уравнения измерения вихреакустического расходомера позволила не только повысить точность измерения малых расходов за счет учета фактора температуры и описания поведения числа Струхала в широком диапазоне температур измеряемой среды, но также дает следующие дополнительные преимущества:

- возможность использования разработанной модели ФП для расходомеров больших диаметров ДУ за счет разделения составляющих уравнения предложенной модели ФП на две части: зависящие от температуры измеряемой среды ($D'(t)$, $d'(t)$, $\mu(t)$) и зависящие от влияния геометрических размеров проточной части и тела обтекания конкретного расходомера (коэффициенты a и b);
- уменьшение количества экспериментов, необходимых для определения коэффициентов модели, за счет наличия в модели лишь 2-х коэффициентов,

обеспечивает экономию средств при проведении калибровки расходомера при выпуске из производства;

– оценка вклада каждой составляющей в результирующую погрешность измерений объемного расхода и выделение составляющей с наибольшим вкладом;

– возможность оценки погрешности измерения расходомера от выбора материала проточной части на этапе конструирования расходомера.

Таким образом, разработанная модель функции преобразования и предложенный автором метод анализа уравнения измерения расхода обладает рядом преимуществ перед предложенным методом перебора всех возможных регрессий. Однако, оба разработанных подхода обеспечивает повышение точности измерения на малых расходах и позволяет расширить диапазон измерения вихревых расходомеров, что продемонстрировано в разделе 4.2.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

В данной главе проведено планирование двухфакторного эксперимента, представлены *алгоритм* выбора модели ФП вихреакустического расходомера, основанный на методе всех возможных регрессий и предложенном показателе сложности, и *метод* поиска модели ФП путем поэлементного анализа уравнения измерения вихреакустического расходомера. Разработанные алгоритм и метод позволяют достичь повышения точности измерения на малых расходах за счет описания поведения расходомера в широком диапазоне температур измеряемой среды, однако, имеет разные ограничения по применению.

Алгоритм выбора модели ФП вихреакустического расходомера, основанный на методе всех возможных регрессий и предложенном показателе сложности, является простым в освоении и применении при наличии экспериментальных данных. Ограничением данного метода является невозможность распространить полученные результаты на расходомеры больших типоразмеров и необходимость испытаний при различных температурах измеряемой среды.

Метод поиска модели ФП путем поэлементного анализа уравнения измерения за счет разделения составляющих предложенной модели на зависимые от температуры измеряемой среды и зависимые от влияния геометрических размеров позволяет избежать недостатков присущих описанному выше алгоритму.

Модель, найденная данным методом, обладает свойством масштабируемости, то есть *может быть распространена на другие типоразмеры* (большие ДУ) без проведения испытаний на горячеводном стенде (продемонстрировано в главе 4.2).

Модель не требует проведения испытаний при различных температурах измеряемой среды при выпуске из производства, так как влияние температуры описано через температурное расширение геометрических параметров и кинематическую вязкость жидкости.

Модель содержит всего два коэффициента, значение которых индивидуальны для образца расходомера, поэтому ее применение в серийном производстве *требует испытаний лишь при двух режимах расхода*, чтобы найти значения двух коэффициентов модели.

В результате поиска моделей с помощью *алгоритма* основанного на методе всех возможных регрессий и *метода* анализа уравнения измерения для вихреакустических расходомеров получаются двухфакторные модели функции преобразования, входными параметрами которых являются частота вихреобразования и температура измеряемой среды. Как правило, в рассматриваемых АСУ ТП температура измеряемой среды изменяется медленно, методы измерения температуры хорошо исследованы, поэтому частота вихреобразования является ключевым фактором предложенной модели ФП во всем диапазоне измерения расходов.

Было показано, что погрешность измерения частоты напрямую входит в результирующую погрешность измерения расхода, которую невозможно скомпенсировать с помощью функции преобразования. Таким образом, повышение точности измерений расходомера возможно посредством разработки алгоритма обработки информации о частоте вихреобразования.

3 АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ О ЧАСТОТЕ ВИХРЕОБРАЗОВАНИЯ В ВИХРЕАКУСТИЧЕСКИХ РАСХОДОМЕРАХ

Повышение точности измерения вихреакустическим расходомером является комплексной задачей. Выбор функции преобразования позволяет точно описать поведение расходомера на малых расходах и, тем самым, уменьшить погрешность измерения. Ключевым влияющим фактором модели функции преобразования для вихреакустических расходомеров является частота вихреобразования. Таким образом, помимо выбора модели функции преобразования возникает задача точной оценки частоты вихреобразования.

В работах [92, 31] показано, что значения частоты вихреобразования при стабильном расходе имеют разброс. Расчет расхода, согласно модели функции преобразования, на основании каждого измерения частоты приведет к значительным погрешностям измерения расхода. Таким образом, необходима разработка алгоритмического обеспечения обработки информации о частоте вихреобразования.

Разработку алгоритма следует начать с анализа функциональной схемы расходомера. На основании знаний о принципах получения информации и о значениях частоты вихреобразования необходимо выработать требования для алгоритма получения оценки частоты вихреобразования. Базируясь на этих требованиях, необходимо разработать и описать алгоритм оценки частоты вихреобразования и предложить инструмент сравнения разработанного алгоритма с другими распространенными алгоритмами обработки информации о частоте вихреобразования.

3.1 Разработка требований к алгоритму оценки частоты вихреобразования в вихреакустических расходомерах

В вихреакустических (вихревых) расходомерах существует *зависимость между частотой (скоростью) поступления информации о частоте вихреобразования и расходом жидкости (скоростью течения)*. Чем меньше измеряемый расход, тем реже поступает информация [31].

С целью демонстрации этого ключевого отличия вихревых расходомеров рассмотрим рисунок 3.1, где изображена функциональная схема цепи получения информации о мгновенных частотах вихреобразования за телом обтекания в вихреакустических расходомерах [56, 86]. На схеме нанесены блоки, выделенные на рисунке 1.4, с целью подробной визуализации каждого из блоков.

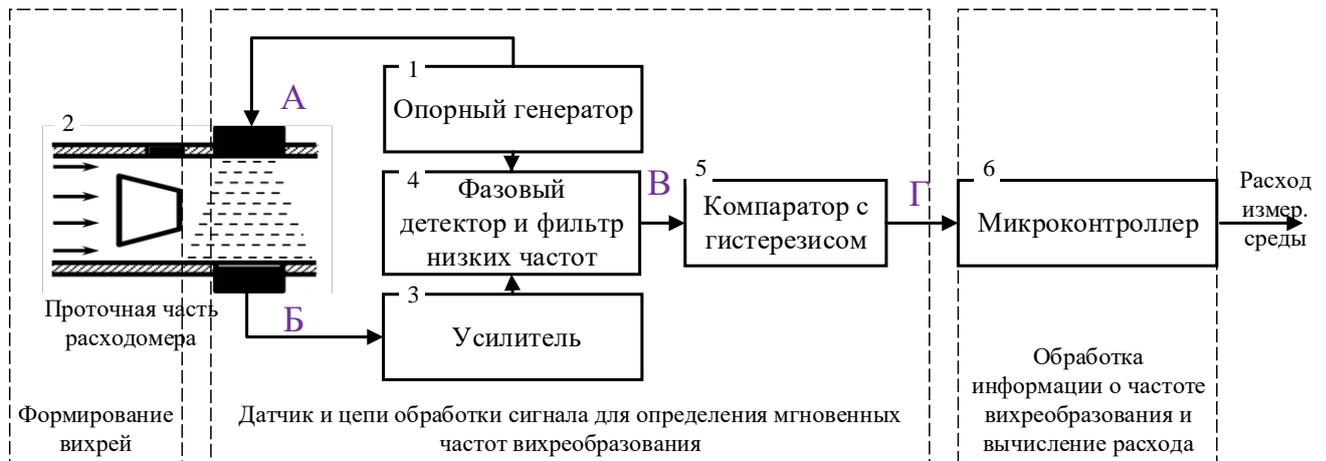


Рисунок 3.1 – Функциональная схема вихреакустического расходомера

Конструкцию вихреакустического расходомера укрупненно можно представить в виде шести блоков. На рисунке 3.2 приведены временные диаграммы сигналов в соответствующих точках функциональной схемы. Параметры сигналов на рисунке выбраны для наглядности. В таблице 3.1 приведено описание сигналов, представленных на временной диаграмме, и последовательно продемонстрирован механизм формирования в памяти микроконтроллера временного ряда значений мгновенных частот вихреобразования.

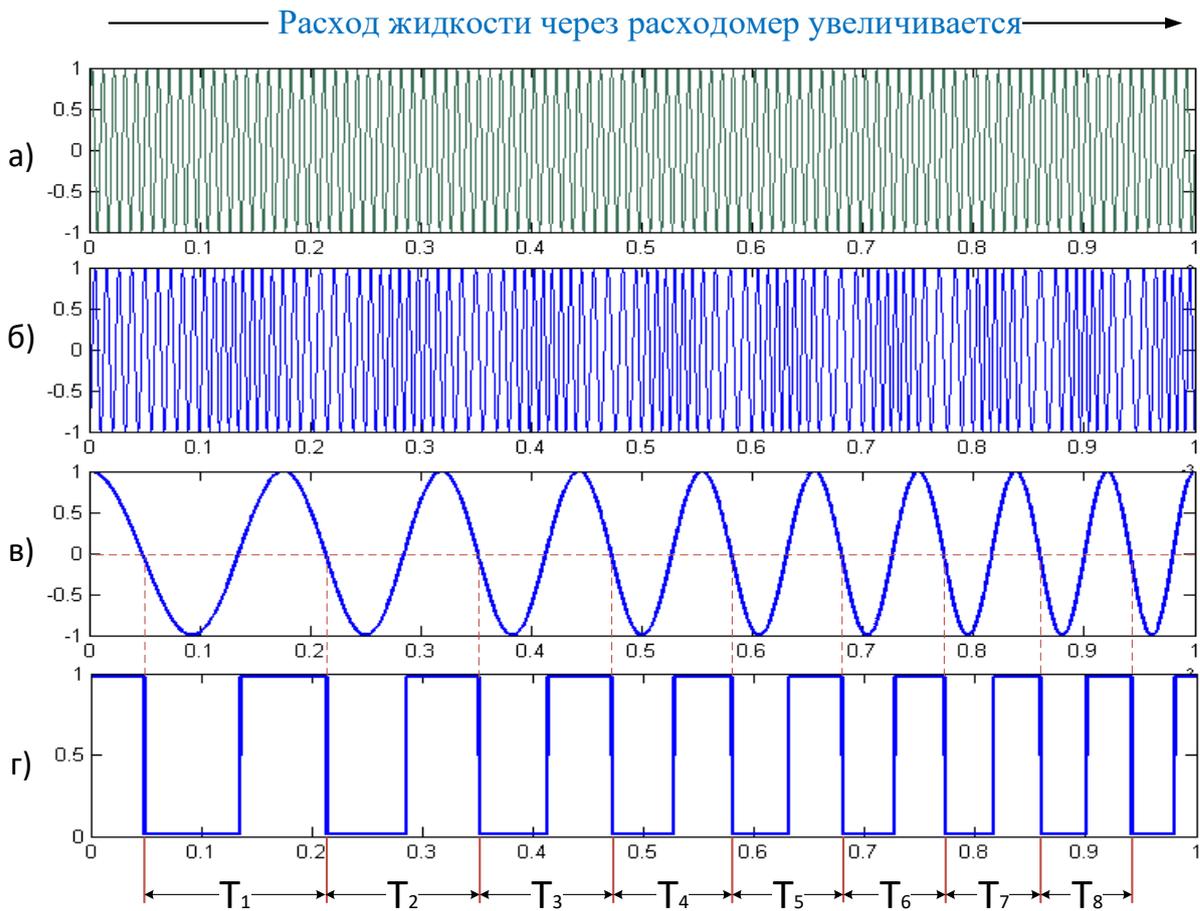


Рисунок 3.2 – Временная диаграмма работы вихреакустического расходомера.

Таблица 3.1 – Описание сигналов временной диаграммы

Сигнал	Характер сигнала	Назначение
Рисунок 3.2 а	Высокочастотный сигнал постоянной частоты (точка А рисунок 3.1)	Опорный генератор формирует сигнал необходимый для возбуждения пьезопреобразователя (излучатель). Высокочастотный электрический сигнал (за счет обратного пьезоэлектрического эффекта) преобразуется в механические колебания и излучается в измеряемую среду в виде ультразвуковой волны.
Рисунок 3.2 б	Высокочастотный сигнал, модулированный частотой вихреобразования (точка Б рисунок 3.1)	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.
Рисунок 3.2 в	Низкочастотный сигнал с частотой (точка В рисунок 3.1)	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.
Рисунок 3.2 г	Преобразованный низкочастотный сигнал прямоугольной формы (точка Г рисунок 3.1)	Полученный сигнал подается на компаратор и на вход микроконтроллера, где производится измерение длительности периодов сигнала (частоты вихреобразования). В результате, получаем информацию о мгновенных значениях частоты вихреобразования в виде цифровых отсчетов.

Из рисунка 3.2 и описания сигналов в таблице 3.1 видно, что измерение периода (появление отсчета в цифровом виде в микроконтроллере расходомера) происходит неравномерно и зависит от частоты самого сигнала, то есть от измеряемого расхода. Таким образом, на основе временной диаграммы наглядно продемонстрирована существенная особенность вихревых расходомеров, заключающаяся в зависимости скорости поступления информации о частоте вихреобразования от измеряемого расхода.

При применении распространённых методов алгоритмов обработки информации таких как: скользящее среднее и медианное усреднение с фиксированной шириной окна, вышеназванная особенность ярко проявляется и вносит существенный вклад в погрешность измерения накопленного объема в условиях импульсного изменения расхода. Для демонстрации этого рассмотрим пример импульсного изменения расхода от $0,4 \text{ м}^3/\text{ч}$ до $3 \text{ м}^3/\text{ч}$ и обратно (длительность каждого участка равной 20 секундам).

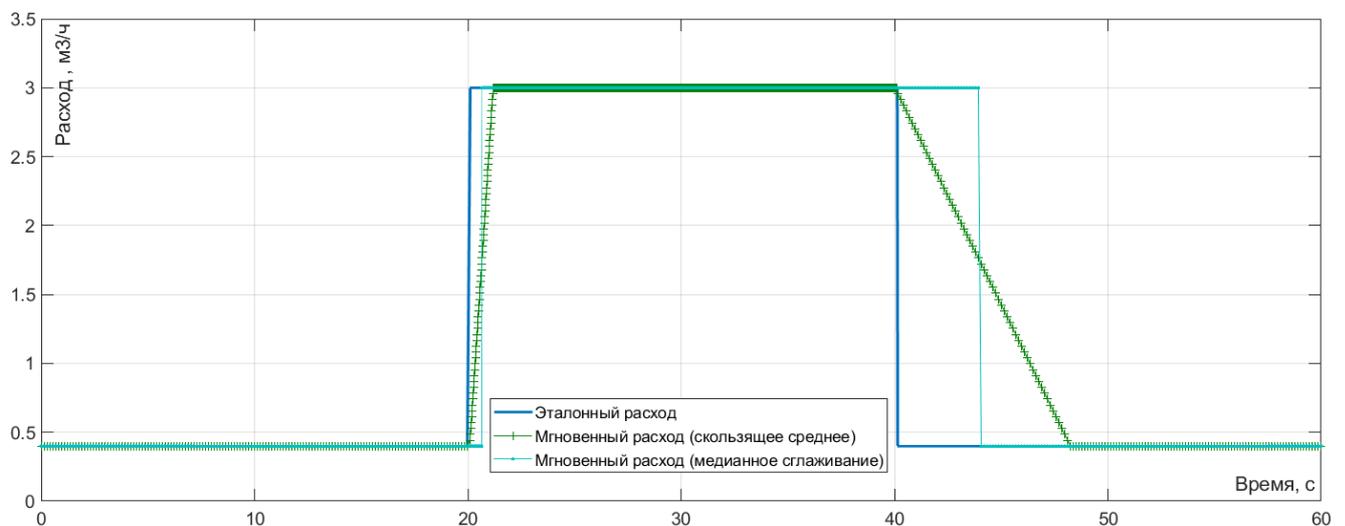


Рисунок 3.3 – Работа алгоритмов скользящего среднего и медианной фильтрации в импульсном режиме для вихреакустического расходомера ДУ 32 мм

Из рисунка видно, что при росте расхода запаздывание мгновенных значений расхода находится в пределах 2-х секунд, однако, при уменьшении расхода (за счет увеличения времени поступления информации о частоте вихреобразования, так как отсчёты частоты фиксируются реже) мгновенные значения расхода на выходе расходомера запаздывают значительно (4-8 секунд). Проинтегрировав мгновенные значения за рассматриваемый промежуток времени,

можно вычислить погрешность накопленного объёма. В приведенном примере относительная погрешность накопленного объёма составила + 8,1 % для алгоритма медианного усреднения и + 8,6 % для скользящего среднего.

Далее разберем другие характерные особенности вихревых расходомеров. Частота вихреобразования при изменении расхода от минимального до максимального может изменяться от десятых долей герц до сотен герц. Параметры нескольких серийно выпускаемых вихреакустических расходомеров с различными ДУ [16, 17, 56], сведены в таблицу.

Таблица 3.2 – Пример диапазона частот вихревых расходомеров

ДУ	Max расход, м ³ /ч	Min расход, м ³ /ч	Max частоты, Гц	Min частоты, Гц
25	9	0,18	360,0	7,20
50	50	0,40	251,3	2,01
100	200	1,50	125,1	0,93
300	2000	18,00	25,4	0,22

Частота вихреобразования даже при стабильном расходе нестабильна и изменяется в определённых пределах. В работах [31, 93, 94,] в условиях лабораторных экспериментов показано, что коэффициент вариации мгновенных частот вихреобразования в вихреакустических (вихревых) расходомерах колеблется в пределах 2-10 % в зависимости от конструкции расходомеров и измеряемого расхода.

На основе анализа конструкции вихреакустического расходомера и принципов его работы определены следующие требования к разрабатываемому алгоритму:

- Алгоритм не должен требовать больших вычислительных мощностей, при этом он должен обеспечивать возможность работы вихреакустического расходомера в реальном времени.
- С целью минимизации погрешности как мгновенных расходов, так и накопленного объёма алгоритм должен быть адаптивным к:
 - наличию зависимости между скоростью поступления информации и измеряемым расходом,
 - быстрому изменению режимов расхода (стабильный, изменяющийся),
 - работе в широком диапазоне частот (от десятых долей герц, до сотен герц).

3.2 Структура адаптивного алгоритма оценки частоты вихреобразования

Суть предложенного адаптивного алгоритма заключается в том, чтобы использовать разные методы обработки временного ряда мгновенных значений частоты вихреобразования в зависимости от режима измерения (рисунок 3.4). [19, 28].

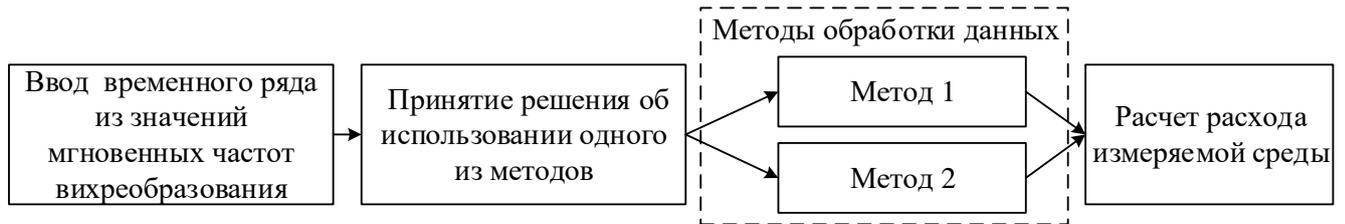


Рисунок 3.4 – Функциональная схема адаптивного алгоритма обработки информации о частоте вихреобразования в вихревом расходомере

Для разработки предлагаемого алгоритма необходимо выделить и описать состояния, возникающие при измерении расхода в АСУ ТП: установившийся режим расхода, режим изменения расхода и внештатная работа. Разницу между режимами продемонстрируем с помощью таблицы 3.3. Работу расходомера можно рассматривать в виде последовательности режимов, описанных в таблице 3.3, в произвольном порядке сменяющих друг друга.

Таблица 3.3 – 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.

В результате работы вышеописанной схемы (рисунок 3.1) в памяти микроконтроллера получаем значения частот вихреобразования, последовательность которых представляет собой временной ряд $F = \{f_0, f_1, \dots, f_i, \dots\}$, имеющий начало в момент включения расходомера и пополняющийся до отключения расходомера, где f_i - значение мгновенных частот в i момент времени.

Для всех значений временного ряда происходит первичная проверка данных, в ходе которой отсеиваются наиболее грубые помехи,

$$f_{min} < f_i < f_{max} \quad (3.1)$$

где f_{min}, f_{max} - минимально и максимально возможные значения мгновенной частоты для данного ДУ расходомера.

С момента включения расходомера происходит накопление массива F_n , состоящего из n значений мгновенных частот.

$$F_n = [f_0, f_1, \dots, f_i, \dots, f_n] \quad (3.2)$$

Последующее обновление массива происходит по принципу «первый вошел первый вышел».

Для определения режима работы (таблица 3.3) расходомера, исходя из описания физики процесса, необходимо в каждый момент времени определять степень изменения мгновенных значений частот вихреобразования и наличие однонаправленного увеличения или уменьшения мгновенных значений частот вихреобразования. Для реализации этих целей были выбраны два показателя: коэффициент вариации V_k и критерий обнаружения тренда – критерий инверсий.

Два показателя являются минимально возможным количеством для принятия решения. Это обусловлено тем, что использование одного коэффициента вариации в качестве критерия определения режима расхода на практике может привести к ложным срабатываниям. Увеличение коэффициента вариации может быть вызвано не только изменением расхода, но и нарушением работы расходомера, например, изменением формы тела обтекания в виду значительного его повреждения или присоединения инородного тела к телу обтекания, что иногда случается в эксплуатации расходомеров. Применение одного лишь критерия наличия тренда не позволяет определить внештатный режим работы расходомера.

Рассмотрим каждый из показателей отдельно и опишем, как должен работать критерий, созданный на их основе, то есть как в адаптивном алгоритме должен происходить процесс принятия решений.

Коэффициент вариации. Коэффициент вариации характеризует степень разброса частоты вихреобразования при измеряемом расходе. Коэффициент

вариации V_k находится по формуле 3.3. Числитель формулы представляет собой расчет среднеквадратического отклонения в массиве значений мгновенных частот F_n состоящего из элементов f_i , а знаменатель f_{cp} - среднее значение массива F_n .

$$V_k = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_i - f_{cp})^2}{n}} / f_{cp} \cdot 100\%, \quad (3.3)$$

Коэффициент используется для оценки стабильности вихреобразования в диапазоне измеряемых расходов. Он, как правило, в области больших и средних расходов является постоянной величиной, составляющей единицы процентов, а в зоне малых расходов резко увеличивается до 10 % [31, 80, 94]. Аналогичные результаты были получены при проведении эксперимента в данной работе. Результаты представлены в разделе 4.1.2 и приложении Г.

Базируясь на вышеприведенных результатах, поведение коэффициента вариации в диапазоне измеряемых расходов предложено описать функцией в виде гиперболы, так как в области больших и средних расходов имеет практически постоянное значение и резко увеличивается в области малых расходов. В качестве аргумента функции может выступать f - среднее значение массива F_n .

$$V_k(f) = l_1 + l_2 / (f - f_{\min}), \quad (3.4)$$

где l_1 – значение коэффициента вариации при больших и малых расходах, f_{\min} – частота вихреобразования при минимальном измеряемом расходе, l_2 – коэффициент определяющий наклон гиперболы, определяется, исходя из конструкции расходомера.

Описание коэффициента вариации в виде математического выражения для всего диапазона измерения расходомера позволяет задать порог реагирования L в виде простого выражения (3.5), где G - коэффициент запаса относительно значений коэффициента вариации, полученного при испытаниях в лабораторных условиях.

$$L = G * V_k(f), \quad (3.5)$$

Также значение L может быть выражено одним числом для всего диапазона расходов в виде максимального значения коэффициента вариации, полученного при испытании [31].

Критерий обнаружения тренда. В работе [38] проведено сравнение критериев проверки гипотезы об отсутствии тренда. Показано, что *критерий инверсий* имеет большую мощность даже в условиях малого объема выборки (от 30 элементов) и неизвестного закона распределения случайных величин. Таким образом, данный критерий является универсальным и для его реализации не требуется значительных вычислительных мощностей.

Согласно критерию инверсий для обнаружения тренда, выдвигается гипотеза H_0 об отсутствии тренда в массиве данных F_n [12]. Рассмотрим последовательность из n элементов массива F_n и подсчитаем, сколько раз в последовательности имеет место неравенство $f_i > f_j$ при $i < j$. Каждое такое неравенство называется инверсией I и формально вычисляется по формулам:

$$h_{ij} = \begin{cases} 0, & f_i > f_j; \\ 1, & f_i \leq f_j \end{cases} \quad (3.6)$$

$$I_i = \sum_{j=i+1}^n h_{ij}, \quad (3.7)$$

$$I = \sum_{i=1}^{n-1} h_i, \quad (3.8)$$

Если последовательность из n наблюдений состоит из независимых исходов одной и той же случайной величины, то число инверсий I является случайной величиной со средним значением и дисперсией согласно формулам:

$$E(n) = \frac{n \cdot (n-1)}{4}, \quad (3.9)$$

$$D(n) = \frac{2n^3 + 3n^2 - 5n}{72}, \quad (3.10)$$

Для проверки выдвинутой гипотезы с применением квантилей нормального распределения в качестве критерия становится возможным перейти от числа инверсий I к нормализованному показателю I^* с целью сравнения показателя I^* с квантилями нормального распределения [12]. Нормализованная статистика I^* вычисляется по формуле:

$$I^* = \frac{I - E(n)}{\sqrt{D(n)}}, \quad (3.11)$$

Гипотеза об отсутствии тренда не отклоняется (тренда в данных нет), если выполняется условие (3.12), где α - уровень значимости, заданный для проверки гипотезы, в противном случае, делается вывод, что тренд в данных присутствует.

$$I_{\alpha/2} < I^* < I_{1-\alpha/2}, \quad (3.12)$$

Для технических задач доверительную вероятность принято выбирать равную 0,95, следовательно, уровень значимости α равен 0,05.

Если наличие тренда в проверяемом массиве данных F_n обозначить за «1», отсутствие «0», аналогично, для того же массива данных F_n превышение порога L коэффициентом вариации V_k ($V_k \geq L$) обозначить за «1», в противном случае ($V_k < L$) обозначить «0», то можно составить таблицу 3.4, которая отражает все возможные состояния алгоритма и позволяет определить режим потока и, как следствие, принять решение о методе обработки данных в адаптивном алгоритме.

Таблица 3.4 – Таблица определения режима работы расхода

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

Для установившегося режима эффективным методом выделения действительного значения частот M_i из массива F_n в момент времени i является скользящее среднее. Применение скользящего среднего можно рассматривать в качестве фильтра нижних частот. На основе обработки экспериментальных данных в приложении Г было показано, что в установившемся режиме расхода получаемый массив мгновенных частот вихреобразования в процессе работы расходомера не противоречит нормальному распределению. В таком случае оценка, полученная с использованием скользящего среднего (обрабатываемые данные подчиняются нормальному закону распределения), является адекватной [24].

$$M_i = \sum_{i=1}^n f_i/n, \quad (3.13)$$

где f_i – мгновенное значение частоты вихреобразования из массива F_n размером n .

В случае изменяющегося расхода экспоненциальное сглаживание первого порядка позволяет быстро приближаться к значению изменяющегося расхода, при этом подавляет резкие скачки (выбросы) измерений [43, 66]. Такое свойство

полезно при обработке временного ряда значений, полученных при изменяющемся расходе. Метод выделения действительного значения частот E_i в момент времени i с помощью экспоненциального сглаживания с заданным параметром сглаживания β реализуется посредством следующего выражения:

$$E_i = f_i \cdot \beta + (1 - \beta) \cdot E_{i-1}, \quad (3.14)$$

где E_{i-1} – оценки частоты вихреобразования, полученные с помощью экспоненциального сглаживания на $i-1$ измерении,

β – параметр экспоненциального сглаживания.

Параметр экспоненциального сглаживания β в технических задачах принято выбирать от 0,1 до 0,3 [43]. Выбор осуществляется в зависимости от потребностей конкретной АСУ ТП. Чем больше значение β , тем быстрее расходомер реагирует на изменение расхода; чем меньше значение β , тем плавнее расходомер отрабатывает изменение расхода.

Как видно из математического описания алгоритм имеет ряд параметров, которые необходимо определить до начала его работы.

Количество элементов массива F_n выбираются, исходя из конструкции и области применения вихреакустического расходомера. Ограничения значения n снизу определены рекомендацией для используемого критерия обнаружения тренда. Для устойчивой работы критерия инверсий необходимо $n > 30$. Ограничения значения n сверху определяются стабильностью вихреобразования в исследуемом расходомере и может быть найдено экспериментально. Обычно n выбирается в диапазоне от 50 до 200.

Взаимодействие частей алгоритма, реализующего выше описанное математическое описание, представлено на рисунке 3.5. Далее рассмотрим каждую часть адаптивного алгоритма в качестве отдельных алгоритмов, выделяя то, что является результатом работы каждой из частей.

1 *Накопление и первичная проверка данных* (рисунок 3.6). Результатом работы данной части алгоритма является массив данных F_n о частоте вихреобразования или сообщение пользователю о внештатный режим работы расходомера.

2 *Вычисление статистики для принятия решения о режиме расхода* (рисунок 3.7). Результатом работы данной части алгоритма является заключение о режиме работа расходомера: установившийся режим, режим изменяющегося расхода, внештатный режим работы. В случае детектирования последнего режима выдается сообщение пользователю.

3 *Реализация одного из методов обработки данных и вычисление расхода* на основе информации о частоте вихреобразования (рисунок 3.8). Результатом работы является найденное значение действительной частоты вихреобразования и вычисленный расход с применением функции преобразования из главы 2.

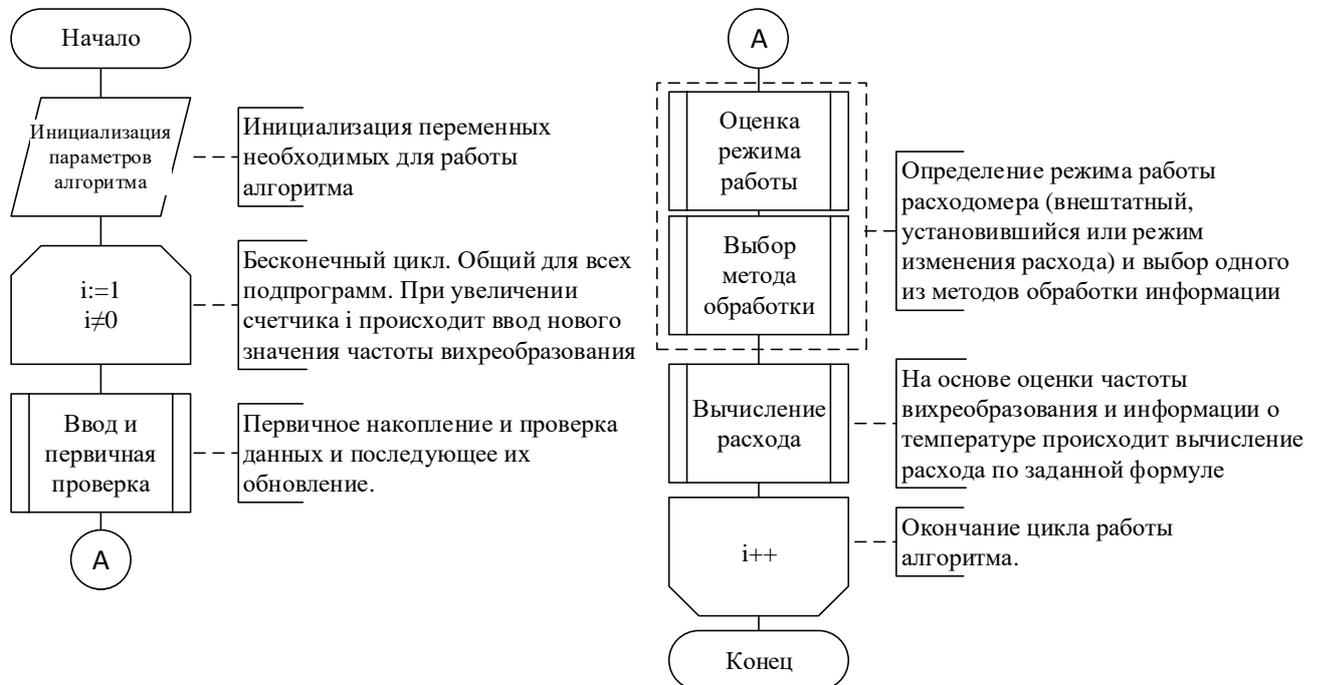


Рисунок 3.5 – Взаимодействие частей адаптивного алгоритм обработки информации о частоте вихреобразования

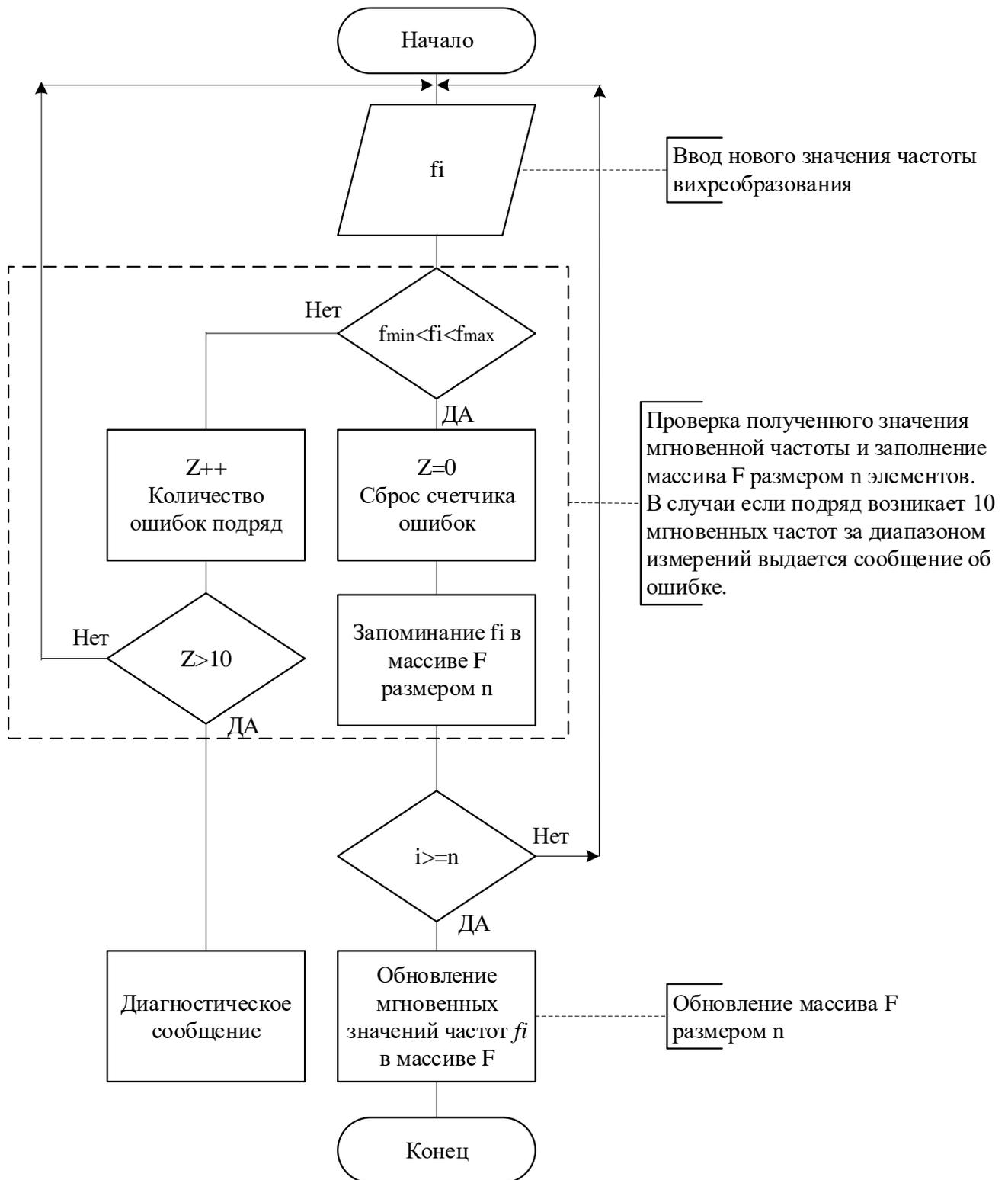


Рисунок 3.6 – Алгоритм ввода, накопления, обновления и первичной проверки информации о частоте вихреобразования.

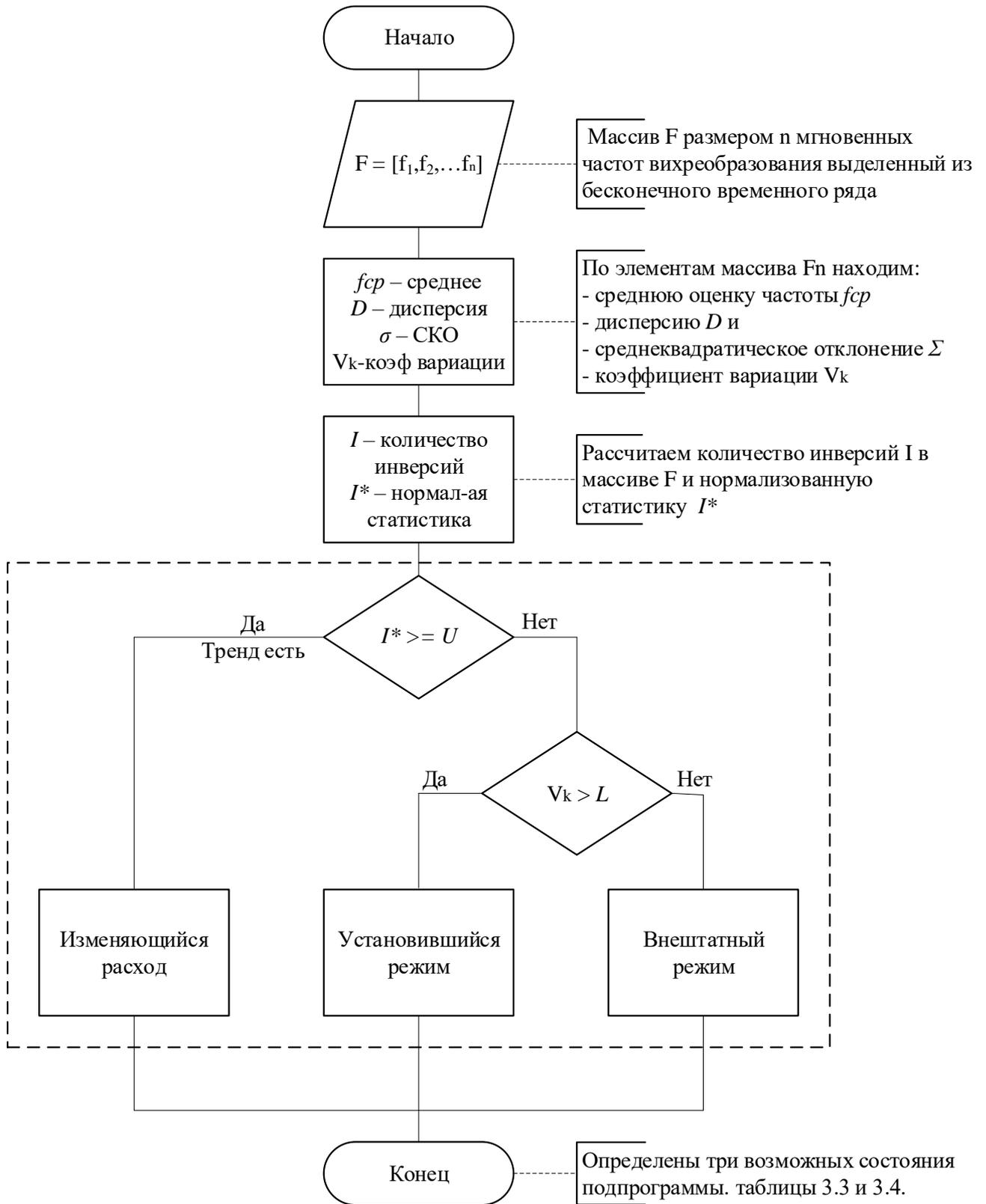


Рисунок 3.7 – Алгоритм принятия решений о режимах расхода (алгоритм адаптации)

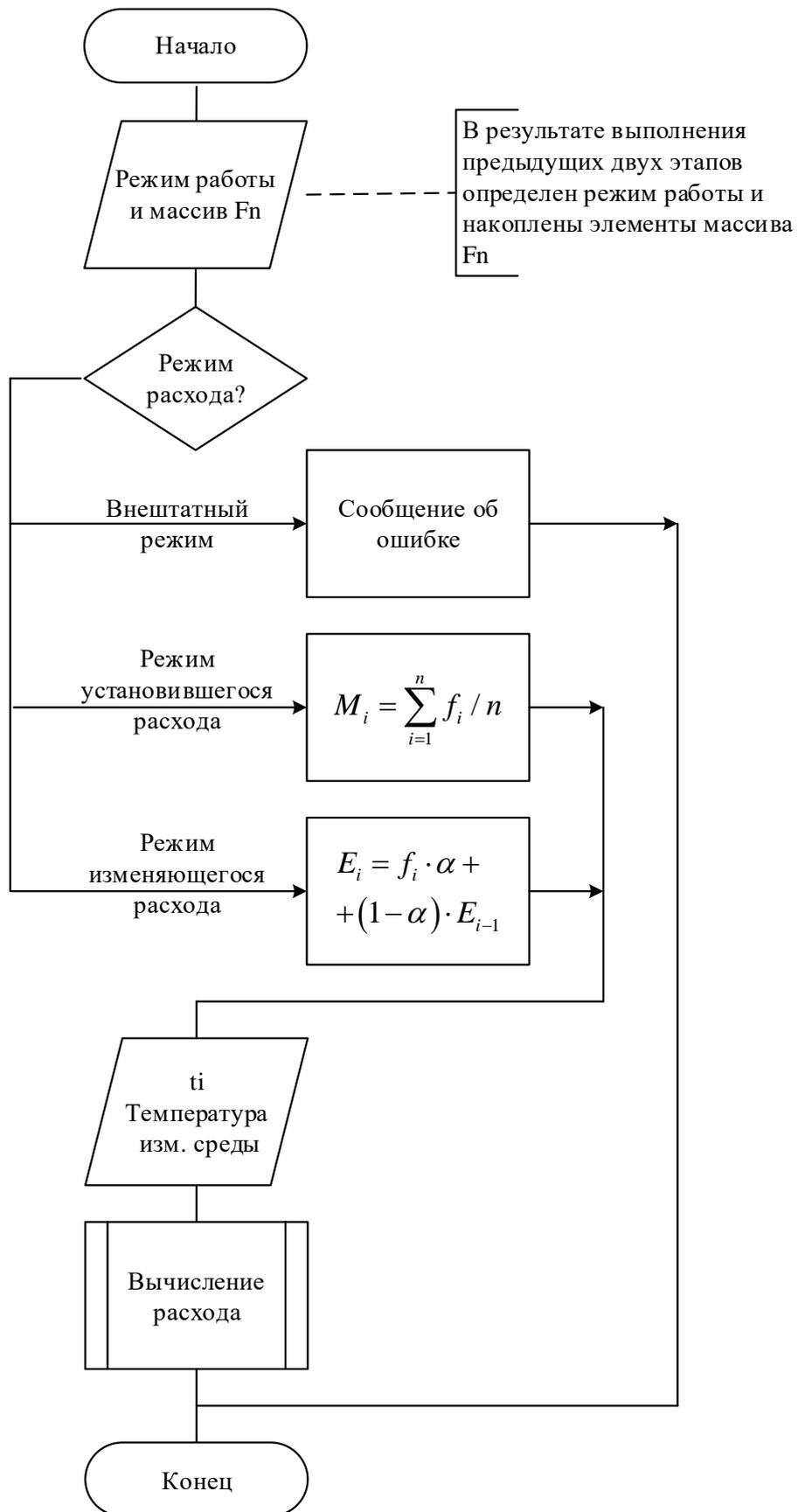


Рисунок 3.8 – Алгоритм получения оценки частоты вихреобразования и вычисление расхода.

3.3 Сравнение предложенного алгоритма с применяемыми в настоящее время

С целью сравнения составим имитационную модель работы расходомера (рисунок 3.9) и на ее основе проведем моделирование и качественное сравнение работы различных алгоритмов поиска оценки частоты вихреобразования, а также продемонстрируем, что предлагаемый алгоритм соответствует критериям, разработанным в разделе 3.1.



Рисунок 3.9 – Имитационная модель вихревого расходомера

Действительный расход Q_0 и характер его изменения определяется потоком среды через проточную часть, который формируется АСУ ТП. Зная расход Q_0 , возможно составить временной ряд F_0 мгновенных частот, используя обратную функцию преобразования $[f_1=q_1/K, \dots, f_i=q_i/K, \dots]$, где q_i – расход в момент времени i , K – коэффициент пропорциональности расхода и частоты вихреобразования.

Ввиду зависимости скорости поступления информации от расхода элементы f_i временного ряда F_0 будут располагаться по оси времени с периодичностью равной $1/f_i$. На элементы f_i может накладываться шум, вызванный как внешними по отношению к расходомеру, так и внутренними обстоятельствами. Далее, согласно имитационной модели, следует этап применения алгоритма получения оценки частоты вихреобразования f и вычисления измеренного расхода $Q_{изм} = K \cdot f$ на основании полученной оценки и коэффициента K . Критерием оценки качества работы алгоритма является погрешность измерения расхода.

Для реализации сравнения нескольких алгоритмов была разработана программа на языке Matlab, позволяющая имитировать работу вихреакустического расходомера различных ДУ.

С целью демонстрации работы алгоритма произведем моделирование импульсного изменения расхода. В качестве испытуемого расходомера выберем ДУ 50 (коэффициент $K=0.2$), расход будет изменяться от $0,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ ($2,5 \text{ Гц}$) до $4 \text{ м}^3/\text{ч}$ (20 Гц). На рисунке 3.10 показана динамика изменяющегося расхода и показания расходомера при применении 3-х различных алгоритмов: скользящего среднего, медианной оценки и разработанного адаптивного алгоритма.

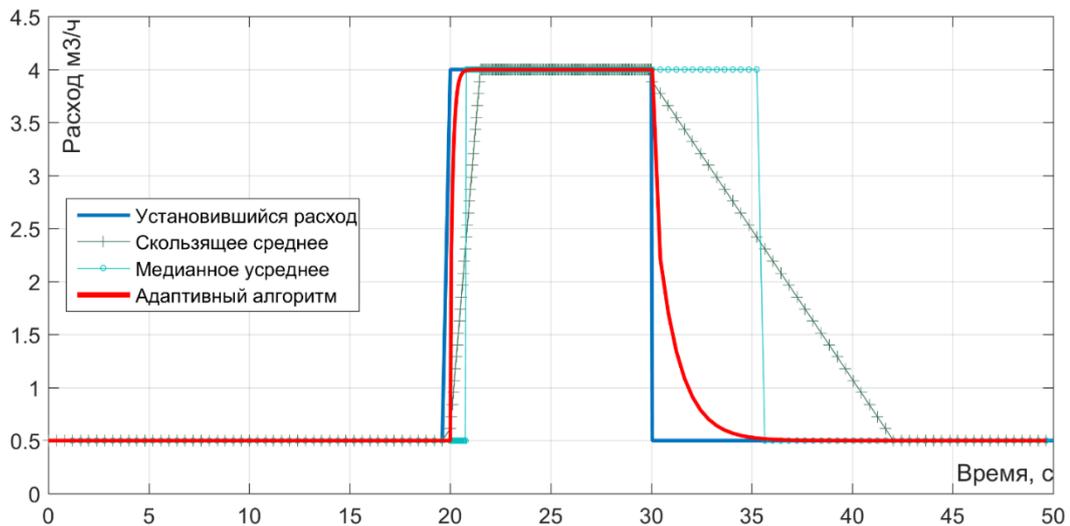


Рисунок 3.10 – Сравнение работы алгоритмов обработки информации о частоте вихреобразования на примере импульсного сигнала

Из рисунка выше наглядно видны причина возникновения погрешности измерения расхода и, как следствие, накопленного объема, а именно зависимость скорости поступления информации о частоте вихреобразования от расхода. Наглядно видна разница (штрихи на рисунке 3.10 соответствуют моментам поступления информации) в скорости изменения мгновенных расходов при возрастании и уменьшении расходов.

Стоит отметить, что в случае равномерности поступления информации вне зависимости от применяемого метода для описанной выше ситуации погрешность накопленного объема была бы равна нулю. По этой причине для других типов расходомеров (электромагнитных, ультразвуковых) успешно могут применяться простые разработанные методы обработки информации, поступающей с сенсора устройства.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

Рассмотрена функциональная схема тракта получения информации о частоте вихреобразования вихреакустического расходомера и примеры сигналов в каждой ее точке. Продемонстрирована зависимость скорости поступления информации о частоте вихреобразования от измеряемого расхода и показан недостаток работы традиционных алгоритмов при изменяющихся режимах расхода, приводящий к появлению погрешности измерения накопленного объема.

Разработан алгоритм адаптивной обработки информации о частоте вихреобразования, ключевой особенностью которого являются предложенный критерий определения режимов измерения расхода и комбинация двух методов обработки информации для установившегося и изменяющегося режимов расхода. За счет предложенного критерия и методов обработки данных разработанный алгоритм позволяет существенно сократить запаздывание реакции расходомера на изменение расхода, тем самым обеспечить меньшую погрешность измерения мгновенных расходов в любой момент времени и уменьшить погрешность накопленного объема.

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДЛОЖЕННЫХ АЛГОРИТМОВ И МЕТОДА ДЛЯ ВИХРЕАКУСТИЧЕСКИХ РАСХОДОМЕРОВ

Ранее в главе 2 было проведено планирование эксперимента, с целью получения данных для проверки модели функции преобразования и разработанного адаптивного алгоритма. На основе плана эксперимента необходимо провести сам эксперимент и описать структуру данных, полученных в ходе эксперимента.

На основе полученных экспериментальных данных будут продемонстрированы преимущества (указанные в разделе 2.4) предлагаемой модели функции преобразования на основе поэлементного анализа уравнения измерения (раздел 4.2) и предлагаемого адаптивного алгоритма обработки информации о частоте вихреобразования, путем сравнения его работы с другими широко распространёнными алгоритмами (раздел 4.3).

В диссертационной работе рассмотрены два ключевых аспекта алгоритмического обеспечения точности измерения вихреакустического расходомера (модели функции преобразования и адаптивный алгоритм обработки информации о частоте вихреобразования). Показано, что результат работы алгоритма обработки информации о частоте вихреобразования является входной величиной для функции преобразования. Рассмотренные составляющие дополняют друг друга и обеспечивают наличие в АСУ ТП точной информации о расходе в различных режимах работы расходомера (стабильный, изменяющийся расход или внештатный режим) в широком диапазоне условий работы (расходов и температур измеряемой среды). Для демонстрации этого необходимо поставить натуральный эксперимент (раздел 4.4).

4.1 Получение экспериментальных данных

4.1.1 Получение экспериментальных данных для модели функции преобразования

На основе плана эксперимента, описанного в раздел 2.1, разработана программа испытаний. Объект испытаний: 15 вихреакустических расходомеров (по 5 устройств 3-х типоразмеров ДУ 25, 32, 50). Каждый расходомер испытывался при 12 различных режимах расходов при 7-и различных температурах измеряемой среды.

В таблице 4.1 представлены режимы проведенных испытаний: расход ($\text{м}^3/\text{ч}$), минимальный объем измеряемой среды, протекающей за время эксперимента (л), и минимально необходимое давление в измерительной линии (МПа). Эксперимент проводился с помощью горячеводного стенда (приложение Б).

Таблица 4.1 – Режимы расходов при проведении испытаний

№	ДУ 25		ДУ 32		ДУ 50		Давление, МПа
	Расход, $\text{м}^3/\text{ч}$	Объем, л	Расход, $\text{м}^3/\text{ч}$	Объем, л	Расход, $\text{м}^3/\text{ч}$	Объем, л	
1	0,14	10	0,20	15	0,3	30	0,1±0,01
2	0,18	15	0,25	20	0,4	30	
3	0,3	30	0,4	30	0,6	40	
4	0,4	30	0,5	40	0,8	50	
5	0,6	40	0,8	50	1,25	70	0,15±0,01
6	1,0	50	1,3	70	2,0	100	
7	1,4	70	2,0	100	3,0	150	
8	1,8	100	3,0	150	4,0	200	0,2±0,01
9	2,4	150	4,0	200	6,0	300	
10	4,4	200	5,0	250	8,0	500	
11	5,5	250	10,0	500	15,0	750	
12	7,0	350	14,0	700	24,0	1200	

Примечания:

Минимальный объем выбран для обеспечения длительности каждого испытания не менее 60с.

Давление в измерительной линии выбрано на основе рекомендаций производителя с целью предотвращения возникновения кавитации за телом обтекания вихревого расходомера.

Гидравлическая часть установки представляет собой замкнутый контур, в состав которого входят: блок насосов, накопительная емкость, нагревательный элемент, запорная и регулирующая арматура, переключатель потока (дивертор) и весы, датчики давления (ДД) и датчики температуры (ДТ) рабочей жидкости.

Установка необходимого режима расхода (таблица 4.1) происходит при помощи насосов и регулировочных дросселей. В качестве эталонных средств

измерений в составе установки применяются электромагнитные преобразователи объемного расхода (расходомеры) и весовые окончания (дивертор + весы).

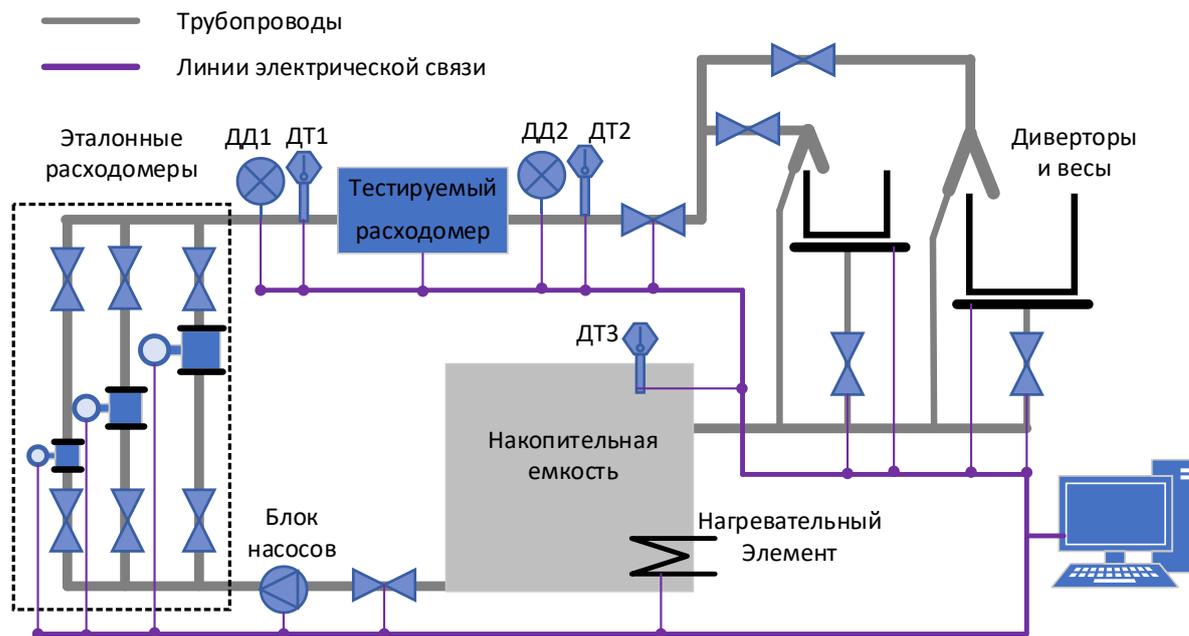


Рисунок 4.1 – Гидравлическая схема горячеводного стенда

Измерительно-вычислительное устройство установки состоит из блока управления переключателями потока и электронного блока. ИВУ установки позволяет вычислять значения расхода и объема воды, измеренные эталонными и поверяемыми средствами измерения, и определять погрешности поверяемых приборов. ИВУ функционирует в автоматическом режиме работы.

С тестируемого и эталонных расходомеров на ИВУ установки поступают импульсные сигналы. Установка обеспечивает синхронизацию начала и окончания измерения объема эталонным средством измерения с первым и последним импульсом преобразователя. В тот момент, как с испытуемого прибора пришло заданное количество импульсов, эталонный прибор останавливает счет объема жидкости прошедшего через него. На основе сравнения показаний, измеренных объемов эталонного и поверяемых приборов, происходит вычисление погрешности измерения испытуемого расходомера.

В результате выполнения программы испытаний для каждого расходомера были получены массивы данных, содержащие: эталонный объем $V_{эм}$, объем измеренный испытуемым расходомером $V_{изм}$, эталонный расход $Q_{эм}$, температуру измеряемой жидкости t .

На основе полученных данных, исходя из равенства погрешностей измерений объема $\delta_V = \delta_Q$ (4.1) и применяемой функции преобразования во время эксперимента, были вычислены: средний измеренный расход $Q_{изм}$ (4.2) и средняя частота f (4.3). В качестве функции преобразования для данного эксперимента была применена линейная функция $Q(f)=k_1 \cdot f+k_2$, где k_1 и k_2 – коэффициенты функции преобразования, определенные при производстве (калибровке) расходомера.

$$\delta_V = \frac{V_{изм}-V_{эм}}{V_{эм}} \cdot 100\% = \delta_Q = \frac{Q_{изм}-Q_{эм}}{Q_{эм}} \cdot 100\%. \quad (4.1)$$

$$Q_{изм} = \delta_Q \cdot Q_{эм} + Q_{эм} = Q_{эм}(1 + \delta_Q) = Q_{эм}(1 + \delta_V) \quad . \quad (4.2)$$

$$f = (Q_{изм} - k_2)/k_1 \quad (4.3)$$

Конструкционные особенности в виде номинального размера диаметра проточной части D , характерной ширины тела обтекания d и коэффициента линейного расширения материала проточной части и тела обтекания θ , взяты из конструкторской документации на исследуемые расходомеры и сведены в таблицу 4.2. Для последующего анализа в таблицу включено соотношение ширины тела обтекания к диаметру проточной части d/D .

Таблица 4.2 – Конструкционные особенности испытываемых расходомеров

Параметр	ДУ 25	ДУ 32	ДУ 50
D , м	0.020	0.026	0.04
d , м	0.0054	0.007	0.0105
θ , °С ⁻¹	16 *10-6	16 *10-6	16 *10-6
d/D	0,2700	0,2690	0,2625

Кроме того, для поиска коэффициентов модели ФП, предложенной в главе 2, необходимо вычислить кинематическую вязкость, число Струхала и число Рошко, по формулам (4.4 - 4.6).

$$\mu(t) = 1,78 \cdot 10^{-6} / (1 + 0.0337 \cdot t + 0.000221 \cdot t^2) \quad (4.4)$$

$$St = (f \cdot d(t))/v = (f \cdot d(t))/(Q_{эм}/(0,25\pi \cdot D(t)^2)) \cdot \quad (4.5)$$

$$Ro = (f \cdot d(t)^2)/\mu(t) \quad (4.6)$$

Обозначения, используемые в этих формулах, а также величины, полученные или рассчитанные в результате эксперимента, сведены в таблицу 4.3.

Каждый расходомер был испытан на 84 режимах (7 выбранных температур измеряемой среды, 12 режимов расхода измеряемой среды). Таким образом, для каждого испытанного расходомера был получен массив данных из 1008 элементов (84 значения для каждой из 12 представленной в таблице 4.3 величины).

Таблица 4.3 – Величины, использованные при проведении эксперимента

Обозначение, единицы измерения	Физический смысл и <u>особенности обработки данных</u>
Величины, измеренные непосредственно во время эксперимента	
$t, ^\circ\text{C}$	Температура измеримой среды во время испытания, вычисляется как среднее значение измерений за время проведения 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	
$D(t), \text{м}$	Диаметра проточной части. Номинальное значение получено из конструкторской документации. Для каждой температуры измеряемой среды размер вычисляется с учетом поправки на линейное расширение материала проточной части
$d(t), \text{м}$	Характерный размер тела обтекания. Номинальное значение получено из конструкторской документации. Для каждой температуры измеряемой среды размер 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. Определяется согласно формуле 4.2
$f, \text{Гц}$	Средняя частота вихреобразования испытуемого расходомера. Рассчитывается на основе $Q_{изм}$ и знаний об используемой функции преобразования (формула 4.3)
$\mu(t), \text{Па}\cdot\text{с}$	Кинематическая вязкость воды (измеряемой среды). Вычисляется для каждой температуры измеряемой среды
St	Число Струхала. Безразмерная величина рассчитывается на основании формулы 4.4
Ro	Число Рошко. Безразмерная величина рассчитывается на основании формулы 4.5

4.1.2 Получение экспериментальных данных для алгоритма обработки информации о частоте вихреобразования

В главе 2 было выдвинуто требование контроля сигнала с фазового детектора с целью диагностирования устойчивости работы расходомера. Для реализации этого требования использовалась схема, приведенная на рисунок 4.1.

Модуль ввода-вывода, подключенный к ПК, использовался для визуального контроля сигнала. Численные значения мгновенных частот были получены путем считывания данных, используя протокол Modbus. Так как минимальное время испытания 60 с, а периодичность опроса установлена 100 мс, то за каждый запуск было получено не менее 600 отсчетов. Мгновенные значения с эталонных расходомеров также регистрировались и сохранялись в ПК.

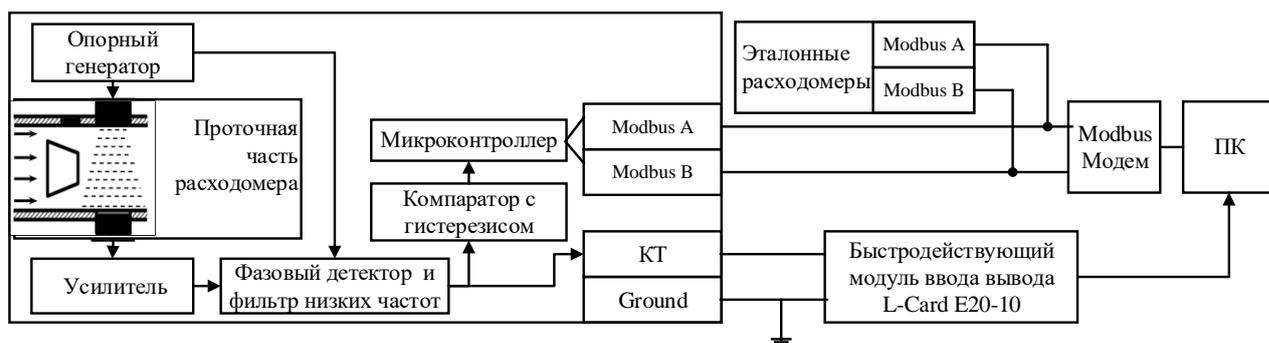


Рисунок 4.2 – Схема соединений для регистрации информации о мгновенных частотах при проведении эксперимента

В результате проведенного эксперимента были получены массивы данных о мгновенных частотах вихреобразования и мгновенных расходах эталонного расходомера для каждого из режимов, указанных в таблице 4.1.

1. Полученные данные о мгновенных частотах вихреобразования и мгновенных расходах были подвергнуты проверке на отклонение распределения вероятностей от нормального закона распределения с помощью критерия Эппса-Палли. Алгоритм расчета критической статистики критерия описан в ГОСТ Р ИСО 5479-2002. Согласно критерия, был проведен расчёт и показано, что распределения мгновенных частот и мгновенных расходов не противоречат нормальному распределению вероятностей при уровне значимости $\alpha=0,05$ (приложение Г).

2. С целью обнаружения промахов в массиве мгновенных частот использовался метод, описанный в [1]. Предпосылкой применения данного критерия является непротиворечие исследуемых выборок нормальному закону распределения. Было установлено, что в выборках мгновенных частот присутствовали промахи, однако их менее 0,5% (приложение Г).

3. С целью исследования стабильности частоты вихреобразования в диапазоне измеряемых расходов проведен расчёт коэффициента вариации V_k для

полученных данных о мгновенной частоте вихреобразования и мгновенных расходов с эталонных расходомеров (4.7), где x_i – значение мгновенных значений в выборке, n – количество элементов в выборке, \bar{x} – среднее значение выборки.

$$V_k = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 / \bar{x}} \cdot 100\%, \quad (4.7)$$

На рисунке 4.3 показаны зависимости коэффициента вариации мгновенных значений эталонного расхода и коэффициента вариации мгновенных значений вихреобразования испытуемых расходомеров в диапазоне измеряемых расходов.

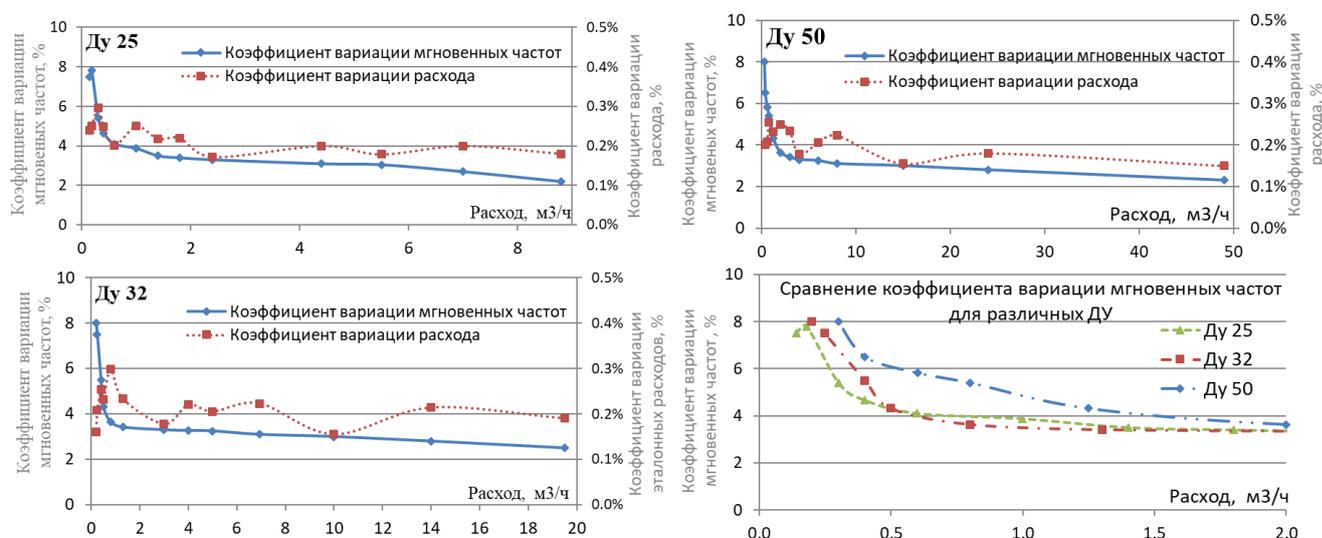


Рисунок 4.3 – Зависимость коэффициента вариации от величины расхода

Согласно рисунка 4.3 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. Таким образом, можно говорить о независимости стабильности воспроизведения эталонного расхода и коэффициента вариации мгновенных частот вихреобразования.

Результаты исследования стабильности частоты вихреобразования (коэффициента вариации) в диапазоне измерения исследуемых расходомеров хорошо соотносятся с результатами полученными для других вихревых расходомеров [77]. 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.

4.2 Демонстрация возможностей предложенной модели функции преобразования

Покажем, что предложенная модель функции преобразования ведет к повышению точности измерения на малых расходах в широком диапазоне температур измеряемой среды и расширению диапазона измерений расходомера.

В исследованиях участвовали 15 расходомеров (по 5 расходомеров 3-х различных ДУ). На рисунках ниже приведены результаты работы классической и предложенной модели функции преобразования на примере расходомера ДУ 32. Результаты остальных экспериментов схожи и представлены в приложении Д.

На основе экспериментальных данных (полученных в разделе 4.1.1) показан результат использования простой модели функции преобразования не учитывающей зависимость объемного расхода от температуры измеряемой среды $Q(f)=k_1 \cdot f+k_2$ (рисунок 4.4), что отражает классический подход к ФП вихревого расходомера [67, 25]. Коэффициенты этой функции преобразования для вышеупомянутого расходомера определены на этапе калибровки при нормальных климатических условиях и составляют $k_1=0,0548$, $k_2=-0,0433$.

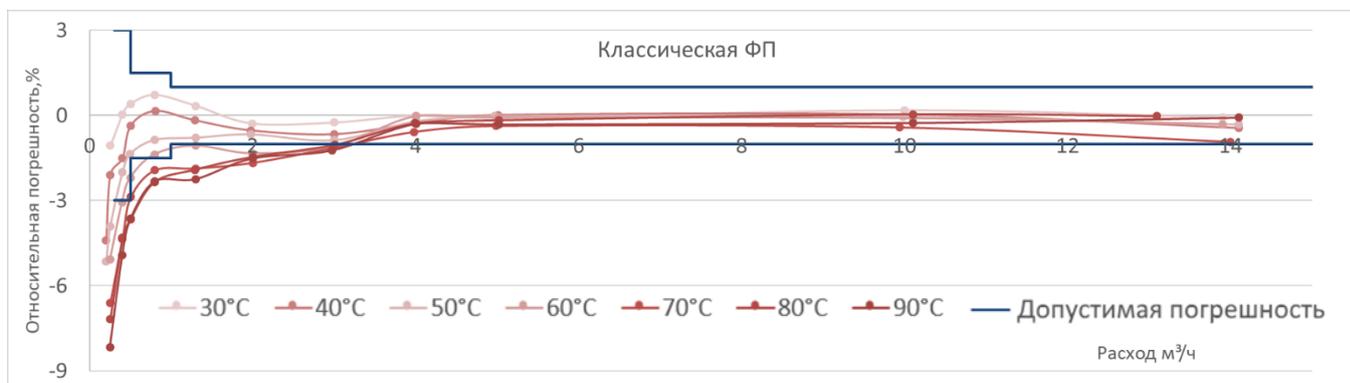


Рисунок 4.4 – Погрешность измерения расходомера Ду 32 №...9419 при использовании классической модели ФП

График на рисунке 4.4 демонстрирует недостаток классической модели функции преобразования, описанный в главе 2, а именно: малая точность измерения в области малых расходов (для данного ДУ менее 2 м³/ч). В области средних и больших расходов функция обеспечивает необходимую точность в исследованном диапазоне температур.

Для сравнения предлагаемой модели ФП с классической на основе того же массива экспериментальных данных, значимыми из которых являются температура измеряемой среды t , эталонный расход $Q_{эм}$, частота вихреобразования f испытуемого расходомера и конструкционные данные испытуемого типа расходомера (таблица 4.3), были вычислены массивы чисел Струхаля (St) и Рошко (Ro). На основе полученных массивов были определены коэффициенты предлагаемой модели ФП (a и b).

Следует отметить, что для нахождения значений этих коэффициентов требуются только данные полученные при одном значении температуры измеряемой среды (в расчете использовалось $30\text{ }^{\circ}\text{C}$), что соответствует стандартному подходу к калибровке расходомера при одном значении температуры измеряемой среды. Данные для остальных значений температур использовались лишь для верификации предложенной модели.

Зная коэффициенты a и b модели ФП и используя формулы 4.8-4.11 для каждого значения пары температуры измеряемой среды t и частоты вихреобразования f , были вычислены расход и относительная погрешность

$$D'(t) = D \cdot \alpha \cdot (t - t_{норм}) \quad (4.8)$$

$$d'(t) = d \cdot \alpha \cdot (t - t_{норм}) \quad (4.9)$$

$$\mu(t) = \frac{1,78 \cdot 10^{-6}}{1 + 0,0337 \cdot t + 0,000221 \cdot t^2} \quad (4.10)$$

$$Q(f, t) = \pi \cdot \frac{D'(t)^2}{4} \cdot d'(t) \cdot \frac{1}{a + \frac{b}{f \cdot d^2 / \mu(t)}} \cdot f \quad (4.11)$$

Результаты представлены на рисунке 4.5 (значения коэффициентов: $a = 0,2472$ и $b = 11,19$). Из рисунка видно, что погрешности во всем диапазоне измеряемых расходов и исследованных температур находятся в пределах $\pm 1\%$, причем в диапазоне малых расходов вплоть до порядка точнее, чем обеспечивает классическая модель.

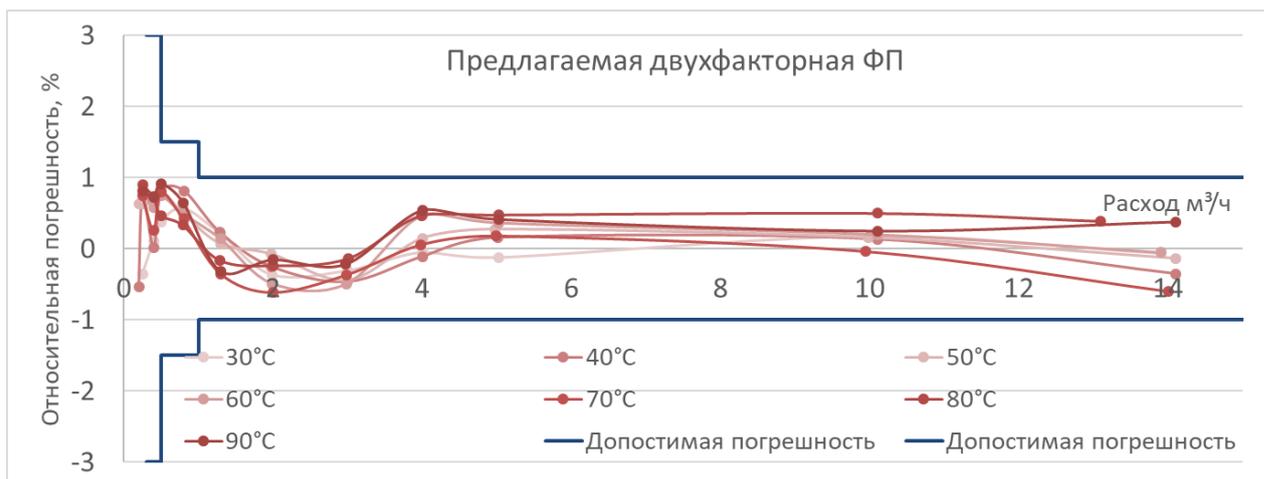


Рисунок 4.5 - Погрешность измерения расходомера Ду 32 №...9419 при использовании функции полученной методом анализа уравнения измерения

Таким образом, из сравнения результатов работы предлагаемой и классической модели ФП видно, что комплексный учет фактора температуры (влияние на физические размеры проточной части (4.8) и тела обтекания (4.9), изменение кинематической вязкости жидкости (4.10)), а также предложенное описание поведения числа Струхала в широком диапазоне расходов и температур измеряемой среды, позволяет повысить точность измерения расходомера в области малых расходов и расширить диапазон измерения.

Помимо модели, полученной на основе анализа уравнения измерения, разработан алгоритм, основанный на регрессионном анализе, имеющий ограничения по применению (раздел 2.2), однако, позволяющий добиться схожих результатов по обеспечению погрешности измерения, не превышающей 1 % во всем диапазоне изменения. Данный алгоритм был назван алгоритмом всех возможных регрессий с предложенным показателем сложности модели. На основе вышеупомянутого метода для расходомеров Ду 32 была выбрана модель функции преобразования (4.12), позволяющая обеспечить повышение точности измерения расходомера на малом расходе (рисунок 4.6).

$$Q(f, t) = b_0 + b_1 \cdot f + b_2 \cdot f^2 + b_5 \cdot t \cdot f + b_7 \cdot t \cdot f^3 + b_9 \cdot t^2 \cdot f \quad (4.12)$$

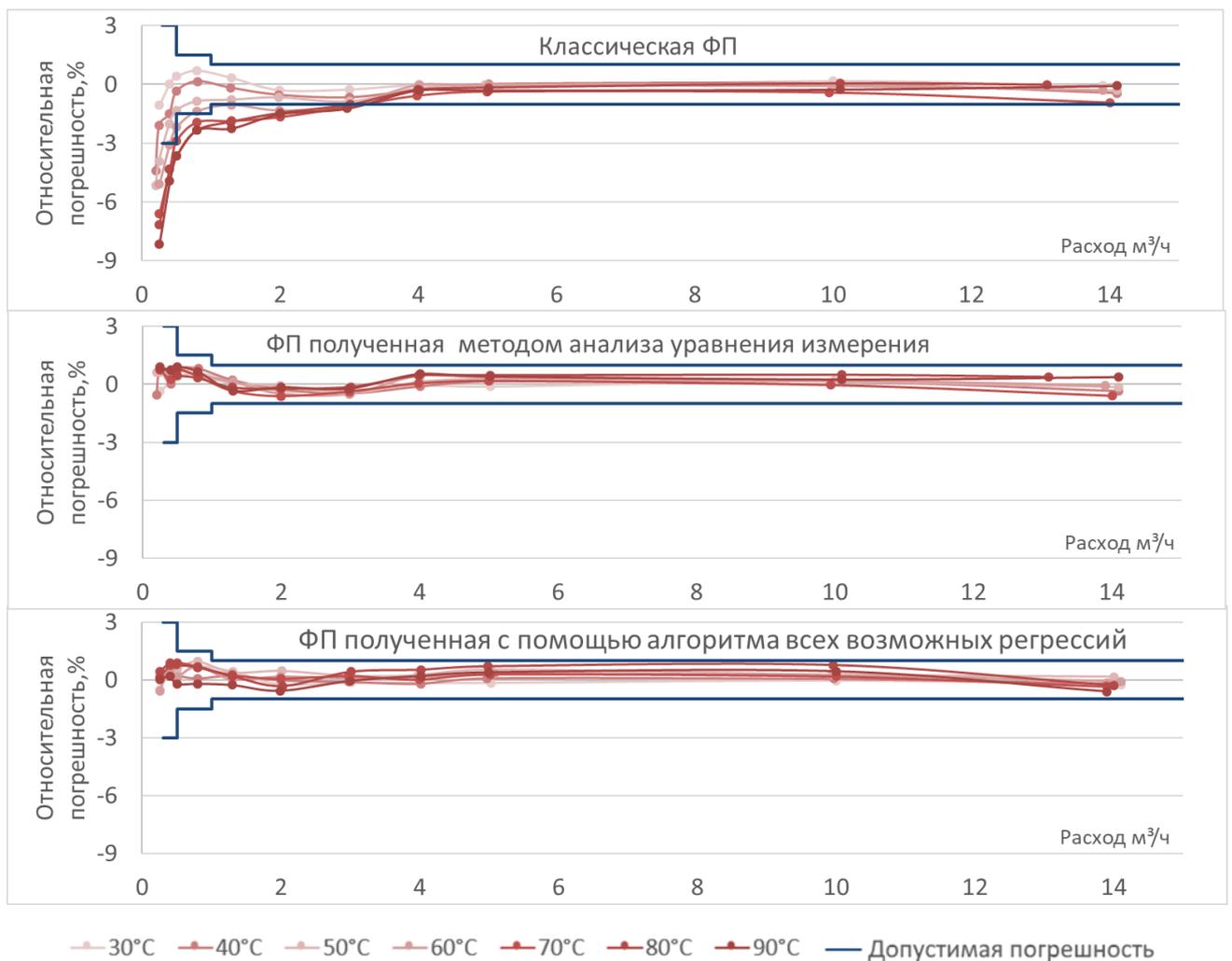


Рисунок 4.6 – Сравнение функций преобразования

На рисунке 4.6 для сравнения изображены результаты применения трех моделей функций преобразования в одинаковом масштабе. Из рисунка видно, что оба предложенных метода позволяют добиться цели, поставленной в диссертационной работе, а именно: повышение точности измерения вихреакустических расходомеров на малых расходах.

Граница расширенного диапазона измерений определяется допустимым уровнем относительной погрешности измерения расхода (накопленного объема) в конкретной АСУ ТП. На рисунке 4.7 показано наложение результатов работы предложенной функции преобразования в области малых расходов и границ допустимых погрешностей измерения расхода типичного представителя вихреакустического расходомера (см. обзор рынка расходомеров, таблица 1.5).

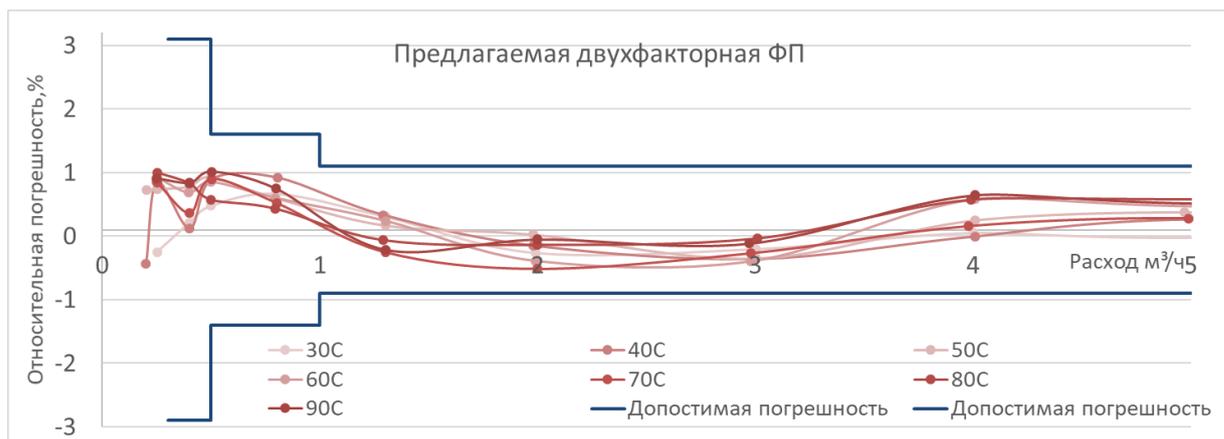


Рисунок 4.7 – Погрешность расходомера Ду 32 №...9419 при использовании функции полученной методом анализа уравнения измерения по сравнению с нормируемой допустимой границей относительной погрешности существующих расходомеров.

Рисунок 4.7 демонстрирует, что при наличии со стороны АСУ ТП требования не превышения уровня погрешности 1 – 1,5% диапазон использования расходомера с предлагаемой ФП может быть увеличен вплоть до его полного диапазона измерений, что особенно важно при использовании расходомера в импульсном режиме, то есть при многократном переключении расходомера от технологически необходимого расхода до нуля. [37, 51]

Графики сравнения погрешностей (в одинаковых масштабах) для остальных испытанных расходомеров 3-х различных ДУ (25, 32, 50) приведены в приложении Д.

Следует отметить, что модель функции преобразования, полученная методом анализа уравнения измерения, состоит из двух составляющих:

- зависимые от температуры измеряемой среды (диаметр проточной части $D'(t)$, характерный размер тела обтекания $d'(t)$ и кинематическая вязкость измеряемой среды $\nu(t)$). Физика этих зависимостей хорошо исследована и не зависит от геометрических размеров расходомера;

- зависимые от влияния геометрических размеров проточной части и тела обтекания конкретного расходомера (коэффициенты a и b).

Экспериментальным доказательством разделения является то, что применение коэффициентов a и b , вычисленных по результатам испытаний при

30°C измеряемой среды, позволило обеспечить высокую точность на всем диапазоне измерений при температурах от 30°C до 90°C (приложение Д).

Иными словами, при использовании предлагаемой ФП для различных типоразмеров сохраняются одинаковые температурные зависимости, тогда как варьируются только коэффициенты a и b модели.

Таким образом, реализуется еще одно преимущество предлагаемой модели функции преобразования – **масштабируемость**, т.е. возможность ее применения для других типоразмеров вихреакустических расходомеров. Это особенно важно для испытаний расходомеров больших диаметров, поскольку проведение испытаний при различных температурах измеряемой среды требуют большого количества времени и соответствующей материальной базы. Например, использованный горячеводный стенд (приложение Б) ограничен возможностью испытывать расходомеры размером более ДУ50, а стенды, позволяющие проводить подобные исследования для расходомеров свыше ДУ100, являются уникальными и очень редкими. Обзор литературы позволил выявить лишь одну установку в Германии [99].

Полученные экспериментальные данные подтверждают, что при соблюдении подобия геометрических размеров проточной части для различных типоразмеров значения коэффициентов модели (a и b) близки друг к другу, и среднее значение коэффициента a зависит от параметра d/D . Сами отклонения коэффициентов обусловлены отклонениями от номинального размера тела обтекания и диаметра проточной части, что хорошо коррелируется с работой [71], описывающей поведение числа Струхала в зависимости от d/D .

В таблице 4.4 приведены значения коэффициентов предлагаемой модели для 3-х исследуемых ДУ, а на рисунке 4.8. нанесены индивидуальные значения коэффициента a для каждого исследованного расходомера, среднее значение коэффициента a внутри каждого ДУ и значение d/D для каждого типа ДУ.

Таблица 4.4 – Значение коэффициентов предлагаемой модели для исследованных расходомеров

Ду	Серийный номер	Коэффициент a	Коэффициент b
25	3009414	0.2475	11.000
	3009415	0.2475	10.799
	3009416	0.2492	10.275
	3009417	0.2465	10.053
	3009418	0.2470	11.275
32	3009419	0.2472	11.192
	3009420	0.2470	10.700
	3009421	0.2476	10.911
	3009422	0.2458	10.821
	3009423	0.2460	11.669
50	3009424	0.2366	11.554
	3009425	0.2387	11.001
	3009426	0.2385	10.629
	3009427	0.2365	10.372
	3009428	0.2393	10.110

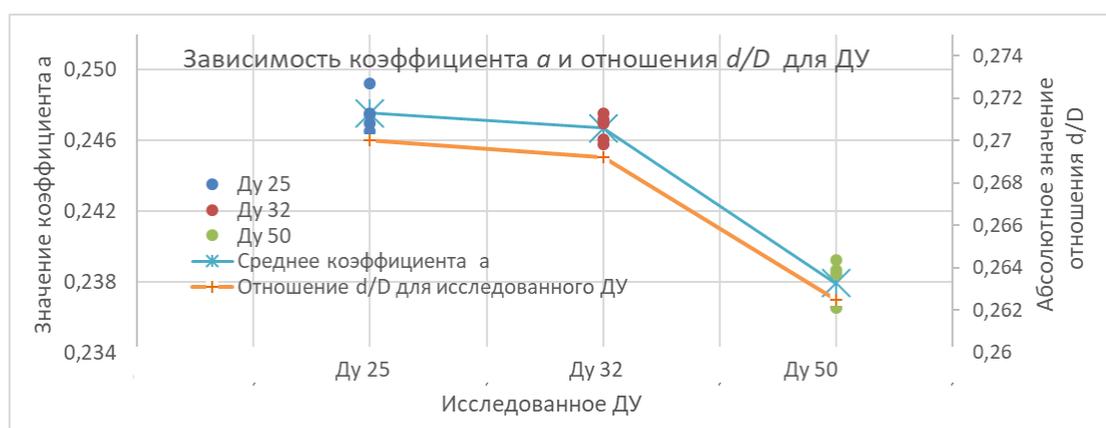


Рисунок 4.8 – Зависимость коэффициента a от конструкции расходомера

Как видно из рисунка 4.8, существует наглядная корреляция между значениями коэффициента a и отношением диаметра проточной части и характерного размера тела обтекания d/D .

Практическая ценность предложенной ФП для производства и поверки расходомеров заключается в том, что, как было показано выше, предложенная ФП не требует горячеводных испытаний и, в дополнение к этому, при стандартных условиях калибровки (комнатная температура измеряемой среды) позволяет сократить количество испытываемых точек (режимов расхода).

Согласно методикам поверки и эксплуатационной документации [17, 16, 56], стандартные испытания расходомера при производстве и поверке

предполагают проведение испытаний расходомера при различных значениях расхода (от 5-и до 7-и режимов расхода).

Предлагаемая модель имеет всего два коэффициента, и для их определения необходимо и достаточно проведения испытаний всего при двух режимах расхода.

Работоспособность данного подхода проверена экспериментом, в ходе которого из одного и того же набора данных (полученного при 12-и различных расходах) вычислялись (с помощью МНК) значения коэффициентов a и b предлагаемой модели ФП на основании усеченного количества точек (5 и менее, при этом данные полученные при наименьшем и наибольшем расходе включались всегда). Далее рассчитывалась неисключенная погрешность для всех 12 режимов. Результаты представлены на рисунке 4.9. Из графиков видно, что изменение погрешности происходит в диапазоне не больше, чем на 0,3%.

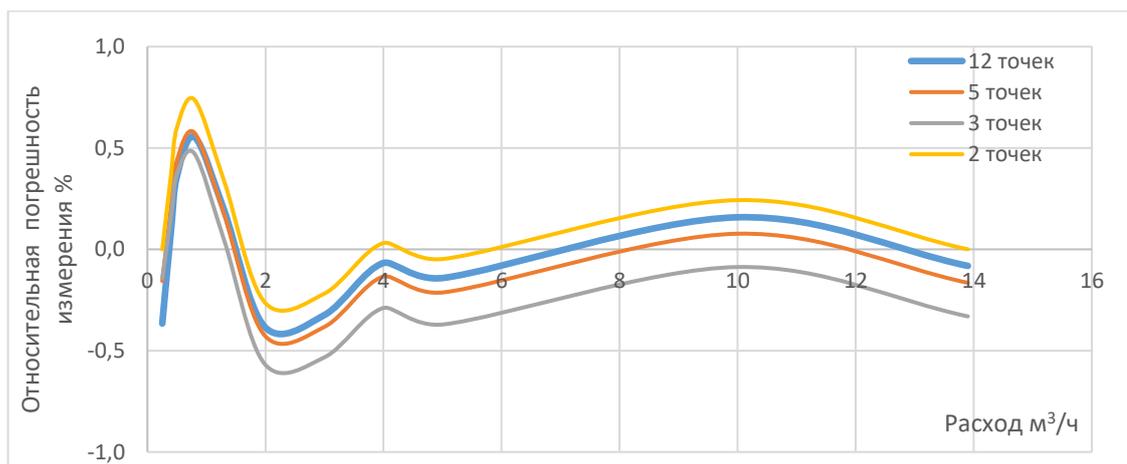


Рисунок 4.9 – Изменение неисключённой погрешности при использовании различного количества точек для поиска коэффициентов a и b .

Таким образом, продемонстрирована фактическая возможность расчета значений коэффициентов предлагаемой функции преобразования по результатам испытаний двух режимов расхода и показано, что для конкретного датчика при этом погрешность не превышает 0,3%. Однако, вопрос выбора расположения точек (режимов работ) не входил в задачу данной диссертационной работы.

4.3 Сравнение работы алгоритмов обработки информации о частоте вихреобразования

Ключевой особенностью вихревых расходомеров при обработке информации о мгновенных частотах вихреобразования является зависимость времени поступления информации от измеряемого расхода (от частоты вихреобразования за телом обтекания).

В разделе 3.1 были сформулированы требования к алгоритму. Алгоритм должен быть адаптивным к:

- наличию зависимости между скоростью поступления информации и измеряемым расходом;
- быстрому изменению режимов расхода (стабильный, изменяющийся);
- работе в широком диапазоне частот (от десятых долей герц, до сотен герц).

На основании проведенного эксперимента установлено, что для временного ряда мгновенных частоты характерно:

- нормальное распределение значений при стабильности измеряемого расхода;
- изменяющийся уровень стабильности (коэффициент вариации) в зависимости от измеряемого расхода;
- присутствие единичных промахов.

Для оценки работоспособности предлагаемого адаптивного алгоритма, а также для сравнения его с другими алгоритмами, необходима разработка программы, позволяющая реализовать моделирование:

- временных рядов мгновенных частот вихреобразования характерных для вихревых расходомеров;
- нестабильности мгновенных частот вихреобразования (коэффициента вариации);
- исключаящее влияние погрешности преобразования частоты в расход.

Для разработки программы была составлена имитационная модель, позволяющая моделировать временной ряд мгновенных частот и производить его обработку с применением различных алгоритмов (рисунок 4.10).



Рисунок 4.10 – Имитационная модель обработки информации о частоте вихреобразования в вихревом расходомере

На вход модели подаются моделируемые значения эталонного расхода Q_d и характер изменения его во времени. С помощью линейной зависимости $F_d = Q_d/K$, где F_d – массив мгновенных частот, K – коэффициент пропорциональности, находятся мгновенные значения частот вихреобразования в любой момент времени. В зависимости от заданного расхода в любой момент времени и моделируемого ДУ расходомера к полученным значениям вихреобразования подмешивается шум характерный для заданного расхода. На выходе сумматора получаем временной ряд мгновенных частот с заданным коэффициентом вариации и массив времени моментов появления отсчетов мгновенных частот в зависимости от их значения. Таким образом, реализуется характерная зависимость временного ряда мгновенных частот вихревого расходомера от измеряемого расхода.

Влияние функции преобразования на результат работы имитационной модели исключается путем применения при преобразовании входного значения расхода во временной ряд мгновенных частот и при преобразовании оценки частоты вихреобразования одного и того же коэффициента пропорциональности расхода K .

На выходе разработанной модели выдается оценка качества функционирования примененного алгоритма, выраженная в виде погрешности измерения мгновенных расходов и накопленного объема за заданное время.

На основе имитационной модели была разработана программа в среде Matlab, позволяющая реализовать моделирование временного ряда мгновенных частот, имитирующего поведение вихревого расходомера и применение к данному ряду предложенного автором адаптивного алгоритма и других широко распространённых алгоритмов.

Поскольку важной задачей при работе с временными рядами является выделение информационной составляющей из зашумлённого сигнала, то возникает вопрос выбора алгоритмов для сравнения с разработанным адаптивным алгоритмом. Наиболее распространёнными алгоритмами для решения этой задачи являются алгоритмы скользящего среднего и скользящей медианы [12, 57, 64].

Для проверки реализации выдвинутых критериев адаптивности разработанного алгоритма было проведено сравнение предложенного алгоритма с алгоритмами, основанными на скользящем среднем и медианном усреднении.

Выбор входного значения эталонного расхода и характера его изменения во времени был произведён на основе ряда предпосылок:

1. Как отмечалось в главе 1, в настоящее время АСУ ТП стремятся к работе в импульсном режиме, то есть в работе имеет место переключение состояний из наименее затратного (минимум расхода) в рабочий режим. С целью моделирования длительность участков с постоянным расходом выбраны равными 20 секунд.

2. Характер изменения расхода зависит от используемого оборудования, режимов и алгоритмов управления АСУ ТП. С целью моделирования выбрано линейное изменение расходов. Время изменения расхода выбрано 5 секунд, что соизмеримо с длительностью изменения расхода на расходомерной установке УПСЖ15-50.

В качестве объекта для испытания в программе имитируем поведение расходомера Ду32 с идеальной калибровкой (нулевая погрешность, вносимая функцией преобразования), $Q = K \cdot f$, где $K=0,054$, а диапазон измерения расходомера составляет от $0,25 \text{ м}^3/\text{ч}$ до $20 \text{ м}^3/\text{ч}$, следовательно, мгновенные частоты варьируются от 4,5 до 370 Гц.

Итак, в качестве воздействия на имитационную модель был выбран режим изменения расхода, который изображен на рисунке 4.11. Он состоит из трех участков с постоянным расходом и двух участков изменения расхода. Примером функционирования расходомера в подобном режиме может быть тепловыделитель многоквартирного дома.

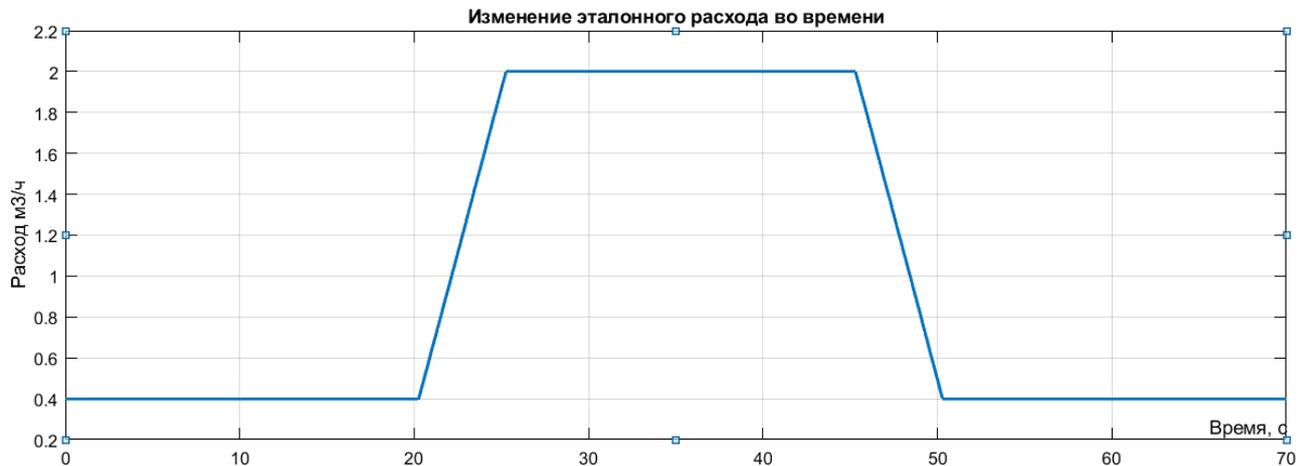


Рисунок 4.11 – Эталонный расход, поданный на вход имитационной модели в ходе эксперимента

Параметры испытываемых алгоритмов. Для трех испытываемых алгоритмов было задано окно усреднения 61 отсчет, при этом для разработанного адаптивного алгоритма дополнительно требуется задание двух параметров:

1. Порог срабатывания L при изменении коэффициента вариации. Он используется для принятия решения об изменении расхода. Задан равным 10%, так как коэффициент вариации исследованных расходомеров не превышал эту величину (рисунок 4.3);

2. Коэффициент экспоненциального сглаживания. Задан равным 0,1 с целью получения сглаженного (ровного, без скачков) значения мгновенного расхода на выходе расходомера. Обычно в инженерных задачах коэффициент сглаживания выбирается от 0,1 до 0,3 [24, 48].

На рисунке 4.12. представлены результаты проведенного эксперимента.

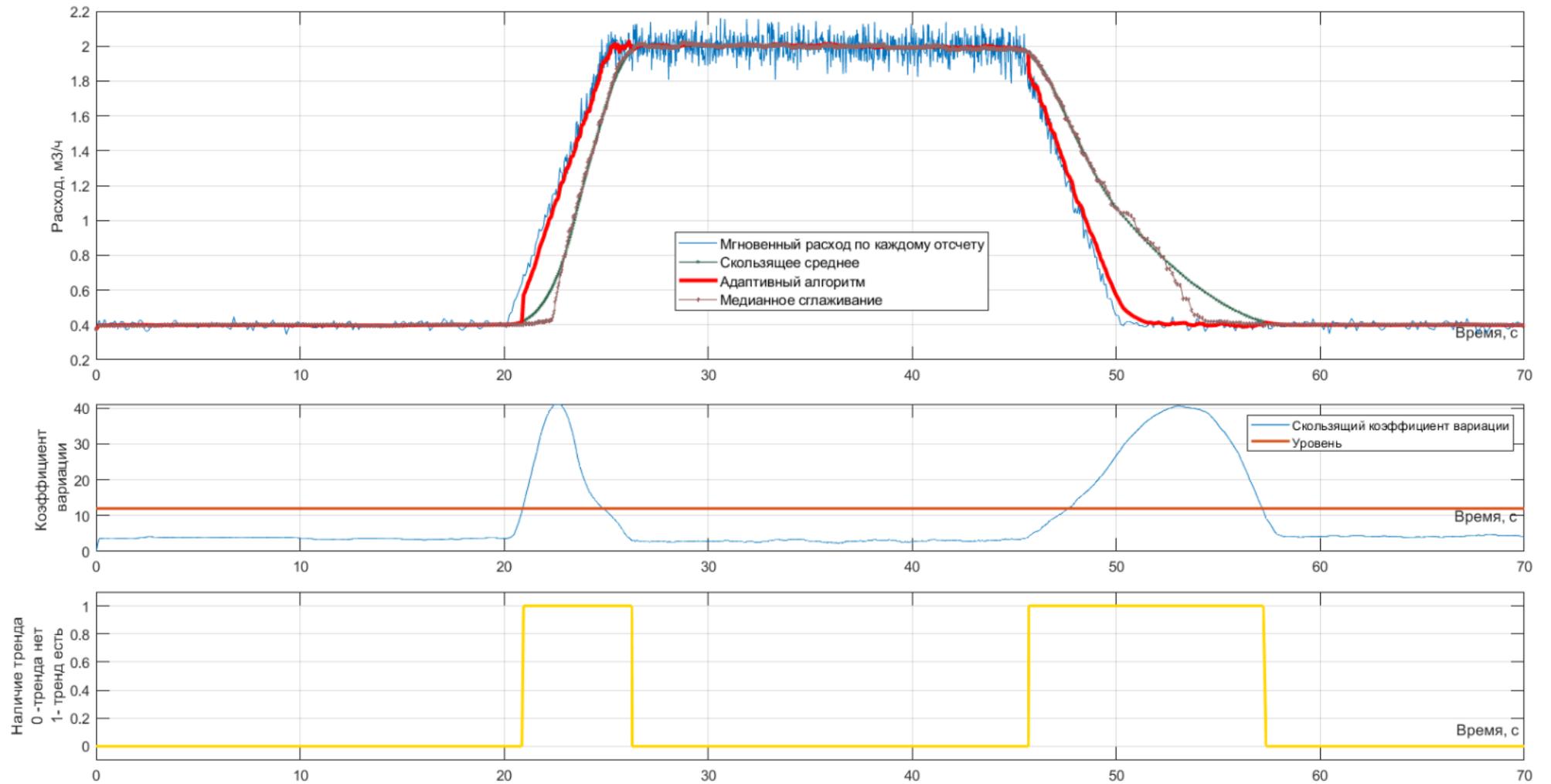


Рисунок 4.12 – Сравнение работы трех алгоритмов и особенности обработки информации о частоте вихреобразования адаптивным алгоритмом

Несмотря на стабильные значения подаваемого расхода (рисунок 4.11) мгновенные значения частот вихреобразования, сформированные имитационной моделью на выходе сумматора (рисунок 4.10), нестабильны ввиду добавленного шума, обусловленного конструктивными особенностями вихревого расходомера, что при вычислении расхода по каждому из отсчетов мгновенных значений частоты приводит к значительным колебаниям мгновенных значений расхода (рисунок 4.12 синий график).

Алгоритмы, основанные на скользящем и медианном среднем, сглаживают эти колебания, однако, демонстрируют заметное запаздывание при изменениях расхода, причем запаздывание при уменьшении расхода значительно больше, чем при его возрастании, что и приводит к погрешности измерения накопленного объема. Разработанный адаптивный алгоритм демонстрирует меньшее запаздывание, по сравнению с другими алгоритмами, особенно при снижении расхода. Это достигается за счет механизмов адаптации в алгоритме, а именно: наличия критерия обнаружения тренда и сравнения, рассчитанного в каждый момент времени коэффициента вариации с установленным в алгоритме порогом срабатывания.

Как видно на рисунке 4.12, адаптивный алгоритм быстро обнаруживает рост расхода (срабатывание критерия обнаружения тренда), изменяет способ расчёта со скользящего среднего на экспоненциальное сглаживание, а поскольку детектирование изменения тренда произошло раньше превышения коэффициента вариации заданного уровня, расходомер работает в штатном режиме. При установлении стабильного расхода коэффициент вариации снижается ниже уровня порога раньше, чем снимается флаг «тренд обнаружен». После снятия флага «тренд обнаружен» расход вычисляется методом скользящего среднего.

Для численного сравнения качества работы алгоритмов в таблице 4.5 приведены погрешности измерения накопленного объема, рассчитанные программой, реализующей имитационную модель (рисунок 4.10) для трех исследованных алгоритмов. Ввиду наличия в имитируемом процессе случайной составляющей в виде вариации мгновенных значений частот вихреобразования для

получения средней погрешности измерения накопленного объема, эксперимент проведен 10 раз, и вычислено среднее значение.

Таблица 4.5– Сравнение работы алгоритмов обработки информации о частоте вихреобразования.

№	Линейное изменение расхода			Экспоненциальное изменение расхода		
	Относительная погрешность подсчета накопленного 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
4	1.715	1.030	-0.054	4.536	3.982	0.195
5	1.825	1.150	0.079	4.462	3.907	0.293
6	1.908	1.305	0.140	4.401	3.802	0.370
7	1.791	1.053	0.033	4.565	3.964	0.447
8	1.784	1.159	-0.016	4.686	4.069	0.713
9	1.905	1.279	0.111	4.392	3.822	0.240
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

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 преимущество адаптивного алгоритма особенно при экспоненциальном характере изменения расхода, что обусловлено большей скоростью изменения расхода при экспоненциальном изменении.

Преимущества адаптивного алгоритма будут более ярко проявляться при частотах, равных десятым долям герц, что характерно для вихреакустических расходомеров больших диаметров.

4.4 Демонстрация совместной работы предложенной двухфакторной функции преобразования и адаптивного алгоритма в реальных условиях эксплуатации

В диссертационной работе рассмотрены два ключевых аспекта алгоритмического обеспечения точности измерения вихреакустического расходомера: алгоритм оценки частоты вихреобразования (из временного ряда мгновенных частот) и преобразование полученной оценки с помощью модели функции преобразования в расход. Таким образом, результат работы алгоритма оценки частоты является входной величиной функции преобразования. Рассмотренные составляющие дополняют друг друга, что приводит к повышению точности информации в АСУ ТП о расходе в различных режимах работы расходомера (стабильный, изменяющийся расход или внештатный режим) в широком диапазоне условий работы (расходов и температур измеряемой среды).

С целью демонстрации преимуществ предлагаемой модели ФП и алгоритма обработки информации в каждый момент времени работы расходомера был проведен натурный эксперимент, схема эксперимента на рисунке 4.13.

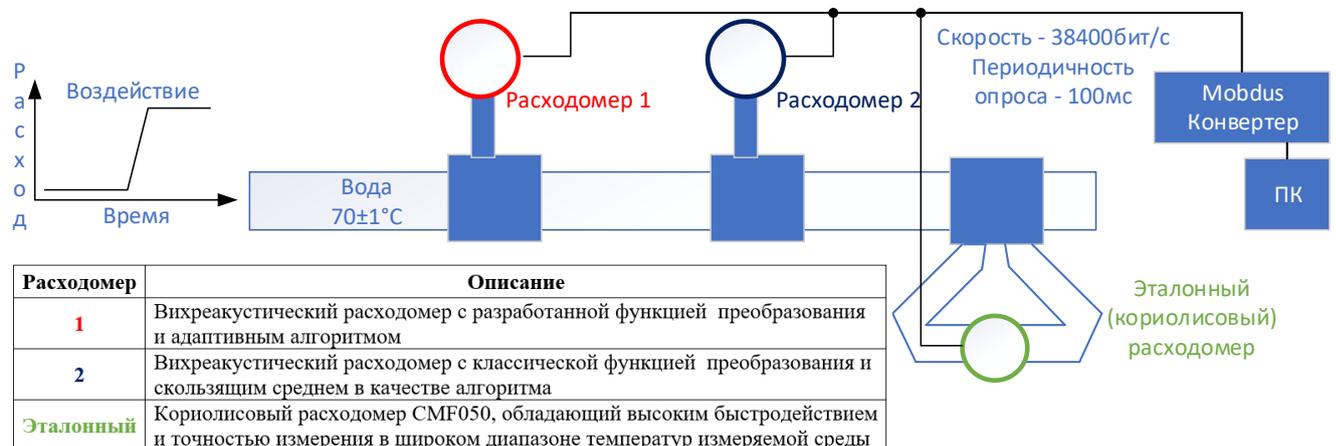


Рисунок 4.13 – Схема натурного эксперимента

В качестве испытуемых образцов были использованы два одинаковых по конструкции вихреакустических расходомера ДУ 32. Особенности алгоритмического обеспечения использованных расходомеров приведены на рисунке 4.13. В качестве эталонного расходомера использовался кориолисовый расходомер, обладающий высоким быстродействием и точностью измерения в

широком диапазоне температур измеряемой среды. Измерительная среда (вода) до начала эксперимента нагрета до $70\pm 2^\circ\text{C}$. Расходомеры установлены в измерительную линию последовательно друг за другом, с соблюдением рекомендаций производителя по длине участков до и после расходомеров. С целью одновременной фиксации значений мгновенных расходов с трех расходомеров связь с каждым была установлена по цифровому протоколу Modbus с максимальной возможной скоростью обмена доступной для испытуемого оборудования (38 400 бит/с). Периодичность поступления информации о мгновенных расходах со всех расходомеров составляла 100 мс.

Описание хода эксперимента. Во время эксперимента исследовалось поведение расходомеров 1 и 2 относительно эталонного на трех режимах: Стабильный установившийся расход $0,4\pm 0,02$ м³/ч, изменение расхода от $0,4\pm 0,02$ м³/ч до $2\pm 0,5$ м³/ч за 4-6 секунд, стабильный установившийся расход $2\pm 0,5$ м³/ч. В результате эксперимента были получены синхронизированные во времени массивы данных о мгновенных расходах с 3-х расходомеров.

1 На рисунке 4.14 представлены результаты измерения мгновенных расходов при стабильном расходе $0,4$ м³/ч и вычисленные значения погрешности измерения испытуемых расходомеров относительно эталонного.

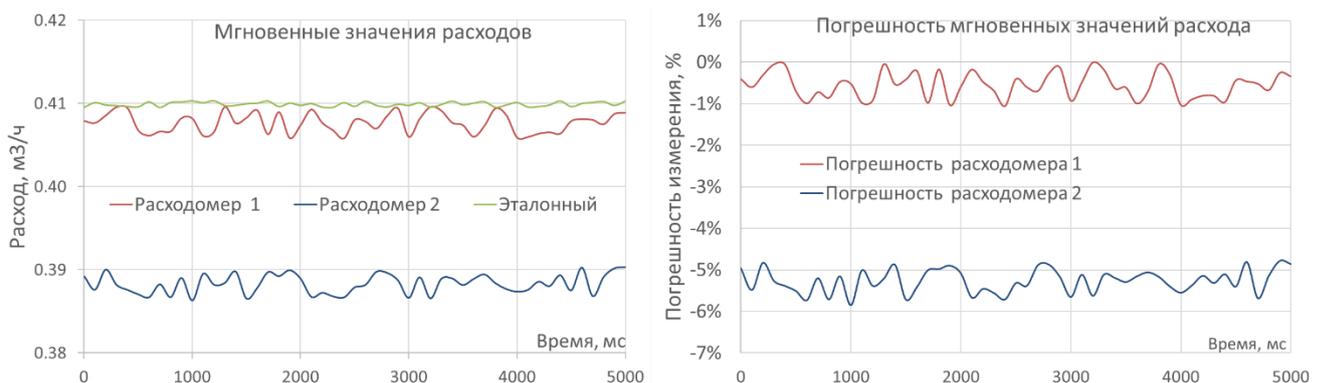


Рисунок 4.14 – Результаты при стабильном установившемся расходе $0,4$ м³/ч

Погрешность измерения расходомера 1 составляет 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 нормальных климатических условий. Результаты

эксперимента хорошо соотносятся с результатами, описанными в разделе 4.2, где было показано, что учет фактора температуры при похожих расходах и температуре воды для исследованного ДУ уменьшает погрешность на 4 - 5%.

2 При резком изменении расхода результаты измерения мгновенных значений расходов каждого из трех расходомеров изменялись как показано на рисунке 4.15. Расходомер 2 значительно запаздывает (до 6-ой секунды по отношению к эталонному), 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).

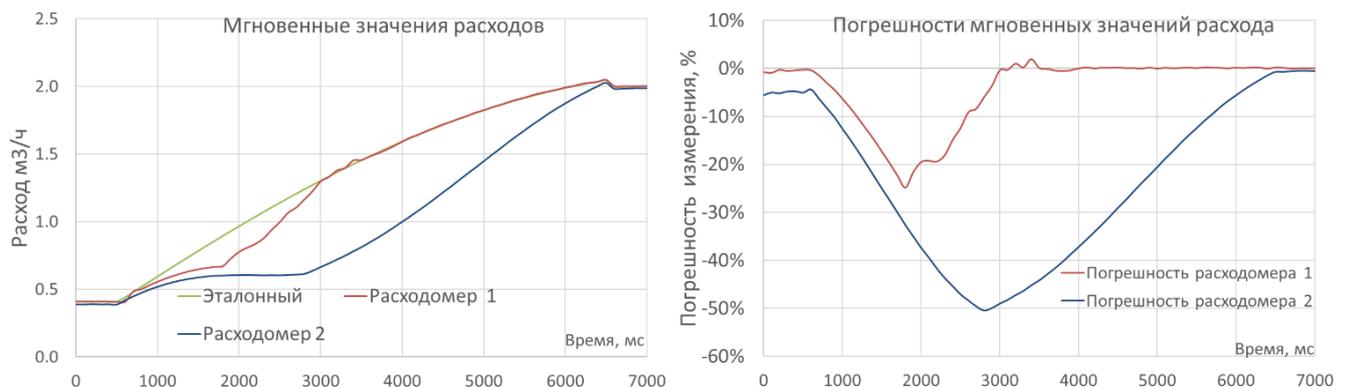


Рисунок 4.15 – Результат при изменении расхода от $0,4 \pm 0,02 \text{ м}^3/\text{ч}$ до $2 \pm 0,5 \text{ м}^3/\text{ч}$

Из рисунка 4.15 видно, что до начала реакции на изменение расхода (первые 500 мс.) разница погрешностей составляет порядка 5 %. Причины возникновения такой разницы описаны выше (стабильный расход $0,4 \text{ м}^3/\text{ч}$).

Рассматривая промежуток времени от начала изменения расхода до выхода на установившийся расход $2 \text{ м}^3/\text{час}$ через призму погрешностей (рисунок 4.15.), 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 уже вернулась к околонулевым значениям. После выхода на расход $2 \text{ м}^3/\text{час}$, погрешности обоих расходомеров стали близки между собой. Поведение расходомеров в этом режиме было исследовано на третьем этапе эксперимента.

За время изменения расхода (7 секунд рисунок 4.15) для каждого расходомера были проинтегрированы значения отсчетов мгновенных расходов и

найлены значения накопленных объемов относительно эталонного расходомера. Было установлено, что погрешность накопленного объема расходомера 2 составила -22,5 %, а погрешность накопленного объема расходомера 1 -2,8 %.

3 На рисунке 4.16 представлены результаты измерения мгновенных расходов при стабильном установившемся расходе $2 \text{ м}^3/\text{ч}$. Несмотря на большие амплитуды скачков расхода, отмечу, что рост расхода привел к снижению коэффициента вариации (более стабильному режиму работы расходомера). В этом режиме средняя погрешность расходомера 2 составила -0,5 %, а у расходомера 1 +0,3 %.

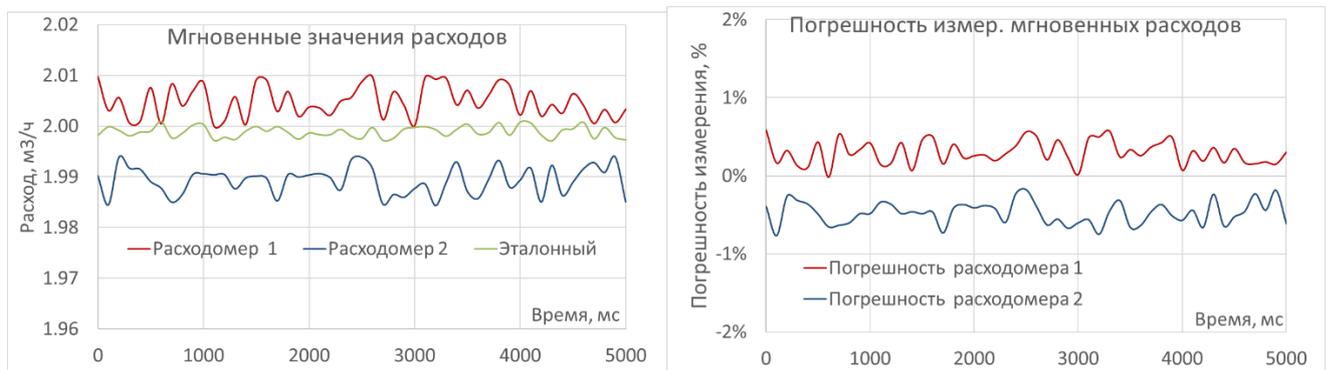


Рисунок 4.16 - Мгновенные расходы и погрешности измерения при $2 \text{ м}^3/\text{ч}$

Полученные результаты соотносятся с гипотезой, что в диапазоне измерения средних расходов влияние фактора температуры невелико. Поведение расходомеров в подобных (стабильных) режимах изучено другими авторами и реализовано в большинстве имеющихся на рынке расходомеров. Повышение точности работы вихреакустического расходомера в таких режимах не ставилось целью диссертационной работы.

Стоит еще раз отметить, что, как было показано в разделе 4.3, при резком снижении расхода запаздывание расходомера 2 будет более значительно, чем при нарастании расхода, однако, проведение натурного эксперимента ограничено технической возможностью доступных автору проливочных установок.

Таким образом, проведенный эксперимент показывает, что предложенный комплекс алгоритмических методов повышения точности измерения позволяет повысить точность измерения вихреакустического расходомера в широком диапазоне расходов (особенно малых и/или изменяющихся), температур измеряемой среды и режимах работы расходомера.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

На основе плана эксперимента, предложенного в главе 2, была разработана и реализована программа испытаний. Получены данные для проверки разработанных моделей функции преобразования. Изучены зависимости мгновенных частот от исследуемого расхода.

На основе экспериментальных данных было продемонстрировано, что в отличие от классической функции преобразования модели, найденные с помощью предложенного алгоритма и метода, способны повысить точность измерения на малых расходах. При использовании классической ФП погрешность измерения достигает 9-12 % уже при 90 °С, в то время как обе предложенные функции обеспечивают погрешность 1 % во всем диапазоне измерения.

Продемонстрировано, что модель функции преобразования, найденная методом анализа уравнения измерения, может быть применима для расходомеров разных ДУ, то есть модель обладает масштабируемостью в смысле распространения ее на большие ДУ.

Показано, что за счет того, что предложенная модель имеет только два вычисляемых коэффициента, то для поиска их значений необходимо проведение только при двух режимах расхода, что позволяет сократить количество экспериментов при выпуске из производства.

Продемонстрировано, что модель со значениями коэффициентов, найденных при комнатной температуре, обеспечивает заданную погрешность измерения в диапазоне температур измеряемой среды (при проведенном эксперименте до 90 °С). Следовательно, предложенная модель не требует испытаний (при выпуске расходомеров из производства) при повышенных температурах измеряемой среды.

По результатам обработки экспериментальных данных о мгновенных частотах вихреобразования установлено, что временной ряд мгновенных значений частот вихреобразования при устранившемся режиме работ непротиворечит

нормальному закону распределения. Описана зависимость коэффициента вариации мгновенных частот вихреобразования от измеряемого расхода.

На основе вышеописанного и зависимости скорости поступления информации о мгновенных частотах вихреобразования от измеряемого расхода разработана имитационная модель и программа, моделирующая временной ряд мгновенных частот в вихреакустических расходомерах. Проведены численные эксперименты для вихреакустических расходомеров, заключающиеся в применении к временному ряду мгновенных частот, различных алгоритмов обработки информации о частоте вихреобразования.

Продемонстрировано, что предложенный адаптивный алгоритм для вихреакустического расходомера обеспечивает меньшую погрешность измерения мгновенного расхода, как при установившемся режиме расходов, так и при изменяющемся режиме расхода. Показано, что при сравнении скользящего среднего, медианного усреднения и разработанного адаптивного алгоритма, погрешность накопленного объема при использовании адаптивного алгоритма на порядок меньше (менее 0,4 %), чем при использовании скользящего среднего и медианного усреднения (в среднем составляет 4,5 %). При этом продемонстрировано, что преимущество адаптивного алгоритма тем больше, чем динамичнее (быстрее) производится регулирование расхода в АСУ ТП.

На примере натурального эксперимента, реализованного для двух вихреакустических расходомеров одинаковой конструкции и типоразмера (Ду 32), но с различными алгоритмическими методами (разработанная функция и адаптивный алгоритм, против классической функции преобразования и скользящего среднего) и кориолисового расходомера, выступающего в качестве эталонного, показано преимущество совместного применения разработанных алгоритмических методов при измерении измеряемой среды (воды) при температуре 70°C и трех режимах расхода.

В проведенном эксперименте при измерении малого расхода (0,4 м³/ч) расходомер, с реализованными в нем предложенными алгоритмическими методами, показал уменьшение погрешности измерения мгновенных расходов

(следовательно, и накопленного объема) на 5 % по сравнению с расходомером, в котором были реализованы классические подходы. При измерении изменяющегося расхода (от 0,4 м³/ч до 2 м³/ч) погрешность накопленного объема для образца с разработанными алгоритмическими методами составила 2,8% в то время как образца с реализованными классическими подходами составила 22,5%. Таким образом, продемонстрировано, что предложенная модель функции преобразования и адаптивный алгоритм обеспечивают меньшую погрешность измерения в области малых расходов, в широком диапазоне температур измеряемой среды как при измерении установившегося, так и изменяющегося расхода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе предложены и исследованы алгоритмические методы повышения точности измерения в области малых расходов вихреакустических расходомеров в широком диапазоне температур измеряемой среды (воды) и различных режимах расхода. На основе проведенных теоретических исследований, полученных экспериментальных данных, анализа данных статистическими методами и результатов моделирования, можно сформулировать следующие выводы и результаты:

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

2 Предложена 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 масштабирование модели ФП на расходомеры больших типоразмеров (ДУ), при этом не требует горячеводных испытаний при выпуске расходомеров из производства.

3 Продемонстрирована ключевая особенность вихреакустического (вихревого) 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.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Нормативные документы:

- 1 ГОСТ 23554.2-81 Система управления качеством продукции. Экспертные методы оценки качества промышленной продукции. Обработка значений экспертных оценок качества продукции. - М.: Изд-во стандартов, 1982. - 69с.
- 2 ГОСТ 8.009-84 Государственная система обеспечения единства измерений. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений. - М.: Стандартиформ, 2006. - 26 с.
- 3 МИ 2301-2000 Государственная система обеспечения единства измерений. Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Методы и способы повышения точности измерений. - М.: Стандартиформ, 2000. - 36 с.
- 4 РМГ 29-2013 Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения. - М.: Стандартиформ, 2014. - 56 с.
- 5 Об утверждении Методики осуществления коммерческого учета тепловой энергии, теплоносителя: приказ Минстроя России от 17.03.2014 N 99/пр // Российская газета. - 2014. - № 266. - С. 28-29.
- 6 Федеральный закон РФ от 23 ноября 2009 года № 261-ФЗ “Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты российской федерации” [Электронный ресурс] // Российская газета. - 2009. - №226. - Режим доступа: <http://www.rg.ru/2009/11/27/energo-dok.html>.
- 7 Свод правил СП 60133302012. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха: СНиП 41-01-2003. [Текст]: нормативно-технический материал. - Москва.:2012. - 81 с.
- 8 Постановление Правительства РФ от 06.05.2011 N 354 (ред. от 25.12.2015) «О предоставлении коммунальных услуг собственникам и пользователям помещений в многоквартирных домах и жилых домов» [Электронный ресурс] //

Справочно-правовая система «Консультант Плюс». - Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_114247/.

Источники на русском языке

9 Абрамов, Г.С. Практическая расходометрия в промышленности / Г.С. Абрамов, А.В. Барычев, М.И. Зимин. – М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2000. – 472с.

10 Акчурин, Р.Р. Вихревой измеритель массового и объемного расхода на волокно оптических решетках Брега / Р.Р. Акчурин, В.А. Соловьев, А.С. Баранов // Вестник пензенского государственного университета. – 2017. – № 3 (19). – С.76-83.

11 Алшева, К.В. Методы и особенности исследования вихревых расходомеров / К.В. Алшева // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии управление, радиоэлектроника». – 2018. – Том.18. – № 3. – С.119-123 .

12 Бенданд, Дж, Прикладной анализ случайных данных / Дж Бенданд, А. Пирсол, пер. с англ. В.Е. Привальского и А.И. Кочубинского под реакцией И.Н. Коавленок. – М.: Мир, 1989. – 540 с.

13 Богуш, М.В. Проектирование пьезоэлектрических датчиков изгибающего момента для вихревых расходомеров газов и пара / М.В. Богуш, Э.М. Пикалев // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2008. – №. 4. – С. 32-38.

14 Борисов, А. Новые 16-разрядные семейства микроконтроллеров Microchip /А. Борисов // Компоненты и технологии. – 2006. – №. 6. – С. 38-41.

15 Дашевский, А.В. Справочник инженера по добыче нефти / А.В. Дашевский, И.И. Кагарманов, Ю.В. Зейгман, Г.А. Шамаев. – Уфа: УГНТУ, 2002. – 290 с.

16 Датчик расхода ДРС. Руководство по эксплуатации. 345.01.00.000-01 РЭ [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://sibna.ru/upload/docs/documentation/20_drs_345.pdf.

17 Датчик расхода воды вихревой «DYMETIC-1001» Руководство по эксплуатации с паспортом 1001.00.00.000 РЭ [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://dymetic.pro-solution.ru/wp-content/uploads/2018/08/DYM-1001-%D0%A0%D0%AD.pdf>.

- 18 Дрейпер, Н. Прикладной регрессионный анализ: В 2 ч. Ч. 2: Книга 2 / Н. Дрейпер, Г. Смит. – М.: Финансы и статистика, 1986. – 351 с.
- 19 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.
- 20 Джаев, Ж.А. Разработка вычисления расхода газа для измерительно вычислительного комплекса с вихревым преобразователем / Ж.А. Джаев, Л.Н. Латышев // Электронный научный журнал газовое дело. – 2012. – №. 2. – С. 32-42.
- 21 Зубов, М.В. Имитационное моделирование систем поддержания пластового давления при технологии дискретных закачек: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18 / Максим Владиславович Зубов. – Тюмень, 2006. –21 с.
- 22 "Июкогава" - ваш надежный партнер. Вихревые расходомеры digitalYEWFLOW компании "Июкогава" // Законодательная и прикладная метрология. - 2006. - N 1. - С. 39-44
- 23 Карташев, А.А. Организация учета энергоносителей на источниках теплоты в бюджетной и жилищно-коммунальной сфере г. Сургута / А. А. Карташев, В. И. Мартынов // Труды конференции «Коммерческий учет энергоносителей». XXI–я международная научно-практическая конференция г. Санкт-Петербург. – 2005. – С. 321-324.
- 24 Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Определения, теоремы, формулы / Г. Корн, Т. Корн, пер. с англ. И.Г. Абрамовича. – М.: Наука, 1973. – 832 с.
- 25 Кремлевский, П.П. Расходомеры и счетчики количества. Справочник, 2004/ П.П. Кремлевский – СПб.: Машиностроение, 2004 – 701 с.
- 26 Кричке, В.О. Автоматизированная информационная система нефтепромысла на базе индикатора дебита ИД ШГН / В.О. Кричке // НТЖ Автоматизация, телемеханика и связь в нефтяной промышленности. – 1999. – № 1(2). – С. 6-11.

- 27 Кузник, И.В. Централизованное теплоснабжение. Проектируем эффективность / И.В. Кузник. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. –156 с.
- 28 Лапин, А.П. Адаптивный алгоритм оценки частоты вихреобразования в вихреакустических расходомерах. / А.П. Лапин, А.М. Дружков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии управление, радиоэлектроника». – 2016. – Том 16. – № 3. – С. 75-82.
- 29 Лапин, А.П. Выбор и исследование двухфакторной модели функции преобразования вихреакустических расходомеров / А.П. Лапин, А.М. Дружков // Вестник ЮУрГУ. Серия. «Компьютерные технологии управление, радиоэлектроника». – 2013. – Том 13. – № 3. – С. 4–12.
- 30 Лапин, А.П. 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.
- 31 Лапин, А.П. 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.
- 32 Лапин, А.П. 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. – Том 12. – № 2. – С. 109–113.
- 33 Лапин, А.П. 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.
- 34 Лапин, А.П. 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.

35 Лапин, А.П. 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.

36 Лапина, Е.А. Алгоритмы обработки информации при выборе и обосновании функции преобразования измерительных преобразователей давления для АСУ ТП: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01 / Лапина Екатерина Андреевна. – Челябинск, 2011. – 21 с.

37 Левцев, А.П. Влияние импульсного режима течения теплоносителя на коэффициент теплопередачи в пластинчатом теплообменнике системы горячего водоснабжения [Электронный ресурс]/ А.П. Левцев, С.Ф. Кудашев, А.Н. Макеев, А.И. Лысяков // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 2. – Режим доступа: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=12664>.

38 Лемешко, Б.Ю., Вопросы применения некоторых критериев проверки случайности и отсутствия тренда / Б.Ю. Лемешко, А.С. Комиссарова, А.Е. Щеглов // Метрология. – 2010. – № 12. – С. 3-25.

39 Линник, Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы теории наблюдений / Ю.В. Линник. – М.: Государственное издательство Физико-математической литературы, 1958. – 334 с.

40 Лурье, М.С. Тела обтекания вихревых расходомеров / М.С. Лурье, О.М. Лурье // Датчики и системы. – 2008. – № 10. – С. 21-23.

41 Лурье, М.С. Исследование погрешности поперечной ориентации тела обтекания при монтаже вихревых расходомеров / М.С. Лурье, О.М. Лурье, А.С. Фролов // Вестник НЦ БЖД. – 2018. – № 2 (36). – С. 118-121.

42 Лурье, М.С. Выбор параметров аналого-цифрового преобразования входных сигналов вихревых расходомеров / М.С. Лурье, А.С. Фролов, О.М. Лурье // Датчики и системы. – 2015. – № 4 (119). – С. 3-7.

43 Лукашин, Ю.П. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов: Учеб. пособие. – М.: Финансы и статистика, 2003. – 46 с.

- 44 Лосев, В. Расходомеры для ЖКХ: эволюция на благо потребителя / Виктор Лосев // Коммунальный комплекс России. – 2014. – № 5 (119). – С. 1-2.
- 45 Львовский, Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул: Учебное пособие для вузов/ Е.Н. Львовский. – М.: Высш. шк., 1988. – 239с.
- 46 Макаров, К.А. О физическом смысле числа Рейнольдса и других критериев гидродинамического подобия [Электронный ресурс] / К.А. Макаров // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2014. – №1(25) – Режим доступа: <http://engjournal.ru/catalog/eng/teormech/1185.html>.
- 47 Макеев, А.Н. Выбор схемы технологического присоединения абонентов к тепловой сети в условиях перехода к импульсной циркуляции теплоносителя в оборудовании тепловых пунктов / А.Н. Макеев // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2017. № 44(3). – С. 72-82.
- 48 Орлова, И.В. Экономико-математические методы и модели: Компьютерное моделирование. Учебное пособие / И.В. Орлова, В.А. Половников. – М.: Вузовский учебник, 2007. – 365 с.
- 49 Павлов, А.Н. Частотно-временной анализ нестационарных процессов: концепция вайвлетов и имперических мод / А.Н. Павлов, А.Е. Филатова, А.Е. Храмов // Известия вузов «ПНД». – 2011. – № 2 – С. 141-156.
- 50 Павлов, Г.А. О проблемах энергосбережения и энергоэффективности в системах поддержания пластового давления / Г.А. Павлов, В.А. Горбатиков // Нефтяное хозяйство. – 2011. – № 7. – С. 118-119.
- 51 Пат. 2186954 Российская Федерация, МПК E 21 В 43/20. Способ управления системой поддержания пластового давления / Горбатиков В.А. – № 2000119331/03; заявл. 19.07.00; опубл. 10.08.02. – 4 с.
- 52 Пат. 2291400 Российская Федерация, МПК G 01 F 1/32 G 01 F 15/02. Вихревой способ измерения объемного количества протекшего вещества / Адамовский Л.А. – № 2003100598/28; заявл. 08.01.03; опубл. 10.01.07, Бюл. №1. – 10 с.

53 Пат. 2478916 Российская Федерация, МПК G 01 F 1/32. Вихревой способ измерения объема протекшего вещества / Чернышев В.А., Горбаткин Ю.Б., Дерденков Е.А., Михайлов С.Л. – № 2011124559/28; заявл. 16.06.11; опубл. 27.12.12, Бюл. № 36 – 8 с.

54 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.

55 Погосов, А. Ю. Моделирование физических процессов и технологическая информатизация в нефтяной промышленности и энергетике: монография / А.Ю. Погосов, С.А. Положаенко, Ю.В. Григоренко. – Одесса: Наука и техника, 2013. – 656 с.

56 Преобразователи расхода вихреакустические Метран-300 ПР. Руководство по эксплуатации. СПГК.407131.026 РЭ, версия 47 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.emerson.ru/documents/automation/преобразователь-расхода-вихреакустический-метран-300пр-ru-4849846.pdf>.

57 Садовникова, Н.А. Анализ временных рядов и прогнозирование. Учебное пособие /Н.А. Садовникова, Р.А. Шмойлова. М.: Московский государственный университет экономики, статистики и информатики, 2001. – 67 с.

58 Сафонов, Е.В. Разработка виртуального испытательного стенда для численного моделирования гидродинамических течений в бесфланцевых вихревых расходомерах с использованием высоко производительных вычислений / Е.В. Сафонов, К.А. Бромер, В.А. Дорохов // Вестник ЮУрГУ. Серия «вычислительная математика и информатика». – 2013. – Том 2. – № 4. – С. 109-105.

59 Стрекалов, А.В. Модель системы поддержания пластового давления [Электронный ресурс] / А.В. Стрекалов // Известия ТПУ. – 2011. – № 1. – С. 123-127. – Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/model-sistemy-podderzhaniya-plastovogo-davleniya>.

60 Стрекалов, А.В. Комплекс математических моделей для проектирования и управления гидросистемами поддержания пластового давления: автореф. дис. ...

доктора техн. наук: 05.13.18 / Александр Владимирович Стрекалов. – Тюмень, 2010. – 37 с.

61 Стретт, Дж.У. Теория звука. В 2 т. / Дж.У. Стретт; пер. с англ. Н. Успенского. – М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1955. – Том 1. – 504 с.

62 Тагирова, К.Ф. Автоматизация управления технологическим процессом добычи нефти из малодебитных скважин на основе динамических моделей: автореф. дис. ... доктора техн. наук: 05.13.06 / Клара Фоатовна Тагирова. – Уфа, 2008. – 32 с.

63 Устьянцева, О.Н. Погрешность измерений расхода воды / О.Н. Устьянцева // Мир измерений. – 2008. – № 09 (91). – С. 49-51.

64 Филипченко, Ю.А. Изменчивость и методы ее изучения / Ю.А. Филипченко. – М.: Государственное изд-во, 1929. – С. 275.

65 Хикс, Ч. Основные принципы планирования эксперимента / Ч Хикс; пер. с англ. Т.И. Голиковой, Е.Г. Коваленко, Н.Г. Микешиной; под общ. ред. В.В. Налимовой. – М.: Мир, 1967. – 406 с.

66 Эддоус, М. Методы принятия решения / М. Эддоус, Р. Стенсфилд; пер. с англ. И.И. Елисеевой. – М.: Изд-во Аудит, 1997. – 590 с.

Источники на английском языке

67 Baker, R.C. Flow measurement hand book / R.C. Baker. – New York: Cambridge University Press, 2000. – 524 p.

68 Bentley, J.P. The development of dual bluff body vortex flowmeters / J.P. Bentley, R.A. Benson, A.J. Shanks // Flow Measurement and instrumentation. – 1996. – V. 7. – № 2. – P. 85-90.

69 Bentley, J.P. Vortex shedding mechanisms in single and dual bluff bodies / J.P. Bentley, J.W Mudd // Flow Measurement and instrumentation. – 2003. – V. 14. – № 1. – P. 23-31.

70 Benson, R.A. The optimization of blockage ratio for optimal multiple bluff body vortex flowmeters / R.A. Benson, J.P. Bentley // Proc. 4th Int. Symp. on Fluid

Control, Fluid Measurement and Visualization FLUCOME'94 (Toulouse, France, 29 August–1 September 1994). – 1994. – P. 887-891.

71 Cousins, T. A linear and accurate flowmeter using vortex shedding. / T. Cousins, S.A. Foster, P.A. Johnson // Proc. Power Fluid for Process Control Symposium, Inst. Measurement and Control, Guildford, UK. – 1973. – P. 45-56.

72 Chen, J. Vortex signal processing method with dual channel / J. Chen, K. Min, L. Zhong // Chinese Control and Decision Conference (CCDC). – 2011. – P. 2833-2837.

73 De-ming, H. A Vortex Flowmeter Based on Multiprocessor Technique / H. De-ming, L. Wen-jun, Zh. Yong-jun // International Conference on Networking and Information Technology. – 2010. – P.322-325.

74 El-Wahed, A.K. The influence of shedder shape on the performance of the electrostatic vortex flowmeter / A.K. El-Wahed, J.L. Sproston // Flow Measurement and Instrumentation. – 1991. – V. 2. – №. 3. – P. 169-179.

75 Ghaoud, T. Modeling and tracking a vortex flow-meter signal / T Ghaoud, D.W. Clarke // Flow Measurement and Instrumentation. – 2002. – V. 13. – № 3 – P. 103-117.

76 Hans, V. Comparison of pressure and ultrasound measurements in vortex flow meters / V. Hans, H. Windorfer // Measurement. – 2003. – № 33. – P.121-133.

77 Hans, V. Vortex shedding flowmeter and ultrasound detection: signal processing and influence of bluff body geometry / V. Hans, G. Poppen, E. von Lavante, S. Perpeet // Flow Measurement and Instrumentation. – 1998. – № 9 – P. 79-82.

78 Hongjun, Sun. Digital signal processing based on wavelet and statistic method for vortex flowmeter / Sun Hongjun , Tao Zhang, Hua-Xiang Wang // Proceedings of the Third International Conference on Machine Learning and Cybernetics. – 2004. – № 5 – P. 3160-3163.

79 Huang, N.E. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis / N.E. Huang, Z. Shen, S.R. Long, M.C. Wu, H.H. Shih, Q. Zheng, N.C. Yen, C.C. Tung, H.H. Liu // Proceeding of the Royal Society A: Mathematical physical and engineering science. – 1998. – № 454. – P. 903-995.

- 80 Igarashi, T. Flow characteristics around a circular cylinder with a slit. I-Flow control and flow patterns / T. Igarashi // JSME International Journal Series B. – 1978. – V. 21. – P. 656-664.
- 81 Igarashi, T. Fluid flow around a bluff body used for a Karman vortex flowmeter / T. Igarashi // Proc. of International Symposium on Fluid Control and Measurement FLUCOME TOKYO'85. – 1985. – P. 1017-1022.
- 82 Jianbo, M. Adaptive frequency measurement (AFM) for vortex flowmeter signal / M. Jianbo, L. Zu, D. Liang, X. Liang // Industrial Electronics, Proceedings of the IEEE International Symposium. – 1992. – № 2 – P. 832-835.
- 83 Kalkhof, H.G. Influence of the bluff body shape on the measurement characteristics of vortex flowmeters / H.G. Kalkhof // Proc. of Conf. on Metering of Petroleum and its Products. – 1985. – P. 7-8.
- 84 Karman, T. Über den Mechanismus des Widerstandes, den einbewegter Körper in einer Flüssigkeit erzeugt / T. Von Karman // Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen. Mathematisch-Physikalische Klasse. – 1911. – P. 509-517.
- 85 Ke-Jun, Xu. Applied digital signal processing systems for vortex flowmeter with digital signal processing / Ke-Jun Xu, Zhi-Hai Zhu, Yang Zhou, Xiao-Fen Wang, San-Shan Liu, Yun-Zhi Huang, Zhi-Yuan Chen // Review of Scientific Instruments. – 2009. – V. 80 – № 2 – P.1-11. - doi: 10.1063/1.3082044.
- 86 Kawano, T. Ultrasonic vortex flowmeter ultra yewflo-ULF200 / T. Kawano, Y. Matsunaga, T. Andon, A. Yasu-matsu // Yokogawa Technical Report English Edition. – 1998. – № 25. – P. 23-25.
- 87 Lomas, D.J. Vortex flowmetering challenges the accepted techniques / D.J. Lomas // Control and Instrumentation. – 1975. – T. 7. – № 7. – C. 36.
- 88 Miao, J.J. Axisymmetric-type vortex shedders for vortex flowmeters / J.J. Miao, M.T. Hsu // Flow Measurement and Instrumentation. – 1992. – V. 3. – № 2. – P. 73-79.
- 89 Miller, R.W. A vortex flowmeter—calibration results and application experience / R.W. Miller, J.P. De Carlo, J.T. Cullen // Proc. Flow-Con 1977 (Brighton, UK). – 1977. – P. 549-570.

- 90 Olsen, J. F. Vortex shedding behind modified circular cylinders / J.F. Olsen, S. Rajagopalan // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. – 2000. – V. 86. – № 1. – P. 55-63.
- 91 Pankanin, G.L. Comparison of characteristics of vortex meters with various bluff bodies / G. L. Pankanin, D. S. Goujon // *Proc. Int. Metrology Congress*. – 1993.
- 92 Pankanin G.L. Influence of vortex meter configuration of measure signal parameters / G.L. Pankanin // *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 1993. IMTC/93. Conference Record., IEEE*. – 1993. – P. 337-340.
- 93 Pankanin, G.L. Sensitivity of vortex meter characteristics on bluff body design / G.L. Pankanin // *Proc. of Fourth Triennial International Symposium on Fluid Control, Measurement and Visualisation FLUCOME'94*. – 1994. – P. 893-898.
- 94 Pankanin, G.L. The vortex flowmeter: various methods of investigating phenomena / G.L. Pankanin // *Measurement science and technology*. – 2005. – № 16. – P. 1-16.
- 95 Poremba, A. Robust vortex flowmeter based on a parametric frequency estimator / A. Poremba, F. Blischke // *Industrial Electronics, Control, Instrumentation, and Automation, Power Electronics and Motion Control., Proceedings of the International Conference on San Diego*. – 1992. – № 3 – P.1541-1544.
- 96 Reynolds, O. An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and of the law of resistance in parallel channels / O. Reynolds // *Proceedings of the royal society of London*. – 1883. – T. 35. – C. 84-99.
- 97 Strouhal, V. Uber eine besondere Art der Tonerregung / V. Strouhal // *Annalen der Physik*. – 1878. – T. 241. – № 10 – P.126-251.
- 98 Takamoto, M. A vortex ring shedding flowmeter / M. Takamoto, K. Komiya // *Proc. IMEKO IX Congress (Berlin, Germany)*. – 1982. – P. 156–165.
- 99 Tawackolian, K. Calibration of an ultrasonic flowmeter for hot water / K. Tawackolian, O. Büker, J. Hogendoorn, T. Lederer. // *Flow Measurement and Instrumentation*. – 2012. – № 33. – P. 166-173.

- 100 Venugopal, A. Review on vortex flowmeter – designer perspective / A. Venugopal. // Sensors and Actuators. – 2011. – V. 170. – P. 8-23.
- 101 Yamasaki, H. The vortex flowmeter / H. Yamasaki, M. Rubin // Flow Measurement and Control in Science and Industry (USA). – 1974 – P. 975-983.
- 102 Yi, Y. An improved intelligent calibration method for vortex flowmeter / Y. Yi, W. Huifeng // American Control Conference, IEEE. – 2007. – P. 2927-2931.
- 103 Zheng, D. Improvement of the HHT method and application in weak vortex signal detection / D. Zheng, T. Zhang, J. Xing, J. Mei // Measurement science and technology. – 2007. – № 18 – P. 2769-2776.
- 104 Zhi-qiang, Sun. Application of Hilbert-Hang transformer to denoising in vortex flowmeter / Sun Zhi-qiang, Zhou Jie-min, Zhou Ping // Journal of Central South University of Technology. – 2006. – V. 13. – № 5 – P. 501-505.

ПРИЛОЖЕНИЕ А ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТЫХ ОДНОФАКТОРНЫХ
МОДЕЛЕЙ И ЗНАЧИМОСТИ ФАКТОРА ТЕМПЕРАТУРЫ
ИЗМЕРЯЕМОЙ СРЕДЫ

Основываясь на классическом подходе к вихревым (вихреакустическим) расходомерам [25, 67] его поведение может быть описано простой моделью в широком диапазоне расходов. С целью проверки этой гипотезы поиск моделей функции преобразования вихреакустического расходомера следует начать с моделей простого вида. В литературе [45] предлагается список наиболее часто используемых простых однофакторных моделей (таблица А.1).

Таблица А.1- Простые однофакторные модели функции преобразования.

№	Модели ФП	№	Модели ФП	№	Модели ФП
1	$y = b_0 + b_1 / x$	5	$y = b_0 \cdot e^{b_1 x}$	9	$y = b_0 / (b_1 + x)$
2	$y = 1 / (b_0 + b_1 x)$	6	$y = 1 / (b_0 + b_1 e^{-x})$	10	$y = b_0 \cdot x / (b_1 + x)$
3	$y = x / (b_0 + b_1 x)$	7	$y = b_0 \cdot x^{b_1}$	11	$y = b_0 \cdot e^{b_1 / x}$
4	$y = b_0 \cdot b_1^x$	8	$y = b_0 + b_1 \cdot \lg x$	12	$y = b_0 + b_1 x^n$

С целью исследования простых однофакторных функций с приборостроительного предприятия были получены данные серийных испытаний на проливочном стенде, проведенные в течение года для расходомеров двух типоразмеров с диаметром условного прохода 32 и 50. Выборка данных для расходомеров Ду 32 составила 211 датчиков, для датчиков расхода Ду 50 составила 148 штук.

Алгоритм вычисления коэффициентов исследуемых функций приведён в литературе [45]. Качество моделей функции преобразования оценивалось с помощью остаточной дисперсии:

$$S_{\text{ост}}^2 = \frac{\sum (y - \hat{y})^2}{n - p}, \quad (\text{А.1})$$

где y – результат опытных данных;

\hat{y} – значение аппроксимирующей зависимости;

n – количество опытов;

p – количество коэффициентов в уравнении аппроксимации.

Результаты, полученные в ходе исследований, сведены в таблицу А.2. В таблице приведены остаточные дисперсии (формула А.1). Функции 12 и 13 различаются степенью n $y = b_0 + b \cdot x^n$ для функции 12 $n=1$, для функции 13 $n=2$. Дальнейшее увеличение степени n показало, что дисперсия таких функций только увеличивается.

Таблица А.2 – Дисперсии исследованных однофакторных функций

№	Функция	Ду 32			Ду 50		
		Мин.	Среднее	Мах.	Мин.	Средне	Мах.
1	$y = b_0 + b_1/x$	18,669	22,277	25,930	130,710	146,341	167,532
2	$y = 1/(b_0 + b_1x)$	104,321	113,458	123,751	552,004	614,706	659,983
3	$y = x/(b_0 + b_1x)$	0,027	0,048	0,086	0,042	0,093	0,160
4	$y = b_0 \cdot b_1^x$	14,661	17,272	19,831	37,406	46,515	59,214
5	$y = b_0 \cdot e^{b_1x}$	14,661	17,272	19,831	37,406	46,515	59,214
6	$y = 1/(b_0 + b_1e^{-x})$	57,460	62,071	67,472	295,651	314,802	335,341
7	$y = b_0 \cdot x^{b_1}$	0,010	0,026	0,053	0,050	0,120	0,248
8	$y = b_0 + b_1 \cdot \lg x$	5,439	6,335	7,522	37,799	43,854	51,930
9	$y = b_0/(b_1 + x)$	104,321	113,458	123,751	552,004	614,706	659,983
10	$y = b_0 \cdot x/(b_1 + x)$	76,883	82,143	89,042	380,347	399,347	414,010
11	$y = b_0 \cdot e^{b_1/x}$	14,910	19,242	23,843	122,245	141,348	170,070
12	$y = b_0 + b_1x$	4,01E-07	1,65E-04	1,02E-03	2,65E-06	3,84E-04	3,43E-03
13	$y = b_0 + b_1x^2$	2,272	2,477	2,710	7,373	8,202	8,833

Из таблицы видно, что остаточная дисперсия линейной модели на несколько порядков меньше, чем для других исследуемых моделей. Результаты исследования обоих выборок показали, что для всех датчиков наилучшей моделью является линейная модель вида $y = b_0 + b \cdot x$. Следует отметить, что поиск значений коэффициентов линейной модели ФП был произведен с помощью стандартного метода наименьших квадратов (МНК) [18].

Проверка значимости фактора температуры измеряемой среды.

Для проверки значимости фактора температуры измеряемой среды при измерении расхода вихреакустическим расходомером были собраны данные проливочных испытаний серийных расходомеров с приборостроительного предприятия за год. Конструкция стенда для серийных испытаний спроектирована без возможности подогрева или охлаждения воды в баке. Бак установки находится в подвальном помещении, слабо изолированном от воздействия окружающей среды, поэтому в зависимости от времени года наблюдается колебание

температуры измеряемой среды. Согласно предоставленным данным изменение температуры измеряемой среды составило 15°C (от 13°C до 28°C). При циркуляции измеряемой жидкости (воды) в замкнутом контуре происходит разогрев жидкости, при этом температура во время испытания одного прибора (испытание длится порядка 40 мин) изменялась в незначительных пределах $0,3-0,6^{\circ}\text{C}$. Можно усреднить показания температур во время испытания одного прибора и сказать, что температура в ходе испытания одного расходомера была постоянной. Из всего вышесказанного следует, что для линейной однофакторной модели значения коэффициентов справедливы только для той температуры, при которой проводились испытания. То есть, можно констатировать, что каждому значению коэффициента линейной модели можно поставить в соответствие определенную температуру.

С целью обнаружения зависимости между значениями коэффициентов модели и температурой измеряемой жидкости необходимо проверить выборки значений коэффициентов модели и температуры на наличие корреляции. Для этого был применен ранговый, свободный от распределения критерий Спирмана.

В ГОСТ 235542-81 для оценки корреляции по критерию Спирмана необходимо вычислить коэффициент корреляции j и сравнить его с квантилем $j_{\alpha,(n-2)}$ с заданным уровнем значимости $\alpha=0,01$. Если $j \geq j_{\alpha,(n-2)}$, то принимается гипотеза о согласованности, то есть утверждение, что между выборками существует статистически значимая корреляционная связь. Корреляцию оценивают при помощи расчета коэффициента ρ условно оценивают тесноту связи между признаками, считая значение коэффициента равным 0,3 и менее, показателями слабой тесноты связи; значения более 0,4, но менее 0,7 - показателями умеренной тесноты связи, а значения 0,7 и более - показателями высокой тесноты связи.

Методика расчета указанных коэффициентов приведена ниже:

Пусть заданы две выборки $X (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ и $Y (y_1, y_2, y_3, \dots, y_n)$. Для того, чтобы рассчитать критическую статистику критерия Спирмана и сравнить ее с выбранным квантилем распределения необходимо:

1 Расположить значения x_1, x_2, \dots, x_n величины X в порядке возрастания (или убывания), т.е. $x_1 < x_2 < \dots < x_n$ (или $x_1 > x_2 > \dots > x_n$). Тогда в имеющейся выборке значение x_i величины X можно заменить рангом i этого значения. Назначить ранги необходимо и для выборки Y .

2 Вычислить разность рангов двух выборок по формуле (А.2), где S_i, R_i – ранг наблюдения x_i и y_i соответственно.

$$d = \sum_{i=1}^n (S_i - R_i)^2 \quad (\text{А.2})$$

3 Вычислить критическую статистику критерия.

$$\rho = 1 - \frac{6 \cdot d}{n \cdot (n^2 - 1)} \quad (\text{А.3})$$

4 Найти квантиль распределения, с которым необходимо сравнить критическую статистику, зависит от уровня значимости и количества элементов выборки n . Согласно ГОСТ 23554.2 – 81 при числе элементов выборки $n > 100$ необходима корректировка критической статистики критерия Спирмана по формуле:

$$j = \frac{\rho}{2} \left[\sqrt{n-1} + \sqrt{\frac{n-2}{1-\rho^2}} \right], \quad (\text{А.4})$$

Квантиль распределения рассчитывается по формуле А.5. Значения квантилей можно найти в приложениях вышеупомянутого ГОСТа.

$$j_{\alpha, (n-2)} = \frac{1}{2} (z_{\alpha} + t_{\alpha, (n-2)}) \quad (\text{А.5})$$

где z_{α} – верхняя критическая точка стандартного нормального распределения при уровне значимости α ,

$t_{\alpha, (n-2)}$ – верхняя α критическая точка t -распределения Стьюдента при $(n-2)$ степенях свободы.

Результаты расчета коэффициентов корреляции согласно обоим методам сведем в таблицу А.3.

Таблица А.3 – Коэффициенты корреляции согласно критерию Спирмана

Модель для	Коэффициент корреляции выборки температуры с выборками значений				Квантиль при уровне значимости $\alpha =$ 0.01
	b0		b1		
	P	J	P	J	$j_{\alpha,(n-2)}$
Ду 32	0,597	9,712	0,052	0,756	4,652
Ду50	0,552	7,345	0,115	1,401	4,652

Оба подхода оценки коэффициента корреляции Спирмана интерпретируют связь между значениями коэффициента b_0 линейной математической модели $Q = b_0 + b_1 \cdot f$ с температурой измеряемой среды, как статистически значимую. То есть, значение коэффициента, функционально связано с температурой измеряемой среды.

Исследование модели функции преобразования вихреакустического расходомера простого линейного вида позволило выявить наличие корреляции (зависимости) между значениями коэффициентов модели и температурой измеряемой жидкости, которая была зафиксирована при проведении эксперимента. Наличие обнаруженной зависимости свидетельствует о том, что температура измеряемой среды является статистически значимым фактором при измерении расхода. Следовательно, необходимо провести исследование двухфакторных моделей, где результирующий расход зависит не только от частоты вихреобразования f , но и от температуры измеряемой среды t .

ПРИЛОЖЕНИЕ Б ОПИСАНИЕ ГРЯЧЕВОДНОГО СТЕНДА

Для исследования двухфакторной функции преобразования использовалась установка для проверки счетчиков жидкости УПСЖ 15/50, предназначенная для проведения калибровки и поверки счетчиков холодной и горячей воды. Данная установка имеет в своем составе нагревательные элементы, которые обеспечивают возможность подогревания измеряемой среды (воды).

Используемая установка была аттестована в качестве «Эталон объемного расхода жидкости 2 разряда в диапазоне значений от 0,01 до 25,0 м³/ч» и «Эталона объема жидкости в потоке 2 разряда в диапазоне значений от 0,001 до 25,0 м³ при использовании расходомеров» (рисунки Б.1 и Б.2).

Установка представляет собой замкнутый циркуляционный контур, включающий в себя измерительную линию, резервуар для хранения поверочной жидкости (вода), весы для статического взвешивания платформенные, насос с преобразователем частоты, три эталонных расходомера (электромагнитные), а также перекидное устройство. Эталонные расходомеры установлены в трех байпасных линиях, которые оборудованы запорной арматурой и подключены к насосу. Байпасные линии подключены к измерительной линии, куда и устанавливаются поверяемые счетчики. Последняя оборудована приходными втулками, устройством пневмозажима, оптическими датчиками для снятия импульсов с поверяемых счетчиков. К выходу измерительной линии подключено перекидное устройство, обеспечивающее направление потока воды в резервуар или на весы. Управление установкой осуществлялось в полуавтоматическом режиме с помощью ПО, управляющего работой насоса, запорной арматуры, перекидным устройством, весами и эталонными расходомерами. Основные технические характеристики установки поверки счетчиков жидкости УПСЖ–15/50:

- Предел допускаемой относительной погрешности объема при поверке с использованием эталонных расходомеров составляет $\pm 0,15\%$;
- Точность установки заданного расхода 5%;
- Относительное изменение расхода в процессе поверки, не более 2,5 %;
- Рабочее давление, не более 0,4 МПа.



Федеральное государственное унитарное предприятие
«Всероссийский научно-исследовательский институт расходомерии»

Государственный научный метрологический центр

ФГУП «ВНИИР»

Аттестат аккредитации № RA.RU.311764

СЕРТИФИКАТ КАЛИБРОВКИ
CALIBRATION CERTIFICATE

Номер сертификата 76601-19 **Дата калибровки** 31.10.2019 **Страница** 1 **из** 2
Certificate number Date when calibrated Page of

Объект калибровки Установка поверочная для поверки счетчиков воды УПСЖ 15-50,
Item calibrated наименование эталона; средства измерения; идентификация (тип, заводской номер, производитель)
заводской № 01 2004.045, производитель: «Enbra, spol. s. r. o.», Чехия

Место проведения калибровки АО «ПГ «Метран», 454003, Россия, г. Челябинск
Calibration site

Заказчик АО «ПГ «Метран», ИНН 7448024720, 454003, область Челябинская, город Челябинск,
Customer информация о заказчике, адрес

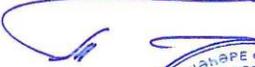
проспект Новоградский, дом 15

Метод калибровки МК 2567988-37-2017 «Методика калибровки. Установки поверочные»
Method of calibration наименование метода; идентификация

Все измерения имеют прослеживаемость к единицам Международной системы SI, которые воспроизводятся национальными эталонами НМИ. Данный сертификат может быть воспроизведен только полностью. Любая публикация или частичное воспроизведение сертификата возможны с письменного разрешения НМИ, выдавшего сертификат.

All measurements are traceable to the SI units which are realized by national measurement standards of NMI.

This certificate shall not be reproduced, except in full. Any publication extracts from the calibration certificate requires written approval of the issuing NMI.

	<u>С. Тайбинский</u>	<u>Заместитель директора по развитию</u>	<u>31.10.2019</u>
Утверждающая подпись Authorizing signature	Ф.И.О. name	Должность function	Дата выдачи Date of issue
	<u>А. Корнеев</u>	<u>Начальник отдела</u>	
Подпись Signature	Ф.И.О. name	Должность руководителя подразделения function	



Россия, Республика Татарстан, 420088, г. Казань,
ул. 2-ая Азинская, д. 7«а»
тел. (843) 272 70 62 факс: (843) 272 00 32
e-mail: office@vniir.org сайт: www.vniir.org



СЕРТИФИКАТ КАЛИБРОВКИ

Номер сертификата 76601-19 Дата калибровки 31.10.2019 Страница 2 из 2
 Certificate number Date when calibrated Page of

Калибровка выполнена с помощью Государственный первичный специальный эталон единиц
 Calibration is performed by using наименование эталонов и их статус/идентификация/доказательство прослеживаемости
 массы и объема жидкости в потоке, массового и объемного расходов жидкости ГЭТ 63-2017.

Условия калибровки температура окружающей среды 24,1 °С; атмосферное давление 99,8 кПа;
 Calibration conditions Условия окружающей среды и другие влияющие факторы
 относительная влажность 32,6 %; температура измеряемой среды 24,1 °С; давление измеряемой среды
 0,12 МПа

Результаты калибровки, включая неопределенность

Calibration results including un certainly

Метрологические характеристики установки при использовании весовых устройств:

Диапазон воспроизводимого массового (объемного) расхода жидкости, т/ч (м ³ /ч)	от 0,01 до 25,0
---	-----------------

Диапазон воспроизводимой массы (объема) жидкости в потоке, т (м ³)	от 0,003 до 0,5
--	-----------------

Расширенная неопределенность при измерении массы жидкости в потоке, %	0,059
---	-------

Расширенная неопределенность при измерении массового расхода жидкости, %	0,064
--	-------

Расширенная неопределенность при измерении объема жидкости в потоке, %	0,064
--	-------

Расширенная неопределенность при измерении объемного расхода жидкости, %	0,068
--	-------

Метрологические характеристики установки при использовании расходомеров:

Диапазон воспроизводимого объемного расхода жидкости, м ³ /ч	от 0,01 до 25,0
---	-----------------

Диапазон воспроизводимого объема жидкости в потоке, м ³	от 0,001 до 25,0*
--	-------------------

Расширенная неопределенность при измерении объема жидкости в потоке, %	0,144
--	-------

Расширенная неопределенность при измерении объемного расхода жидкости, %	0,145
--	-------

Приложением к настоящему сертификату является протокол калибровки

Расширенная неопределенность получена путем умножения стандартной неопределенности на коэффициент охвата $k = 2$, соответствующего уровню доверия приблизительно равному 95% при допущении нормального распределения. Оценивание неопределенности проведено в соответствии с «Руководством по выражению неопределенности измерений» (GUM).

The expanded uncertainty is obtained by multiplying the combined standard uncertainty by a coverage factor $k=2$ corresponding to a confidence interval of approximately 95% assuming a normal distribution. The evaluation of uncertainty is conducted according to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" (GUM).

Дополнительная информация В состав установки входят следующие основные средства измерений:

Additional information

состояние объекта калибровки / регулировки и / или ремонт объекта калибровки до его калибровки / рекомендуемый межкалибровочный интервал по требованию заказчика

- весы электронные К модификации КА32s, НПВ 20 кг, зав. № 2642061;
- весы электронные К модификации KCS 600, НПВ 500 кг, зав. № 2642062;
- электромагнитный расходомер PROFIFLUX IFM 5080 K/D, DN 4, зав. № A03 38818;
- электромагнитный расходомер PROFIFLUX IFM 5080 K/D, DN 15, зав. № A03 38874;
- электромагнитный расходомер PROFIFLUX IFM 5080 K/D, DN 40, зав. № A03 38861.

Заключение: Установка поверочная для поверки счетчиков воды УПСЖ 15-50 признана соответствующей требованиям к рабочему эталону единиц массового и объемного расходов жидкости 1 разряда в диапазоне значений от 0,01 до 25,0 т/ч (м³/ч), единиц массы и объема жидкости в потоке 1 разряда в диапазоне значений от 0,003 до 0,5 т (м³) при использовании весовых устройств, единицы объемного расхода жидкости 2 разряда в диапазоне значений от 0,01 до 25,0 м³/ч, единицы объема жидкости в потоке 2 разряда в диапазоне значений от 0,001 до 25,0* м³ при использовании расходомеров в соответствии с частью 1 Государственной поверочной схемы для средств измерений массы и объема жидкости в потоке, объема жидкости и вместимости при статических измерениях, массового и объемного расходов жидкости, утвержденной приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 7 февраля 2018 г. № 256.

* – объем жидкости в потоке за 1 час работы.

Рекомендуемый межкалибровочный интервал – 12 месяцев.


 Подпись лица, выполнившего калибровку
 Signature of the person who has performed calibration

И.И. Ханов
 Ф.И.О.
 name

Инженер
 Должность
 function

Россия, Республика Татарстан, 420088, г. Казань,

ул. 2-ая Азинская, д. 7«а»

тел. (843) 272 70 62 факс: (843) 272 00 32

e-mail: office@vniir.org сайт: www.vniir.org

ПРИЛОЖЕНИЕ В ПРОВЕРКА ДАННЫХ НА ГЕТЕРОСЕДАСТИЧНОСТЬ

Гетероскедастичность – понятие используемое в статистике, обозначающее неоднородность наблюдений, выражающееся в неодинаковой дисперсии случайной ошибки регрессионной модели. Проверка наличия гетероскедастичности производится с помощью проверки статистических гипотез. Ниже рассмотрим 2-а критерия: тест Уайта и тест Голдфелда-Куандта.

Тест Уайта. Смысл данного теста сводится к следующему, если присутствует гетероскедастичность, то она должна как-то отражаться в остатка линейной регрессионной модели. В данном тесте выдвигается гипотеза H_0 : в проверяемых данных отсутствует гетероскедастичность. Тест Уайта состоит из следующей последовательности действий:

1 К исходной регрессии вида (В.1) применяем метод наименьших квадратов (МНК) для нахождения коэффициентов регрессии β_0, \dots, β_k : уравнения (В.1), где x_1, \dots, x_k – регрессоры, u – случайная составляющая.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k + u, \quad (\text{В.1})$$

2 Определяем значение остатков:

$$e = y - \hat{y} \quad (\text{В.2})$$

3 Оценка регрессии квадратов остатков на все регрессоры, их квадратов и попарных произведений произвосогласно выражению (В.3), где a_1, a_i, b_i, c_i – коэффициенты регрессии,

$$e_i^2 = a_1 + \sum_{i=2}^k a_i x_i + \sum_{i=2}^k b_i x_i^2 + \sum_{i=2}^k c_{ij} x_i x_j + \varepsilon_i \quad (\text{В.3})$$

4 Рассчитываем коэффициент детерминации R^2 для регрессии (В.3). Рассчитываем критическую статистику $\chi^2_{\text{крит}} = R^2 * n$, где n – количество элементов в исследуемых данных.

5 Значение критической статистики сравниваем с табличными значениями хи-квадрат на уровне значимости α при числе степеней свободы $(m-1)$, где m – количество параметров в регрессии (В.3). Если выполняется неравенство $\chi^2_{\text{крит}} > \chi^2_{\alpha, (m-1)}$, то нулевая гипотеза об отсутствии гетероскедастичности отклоняется.

Тест Голдфелда-Куандта. Тест гетероскедастичности случайных ошибок регрессионной модели, применяемый в случае, когда есть основания полагать, что стандартное отклонение ошибок может быть пропорционально некоторой переменной. Порядок выполнения описывается следующей последовательностью:

1 Упорядочить данные по убыванию той независимой переменной, относительно которой есть подозрение на гетероскедастичность.

2 Стандартным МНК построить регрессионные модели для двух независимых выборок – первых и последних m наблюдений в данном упорядочении, где $m < n/2$. Средние $n - 2m$ наблюдений исключаются из рассмотрения.

3 Для двух найденных регрессий найти соответствующие остатки e_1, e_2 и рассчитать критическую статистику:

$$F_{крит} = \frac{\sum_{i=1}^m (y_{1m} - \hat{y}_{1m})^2}{\sum_{i=1}^m (y_{2m} - \hat{y}_{2m})^2} \quad (B.4)$$

4 Если верна нулевая гипотеза отсутствия гетероскедастичности, то критическая статистика имеет распределение Фишера. Если $F_{крит} < F_{\alpha(m-k, m-k)}$, где k – количество регрессоров, то нулевую гипотезу следует отвергнуть.

Применим описанные тесты для проверки на наличие гетероскедастичности в данных, полученных в ходе испытаний на расходомером стенде. Данные возьмем для одного расходомера ДУ 25 пролитого при температуре измеряемой жидкости 25 °С. Данные представлены в виде пар значений Q (расход, м³/ч) и f (частота вихреобразования, Гц) (таблица В.1).

Применим тест Уайта. К данным применяем стандартный метод наименьших квадратов. Для нахождения коэффициентов регрессии $Q = b_0 + b_1 f$ воспользуемся формулами (В.5, В.6). В результате мы получим следующее уравнение регрессий $Q = 0.02495 * f - 0.02476$.

Таблица В.1 – Данные испытаний и вычисления для построения модели с помощью МНК.

	f	Q	f*Q	f^2
1	8,356	0,181	1,5125	69,8297
2	13,235	0,302	3,9970	175,1636
3	17,270	0,401	6,9254	298,2602
4	25,405	0,603	15,3192	645,4110
5	41,165	1,000	41,1651	1694,5655
6	57,216	1,400	80,1029	3273,7130
7	73,007	1,800	131,4120	5329,9768
8	93,789	2,330	218,5281	8796,3559
9	161,110	4,010	646,0523	25956,5288
10	221,495	5,510	1220,4397	49060,2122
11	282,710	7,010	1981,7936	79924,6614
Среднее значение		2,2315		
Сумма	994,759	24,547	4347,248	175224,678

$$b_1 = \frac{n \sum(f \cdot Q) - \sum f \cdot \sum Q}{n \sum f^2 - (\sum f)^2} \quad (B.5)$$

$$b_0 = \frac{\sum Q - b_1 \cdot \sum f}{n} \quad (B.6)$$

Определяем значение остатков полученной модели (таблица В.2). Проведем оценку регрессии квадратов остатков: $e^2 = a_1 + a_2 f + a_3 f^2$. В результате применения к данным стандартного МНК были найдены коэффициенты модели $e^2 = 6,4930 \cdot 10^{-10} \cdot f^2 + 8,5396 \cdot 10^{-7} f + 1,2053 \cdot 10^{-6}$

Таблица В.2 – Остатки линейной регрессии

Q	Q _{мод}	e	e ²	F	e ² расчет	(e ² -e ² _{расч}) ²	(Q-Q _{ср}) ²
0,181	0,18373	-0,0027	7,4759E-06	8,3564	8,387E-06	8,2970E-13	6,46217E-09
0,302	0,30545	-0,0035	1,1929E-05	13,2349	1,262E-05	4,7850E-13	5,79931E-09
0,401	0,40613	-0,0051	2,6362E-05	17,2702	1,615E-05	1,0434E-10	5,27472E-09
0,603	0,60910	-0,0061	3,7172E-05	25,4049	2,332E-05	1,9191E-10	4,28437E-09
1,000	1,00231	-0,0023	5,3586E-06	41,1651	3,746E-05	1,0304E-09	2,63326E-09
1,400	1,40280	-0,0028	7,8178E-06	57,2164	5,219E-05	1,9690E-09	1,3383E-09
1,800	1,79677	0,0032	1,0456E-05	73,0067	6,701E-05	3,1985E-09	4,73644E-10
2,330	2,31528	0,0147	2,1653E-04	93,7889	8,701E-05	1,6776E-08	3,11677E-12
4,010	3,99496	0,0150	2,2613E-04	161,1103	1,556E-04	4,9683E-09	4,47114E-09
5,510	5,50158	0,0084	7,0927E-05	221,4954	2,222E-04	2,2886E-08	1,78047E-08
7,010	7,02888	-0,0189	3,5636E-04	282,7095	2,945E-04	3,8241E-09	4,23327E-08
				Среднее	8,88E-05		
				Сумма		5,4951E-08	9,08775E-08

$$R^2 = 0,39533233$$

$$R^{2*n} = 4,348655641$$

Рассчитываем коэффициент детерминации R² по формуле:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(e_i^2 - \bar{e}_i^2)^2}{\sum(e_i^2 - \bar{e}_i^2)^2}; \quad (B.7)$$

где \bar{e} – среднее значение остатков.

В результате проведенных расчетов находим, что критическая статистика $\chi^2_{\text{крит}} = 0,3953 \cdot 11 = 4,348$. Сравниваем значение рассчитанной критической статистики с квантилями их-квадрат распределения. $\chi_{20,05, 1,} = 0,0039$ $\chi_{20,95, 1,} = 3,8415$. Значение критической статистики больше квантиля распределения, поэтому нулевая гипотеза отклоняется, имеет место гетероскедастичность.

Применим тест Голдфелда-Куандта к тем же исследуемым данным.

Упорядочим данные относительно частоты вихреобразования f . Разделим данные на две группы по 5 элементов, 6-ое наблюдение исключим из рассмотрения (таблица В.3, В.4) и построим регрессионные модели с помощью стандартного метода МНК (В.5, В.6). В результате расчетов были получены две модели $Q_1 = 0.02407 \cdot f_i - 0.0046$ и $Q_2 = 0.02483 \cdot f_i - 0.0003$.

Таблица В.3 – Первые 5 элементов массива

f 1	Q1	f*Q	f^2	Q модели	E
8,3564	0,181	1,51251	69,82974	0,1965	2,41E-04
13,2349	0,302	3,99695	175,16364	0,3140	1,43E-04
17,2702	0,401	6,92535	298,26015	0,4111	1,02E-04
25,4049	0,603	15,31918	645,41098	0,6069	1,55E-05
41,1651	1,000	41,16510	1694,56546	0,9863	1,87E-04
Сумма					0,000688

Таблица В.4 - Последние 5 элементов массива

f 2	Q2	f*Q	f^2	Q модели	e
73,0067	1,80	131,412	5329,9768	1,8126	1,59E-04
93,7889	2,33	218,528	8796,3559	2,3287	1,63E-06
161,1103	4,01	646,052	25956,5288	4,0005	8,93E-05
221,4954	5,51	1220,440	49060,2122	5,5001	9,75E-05
282,7095	7,01	1981,794	79924,6614	7,0203	1,06E-04
Сумма					0,000454

На основании данных из таблиц В.3 и В.4 с помощью формулы (В.4), рассчитаем значение критической статистики $F_{\text{крит}} = 1,5174$. Сравнивая найденное значение критической статистики с квантилем распределения Фишера $F_{0,05}(4,4) = 6.39$, $F_{0,05}(4,4) = 5.05$, видно, что критическая статистика меньше квантилей распределения Фишера, следовательно, нулевая гипотеза отвергается. В исследуемых данных присутствует гетероскедастичность.

Проверка данных двумя различными методами показала, что в данных присутствует гетероскедастичность.

Продemonстрируем преимущество применения ВМНК на основании результатов проливочных испытаний расходомера Ду32. В качестве модели ФП будем использовать простую линейную модель вида $Q = b_0 + b_1 \cdot f$. Результаты сведены в таблицу В.5. Относительная погрешность рассчитывается по формуле (В.8), где $Q_{\text{модели}}$ – расход, рассчитанный на основе используемой модели, $Q_{\text{экспер}}$ – расход полученный в результате эксперимента.

$$\delta = \frac{Q_{\text{модели}} - Q_{\text{экспер}}}{Q_{\text{экспер}}} \cdot 100\% \quad (\text{В.8})$$

Таблица В.5 – Сравнение погрешностей моделей, полученных с помощью МНК и ВМНК

Расход, м ³ /ч	0,25	0,40	0,5	0,8	1,3	1,99	3	4	5,02	10	13,9
Погрешность МНК, %	1,10	-0,02	-0,44	-0,69	-0,33	0,27	0,25	0,01	0,09	-0,18	0,07
Погрешность ВМНК, %	0,73	-0,21	-0,56	-0,73	-0,30	0,34	0,33	0,10	0,19	-0,07	0,19
Сумма квадратов погрешностей для МНК										2,18	
Сумма квадратов погрешностей ВМНК										1,83	

Если провести сравнение результатов применения МНК и ВМНК сумма квадратов относительных ошибок составит на 16 % меньше. Применение ВМНК позволяет уменьшить суммарную относительную погрешность и уменьшить разброс погрешностей расходомера во всем диапазоне измерений.

Описанный выше эффект проявляется особенно ярко для малых расходов при использовании полиномиальных моделей большого порядка за счет увеличения степеней свободы используемой модели, что позволяет описать моделью поведение объекта с большей точностью в области с большим весом [39].

ПРИЛОЖЕНИЕ Г МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ О МГНОВЕННЫХ ЧАСТОТАХ

В результате проведенного эксперимента (описан в разделе 4.1.2) были получены данные о мгновенных частотах вихреобразования для протестированных расходов и проведена проверка собранных данных с помощью двух статистических критериев: критерий отклонения распределения вероятностей от нормального закона распределения и критерий обнаружения промахов. После этого были построены зависимости коэффициента вариации от

Проверка на нормальность распределения

Полученные данные о мгновенных расходах были подвергнуты проверке на отклонение распределения вероятностей от нормального закона распределения. Для реализации проверки согласно критерия Эппса-Палли разработана программа, реализующая алгоритм расчета критической статистики критерия, описанный в ГОСТ Р ИСО 5479-2002.

Данный критерий применим при количестве элементов x выборки объемом $n > 8$ при проведении описанных в разделе 4.1.2 фиксировалась не менее 600 значений мгновенных частот. Критическая статистика для выбранного критерия рассчитывается по формуле Г.1, где x_{cp} и m_2 находятся по формулам Г.2 и Г.4

$$Tep = 1 + \frac{n}{\sqrt{3}} + \frac{2}{n} \sum_{k=2}^n \sum_{j=1}^{k-1} \exp \left\{ \frac{-(x_j - x_k)^2}{2m_2} \right\} - \sqrt{2} \sum_{j=1}^n \exp \left\{ \frac{-(x_j - x_{cp})^2}{4m_2} \right\} \quad (\text{Г.1})$$

$$x_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{j=2}^n x_j \quad (\text{Г.2})$$

$$m_2 = \frac{1}{n} \sum_{j=2}^n (x_j - x_{cp}) \quad (\text{Г.3})$$

Критические статистики, рассчитанные в соответствии с критерием Эппса-Палли, для каждого из заданных режимов приведены в таблице Г.1.

Согласно использованному критерию, выборка не противоречит нормальному распределению, если рассчитанное значение критической статистики не превышает p -квантиль при заданном уровне значимости и объеме выборки. Для исследуемых выборок p -квантиль равен 0,366.

Таблица Г.1 – Рассчитанные значения критической статистики Эппса-Палли

Значения критической статистики Эппса-Палли для выборок мгновенных расходов Ду25 для каждого из установленных режимов расхода											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0,095	0,099	0,168	0,026	0,132	0,264	0,236	0,096	0,153	0,051	0,140	0,136
Значения критической статистики Эппса-Палли для выборок мгновенных расходов Ду32 для каждого из установленных режимов расхода											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0,071	0,103	0,012	0,150	0,195	0,094	0,155	0,021	0,015	0,137	0,199	0,195
Значения критической статистики Эппса-Палли для выборок мгновенных расходов Ду50 для каждого из установленных режимов расхода											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0,086	0,124	0,103	0,172	0,140	0,156	0,098	0,158	0,068	0,202	0,147	0,137

Таким образом, в результате проверки было установлено, что полученные выборки значений мгновенных расходов не противоречат нормальному закону распределения вероятностей при уровне значимости $\alpha=0,05$. Следовательно в качестве оценки истинного значения установленного расхода можно принять среднее значение мгновенных расходов эталонных расходомеров.

Проверка на наличие промахов в данных

С целью обнаружения промахов в полученных выборках использовался критерий, описанный в МИ 2091-90. Предпосылкой применения данного критерия является не противоречие исследуемых выборок нормальному закону распределения. Значение x в исследуемой выборке является промахом если выполняется неравенство Г.4, где S - это смещенное среднее квадратическое отклонение рассчитанное по формуле Г.5, $T(\beta, n)$ - квантиль распределения соответствующий уровню значимости β и числу измерений n , таблица значений данного квантиля приведена в МИ 2091-90.

$$\max \frac{x_i - x_{cp}}{S} \geq T(\beta, n) \quad (\text{Г.4})$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_j - x_{cp})^2} \quad (\text{Г.5})$$

В результате проведения проверки на промахи, было установлено, что при испытаниях на некоторых режимах проливки в полученных результатах измерений присутствуют промахи (таблица Г.2), однако их количество не велико. Что дает основание при моделировании временного ряда мгновенных частот вводить 1-2 промаха на 600 элементов (0,3%).

Таблица Г.2 – Количество промахов при испытании расходомеров

Количество промахов в полученных выборках на каждом из режимов режима расхода											
Ду25											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
Ду32											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	0	2	1	0	0	1	0	1	0	0	0
Ду50											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	1	0	0	0	2	0	1	0	0	0	2

Исследование стабильности вихреобразования

Из данных о мгновенных значениях частот вихреобразования (собранных в результате проведения эксперимента) были исключены промахи для получившихся выборок на подобии методики описанной выше. С целью оценки значения коэффициента вариации во всем диапазоне измерения расходомеров было проведено дополнительное испытание на стенде позволяющим испытать расходомеры на максимальном расходе. Для каждой из выборок был рассчитан коэффициент вариации по экспериментальным данным согласно формуле (4.7).

С целью проведения моделирования для экспериментальных данных была построена модель позволяющая провести оценку сверху значений коэффициента вариации в диапазоне измеряемого расхода. Модель была построена по предложенной формуле (3.4) (в приложении формула Г.6 дублирована для наглядности), значения коэффициентов приведены в таблице Г.3.

$$K(f) = l_1 + l_2/(f - f_{\text{мин}}), \quad (\text{Г.6})$$

Таблица Г.3 - Коэффициенты модели коэффициента вариации для разных ДУ, графически модели представлены на рисунке Г.1

ДУ	l_1	l_2	$f_{\text{мин}}$
25	4	10	5,0
32	4	10	2,5
50	4	10	0,5

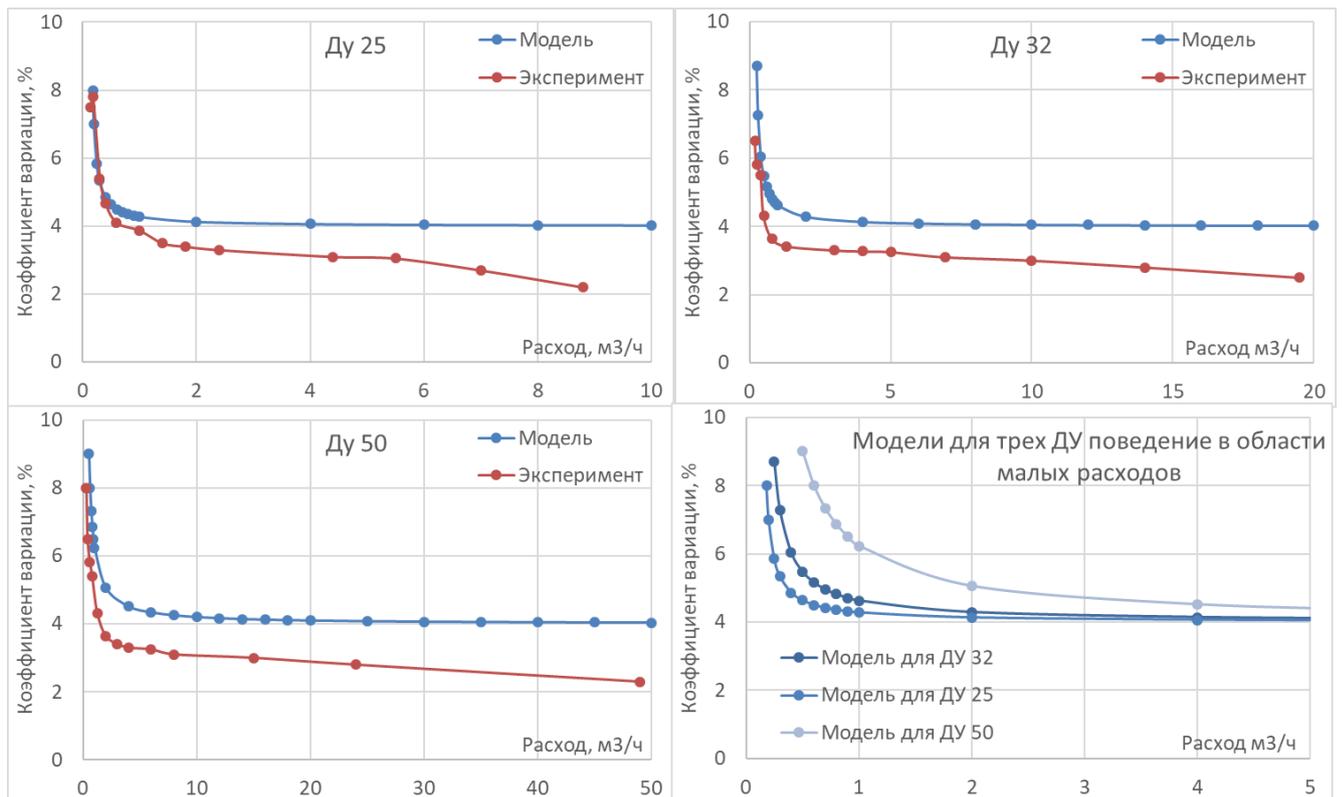


Рисунок Г.1 –экспериментальных данных и модель коэффициента вариации в диапазоне измеряемых расходов

Проведенные исследования позволили подтвердить тот факт, что в области малых расходов стабильность вихреобразования ухудшается по сравнению с основным диапазоном измерения вихреакустических расходомеров. В ходе экспериментов установлено что при стабильном расходе в измерительной линии коэффициент вариации значений мгновенных частот у исследуемых вихреакустических расходомеров не превышает 8%. Показано, что предложенная модель может предоставить оценку сверху получаемых значений коэффициента вариации.

ПРИЛОЖЕНИЕ Д РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПРЕДЛАГАЕМОЙ МОДЕЛИ ФУНКЦИИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Исследованиям были подвергнуты 15 вихреакустических расходомеров (по 5 устройств 3-х типоразмеров Ду 25, 32, 50). Каждый расходомер испытывался при 12 различных режимах расходов при 7-и различных температурах измеряемой среды. Конструкционные особенности проточных частей расходомеров отражены в таблице Д.1.

Таблица Д.1 – Конструкционные особенности испытываемых расходомеров

Параметр	Ду 25	Ду 32	Ду 50
D , м – внутренний диаметр проточной части	0.020	0.026	0.040
d , м – характерный диаметр тела обтекания	0.0054	0.0070	0.0105
θ , °C ⁻¹ – коэффициент линейного расширения стали 12Х18Н10Т	16 · 10 ⁻⁶		

На рисунках ниже представлено сравнение результат использования простой модели функции преобразования не учитывающей зависимость объемного расхода от температуры измеряемой среды $Q(f) = k_1 \cdot f + k_2$ (что отражает классический подход к ФП вихревого расходомера [67, 25]) и разработанной модели функции преобразования:

$$Q(f, t) = \pi \cdot \frac{D'(t)^2}{4} \cdot d'(t) \cdot \frac{1}{a + \frac{b}{\frac{f \cdot d^2}{v(t)}}} \cdot f \quad (\text{Д.1})$$

На рисунке Д.1 приведены условные обозначения температур измеряемой среды, использованные при ображении результатов работы функций, на рисунках Д.2-Д.16. Следует отметить что синей линией на графиках показана типичная нормируемая погрешности расходомеров представленных на рынке.

— 30°C — 40°C — 50°C — 60°C — 70°C — 80°C — 90°C — Допустимая погрешность

Рисунок Д.1 – Используемые условные обозначения на рисунках Д.2-Д.16

В таблице Д.2 приведены значения коэффициентов классической и предлагаемой модели, при которых были получены результаты приведенные на рисунках выше.

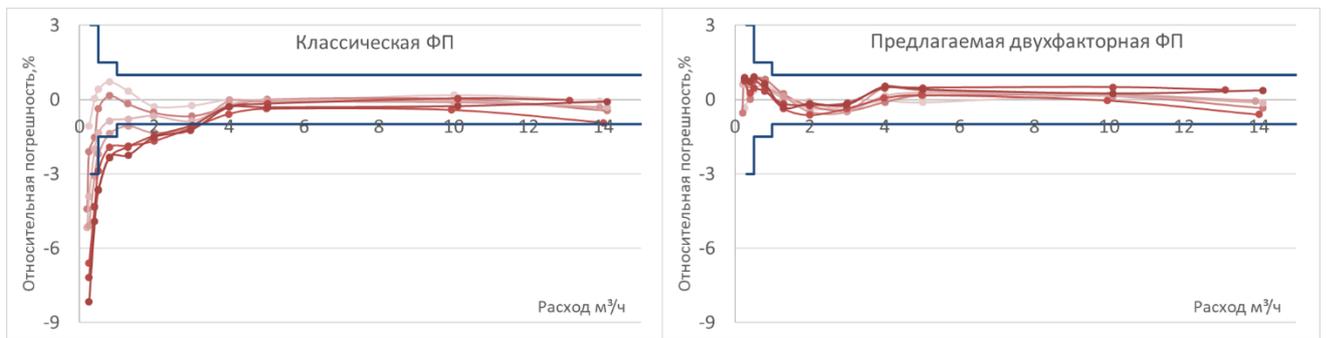


Рисунок Д.2 – Сравнение моделей ФП для расходомера ДУ32 сер. №...9419

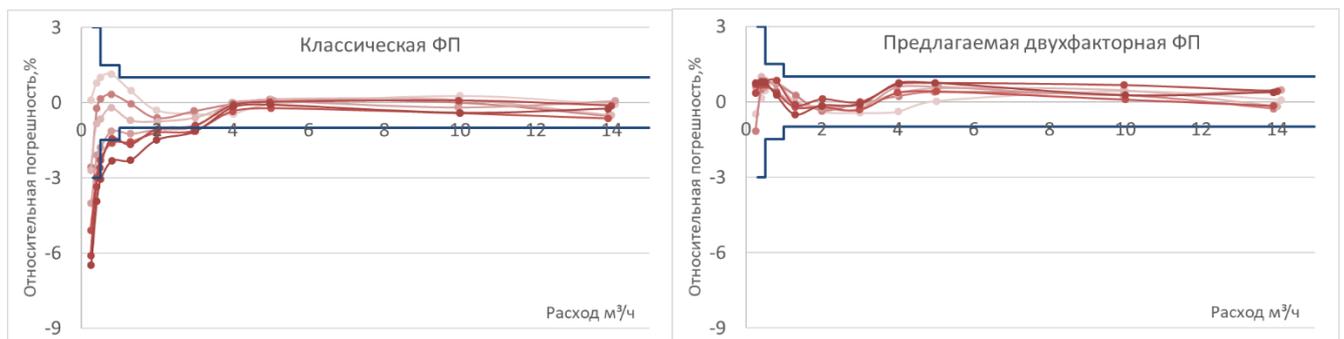


Рисунок Д.3 – Сравнение моделей ФП для расходомера ДУ32 сер. №...9420

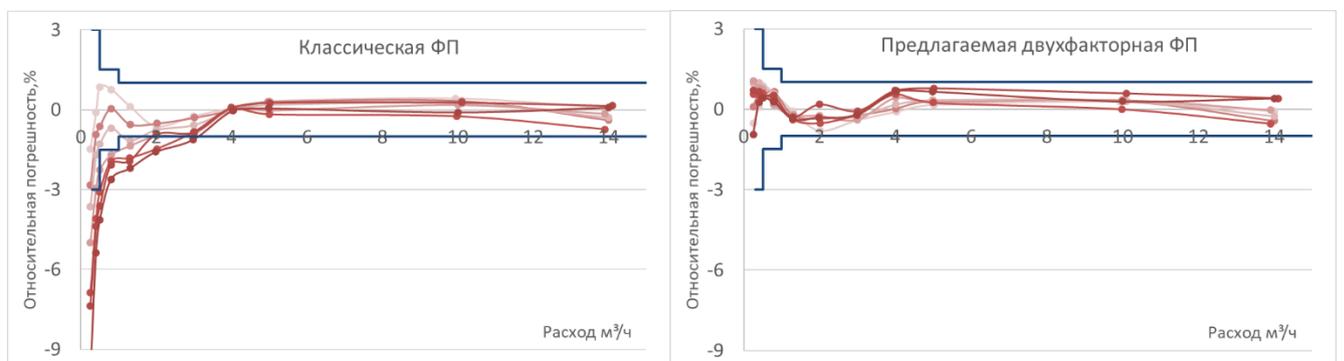


Рисунок Д.4 – Сравнение моделей ФП для расходомера ДУ32 сер. №...9421

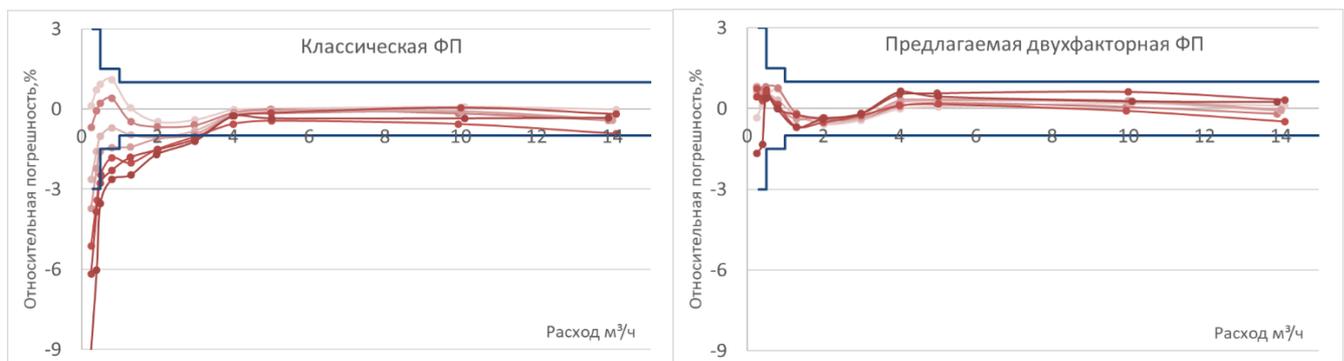


Рисунок Д.5 – Сравнение моделей ФП для расходомера ДУ32 сер. №...9422

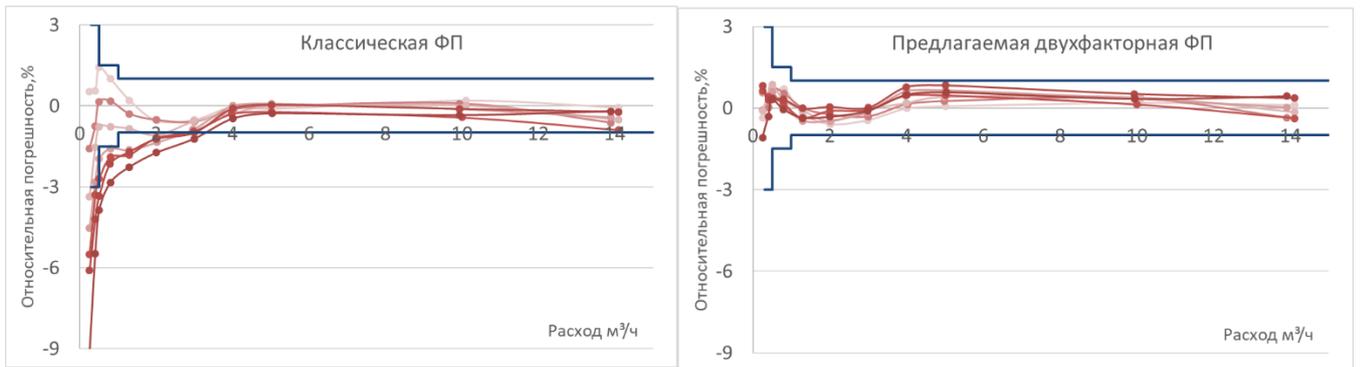


Рисунок Д.6 – Сравнение моделей ФП для расходомера ДУ32 сер. №...9423

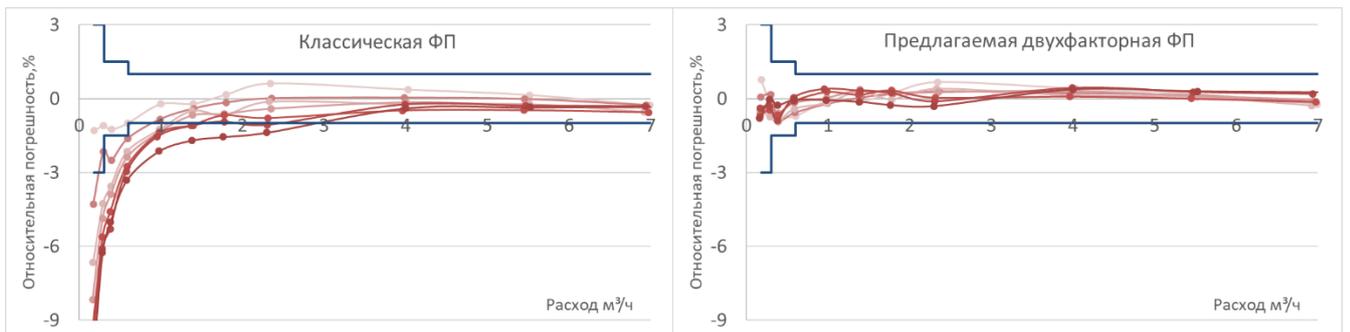


Рисунок Д.7 – Сравнение моделей ФП для расходомера ДУ25 сер. №...9414

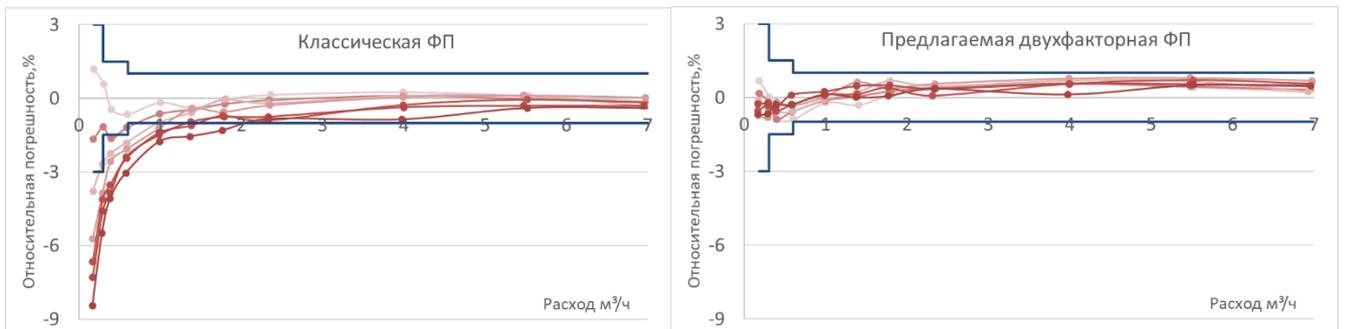


Рисунок Д.8 – Сравнение моделей ФП для расходомера ДУ25 сер. №...9415

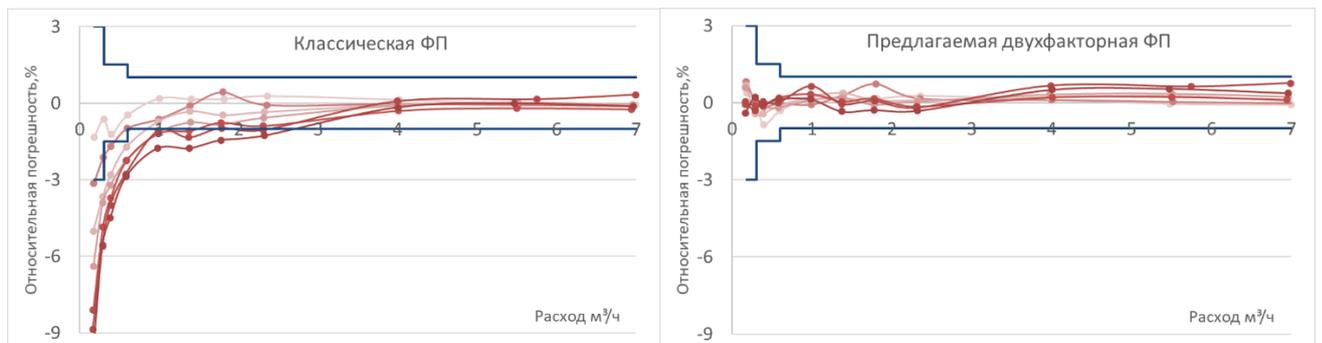


Рисунок Д.9 – Сравнение моделей ФП для расходомера ДУ25 сер. №...9416

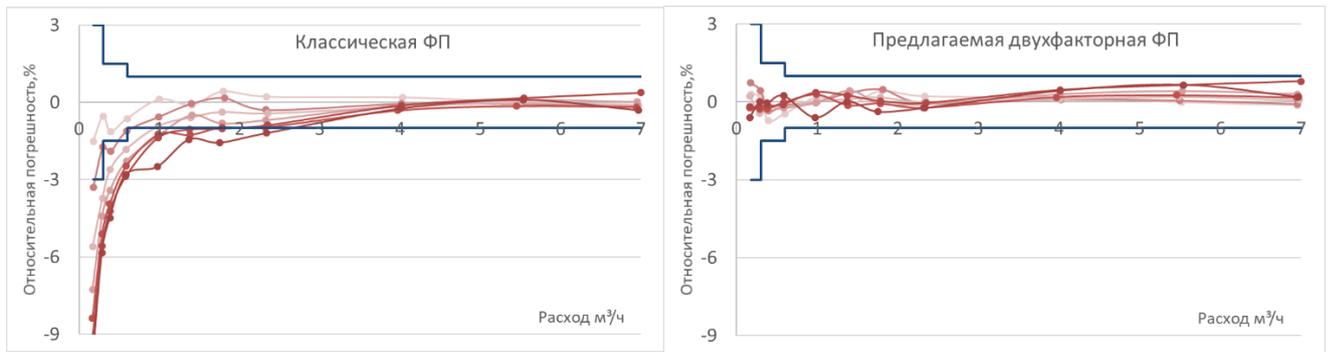


Рисунок Д.10 – Сравнение моделей ФП для расходомера ДУ25 сер. №...9417

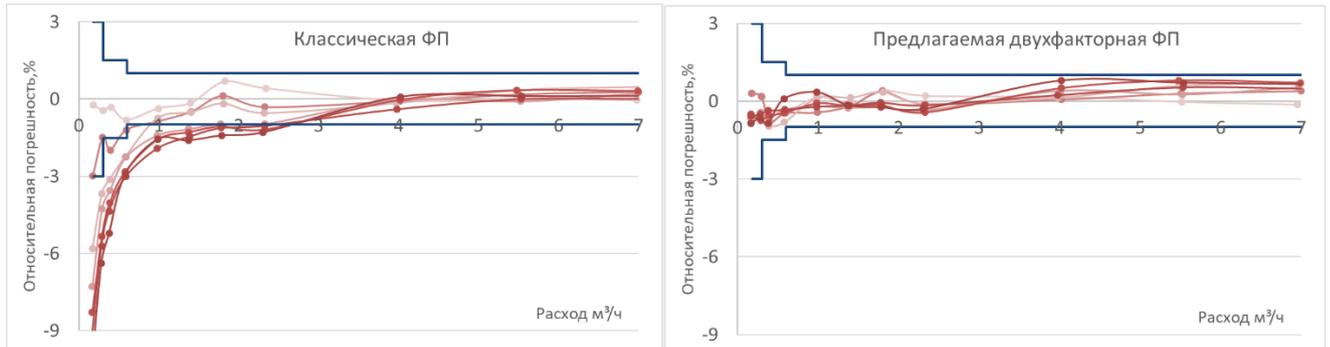


Рисунок Д.11 – Сравнение моделей ФП для расходомера ДУ25 сер. №...9418

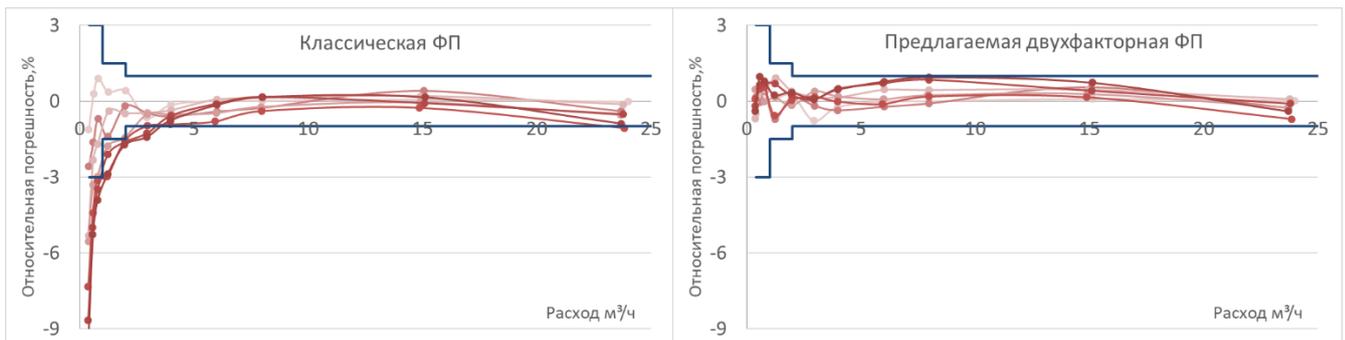


Рисунок Д.12 – Сравнение моделей ФП для расходомера ДУ50 сер. №...9424

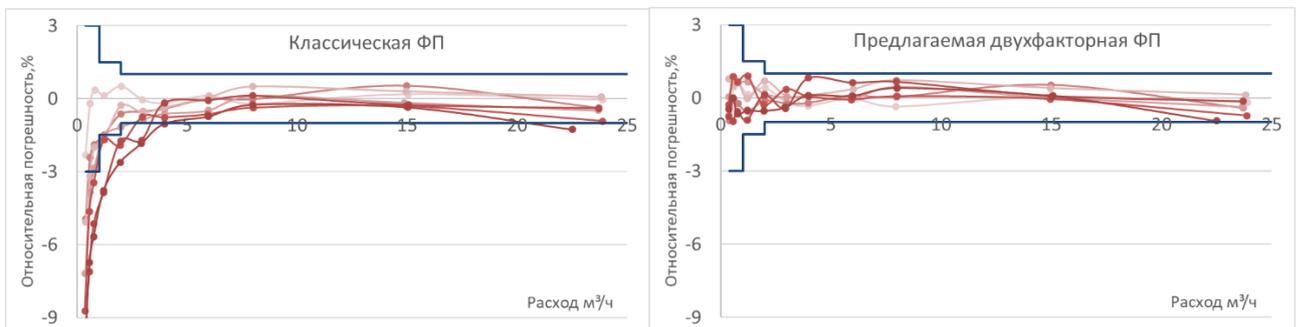


Рисунок Д.13 – Сравнение моделей ФП для расходомера ДУ50 сер. №...9425

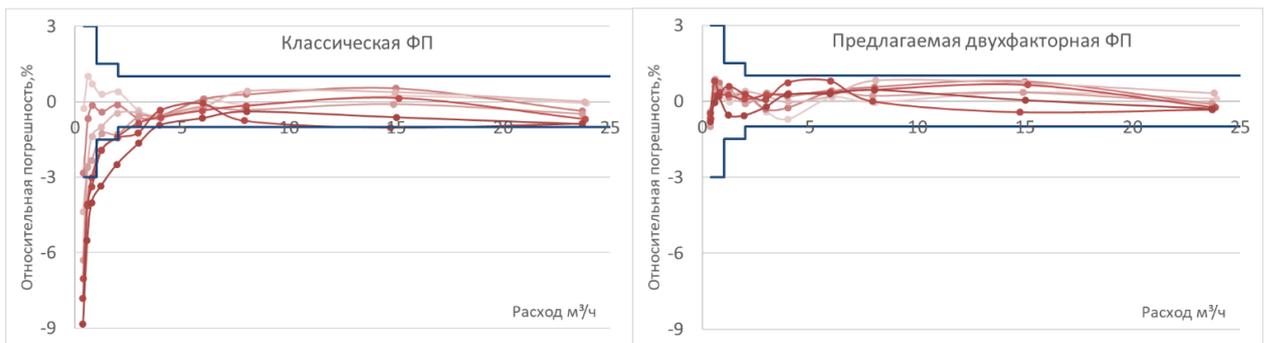


Рисунок Д.14 – Сравнение моделей ФП для расходомера ДУ50 сер. №...9426

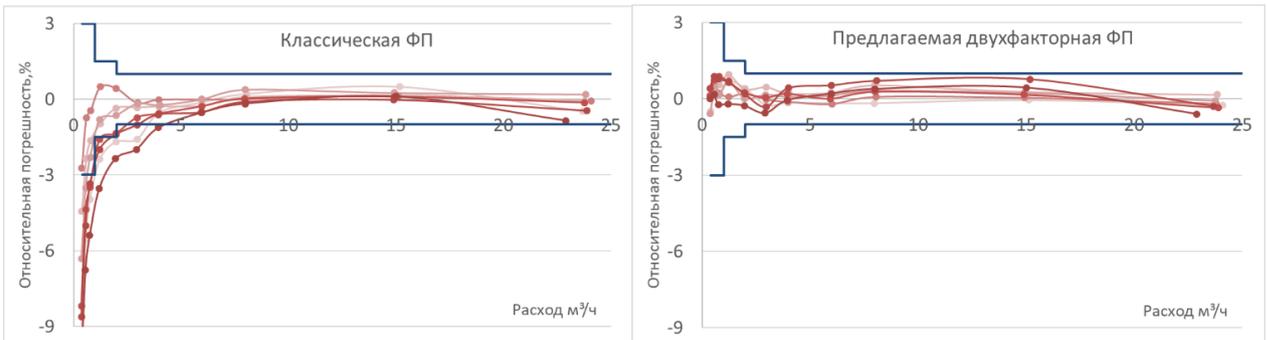


Рисунок Д.15 – Сравнение моделей ФП для расходомера ДУ50 сер. №...9427

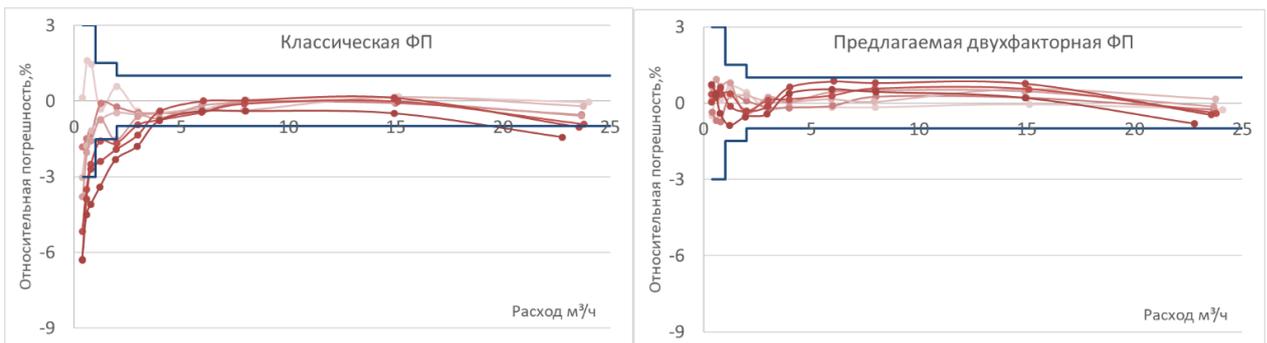


Рисунок Д.16 – Сравнение моделей ФП для расходомера ДУ50 сер. №...9428

Таблица Д.2 – Значение коэффициентов модели для исследованных расходомеров

Ду	Сер. номер	Коэф. Предлагаемой модели		Коэф классической модели	
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>k1</i>	<i>k2</i>
25	3009414	0.2475	11.000	0.0247	-0.0297
	3009415	0.2475	10.799	0.0246	-0.0241
	3009416	0.2492	10.275	0.0245	-0.0276
	3009417	0.2465	10.053	0.0248	-0.0278
	3009418	0.2470	11.275	0.0247	-0.0285
32	3009419	0.2472	11.192	0.0541	-0.0364
	3009420	0.2470	10.700	0.0541	-0.0312
	3009421	0.2476	10.911	0.0540	-0.0344
	3009422	0.2458	10.821	0.0544	-0.0320
	3009423	0.2460	11.669	0.0543	-0.0339
50	3009424	0.2366	11.554	0.2007	-0.0617
	3009425	0.2387	11.001	0.1994	-0.0653
	3009426	0.2385	10.629	0.1989	-0.0549
	3009427	0.2365	10.372	0.2013	-0.0659
	3009428	0.2393	10.110	0.1981	-0.0495

ПРИЛОЖЕНИЕ Е ПАТЕНТ РФ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **2 717 701** (13) **C1**(51) МПК
G01F 1/32 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
G01F 1/32 (2020.01)

(21)(22) Заявка: 2019128486, 10.09.2019

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
10.09.2019Дата регистрации:
25.03.2020Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 10.09.2019

(45) Опубликовано: 25.03.2020 Бюл. № 9

Адрес для переписки:
454003, г. Челябинск, Новоградский пр-кт, 15,
Крымской Тамаре Алиевне

(72) Автор(ы):

Богданов Владимир Дмитриевич (RU),
Дружков Александр Михайлович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Акционерное общество "Промышленная
группа "Метран" (RU)(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 2478916 C2, 10.04.2013. WO
2018183377 A1, 04.10.2018. DE 102011050716 B4,
24.01.2013. US 7487686 B2, 10.02.2009.

(54) Способ измерения объемного расхода в вихревых расходомерах

(57) Реферат:

Изобретение относится к измерительной технике и может быть применено в вихревых счетчиках расходомерах для измерения объемного расхода с использованием вихрей Кармана. Способ измерения объемного расхода в вихревых расходомерах заключается в создании в измерительном канале счетчика регулярной последовательности вихрей, регистрации каждого вихря в виде электрического импульса, измерении текущих значений частоты f следования импульсов, а также температуры и давления вещества, вычислении косвенным способом текущего значения кинематической вязкости вещества ν : для жидкости - по температуре, для газа или пара - по температуре и давлению. Вычисление объемного расхода Q производится в соответствии с выражением $Q=f \cdot C / Sh$, с использованием измеренной частоты вихрей f , постоянного коэффициента C , равного геометрической константе измерительного канала и рассчитанного текущего значения числа Sh Струхала на основе линейризованного выражения зависимости числа Sh от обратного значения безразмерного числа Ro , что позволяет

расширить диапазон и повысить точность измерения расходов. Коэффициенты a и b для линейризованной зависимости $Sh(1/Ro)$ определяются методом наименьших квадратов при калибровке вихревого расходомера по заданным реперным точкам расхода. Объем W протекшего вещества определяется как произведение суммы импульсов, зафиксированных за время измерения, на вес импульса, $W=\Sigma N \cdot P_i$, при этом вес импульса, поступающий на выход счетчика расходомера, может иметь любое заданное фиксированное значение, равное объему вещества. Использование для расчета расхода линейризованного выражения для числа Sh Струхала вида $Sh=a+b/Ro$, как линейной зависимости числа Sh от обратного значения безразмерного числа Ro , коэффициенты a и b которой вычисляются с помощью метода наименьших квадратов, позволяет расширить диапазон измерения для вихревых расходомеров для заданной погрешности измерения. Оно же дает возможность уйти от вычисления текущего значения Sh через аппроксимирующую

RU 2 717 701 C 1

RU 2 717 701 C 1

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж АКТ ВНЕДРЕНИЯ



Акционерное общество
«Промышленная группа «Метран» (АО «ПГ «Метран»)

Проспект Новоградский, 15
Челябинск, Российская Федерация, 454003

Т (351) 799-51-52, Ф (351) 799-55-90

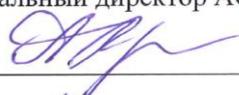
www.Metran.ru, www.Emerson.ru/Automation

ИНН 7448024720, ОГРН 1027402540065, КПП 745301001

МЕТРАН

УТВЕРЖДАЮ:

Генеральный директор АО «ПГ «Метран»

 Глазырин А.А.

« 1 » октября /2020

на № 01.10.2020 № 169/АД
от _____

АКТ О ВНЕДРЕНИИ

Результатов диссертационного исследования

Настоящим удостоверяется, что результаты научно - исследовательской работы Дружкова Александра Михайловича, в частности алгоритм поиска модели функции преобразования методом поэлементного анализа, а также адаптивный алгоритм обработки информации о частоте вихреобразования применялись в деятельности Глобального инженерного центра АО ПГ «Метран» (г.Челябинск) при реализации проекта «Новая платформа вихреакустического расходомера Метран 300-305».

Операционный директор
Measurement Solutions в регионе СНГ



А.В. Дружинин