

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра компьютерной физики и метаматериалов
на базе Саратовского филиала Института радиотехники
и электроники им. В. А. Котельникова РАН

**ДАТЧИК ИЗГИБАЮЩЕГО МОМЕНТА
ДЛЯ ВИХРЕВОГО РАСХОДОМЕРА ЖИДКОСТИ И ГАЗА**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Петровой Марии Тимофеевны,
студента 4 курса, 4022 группы,
направления подготовки 03.03.02 Физика
Института физики

Научный руководитель
д.ф.-м.н. профессор

В.В. Петров

Заведующий кафедрой
компьютерной физики и метаматериалов
на базе Саратовского филиала Института радиотехники
и электроники им. В. А. Котельникова РАН
д.ф.-м.н. профессор

В.М. Аникин

Саратов 2021 г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Расходомеры (счетчики) количества веществ являются важными элементами систем измерения энергопотребления и контроля технологических процессов в различных отраслях промышленности и в жилищно-коммунальном хозяйстве[1-5]. На сегодняшний день наиболее универсальными и популярными являются расходомеры, в которых осуществляется метод, основанный на измерении перепада давления на сужающем устройстве. Но их недостатком является квадратичная зависимость перепада давления от расхода и значительная погрешность, достигающая 3-5% в нижней части диапазона.

Цель настоящей работы является экспериментальное изучение датчика изгибающего момента для вихревых расходомеров жидкости и газа, а также литературный обзор на вихревые расходомеры.

В связи с этим актуальной является **задача** разработки и практического применения такого метода, который может конкурировать по универсальности с методом измерения перепада давления, но обеспечивать более высокую точность измерений в широком динамическом диапазоне. Вихревые расходомеры перспективны для решения этой проблемы, они уже нашли широкое применение для контроля расхода жидкости, газа и пара и обеспечивают около 5% мирового рынка приборов учета расхода.

Предмет, а также объект исследования в данной работе – конструкции, технические характеристики и области применения пьезоэлектрических датчиков, применяемых в вихревых расходомерах различных российских производителей.

К числу **новых (защищаемых) результатов** относятся: собранный, в ходе эксперимента, экземпляр датчика изгибающего момента для вихревых расходомеров, также результаты его проверки.

Достоверность результатов подтверждается сравнением полученных результатов проверки датчика с ТЗ, использованием современных алгоритмов и аппаратуры.

Практическая значимость работы обусловлена использованием результатов выпускной квалификационной работы при разработке расходомеров жидкости и газа.

Структура ВКР. Выпускная квалификационная работа (ВКР) содержит введение, шесть глав, заключение, список использованных источников (18 наименований) и 9 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводится обоснование актуальности темы настоящей работы, сформулированы цель и задачи исследования, показаны научная новизна и практическая значимость работы.

В первой, обзорной по характеру главе, рассмотрены понятие вихревой расходомер и его принцип работы. Вихревые расходомеры предназначены для измерения объемного и массового расхода жидкостей, газов и паров. Блок выполнен в виде цилиндрического корпуса с отсеками для смотрового окна и разъемов. В корпусе имеются кабельные вводы и адаптер для преобразователя. В общем виде (рис. 1.2), вихревой расходомер включает в себя: первичный преобразователь и вторичный преобразователь (электронный блок или конвертер).



Рис.1.2 Общие элементы конструкции вихревых расходомеров

Принцип действия. Тело обтекания, обычно, в виде трапеции в сечении, находящееся в потоке, проходящее по вихревому расходомеру, создает сменяющиеся вихри, представляющие две вихревые дорожки. Эта система вихрей называется вихревой дорожкой Кармана. Частота вихрей f в первом приближении пропорциональна скорости потока v и зависит от безразмерного критерия Sh (число Струхалия) и ширины тела обтекания d :

$$f = Sh \cdot v / d^1$$

Поток обходит острые выступы турбулизатора тем самым формирует завихрения. Область низкого давления, которая образуется в центре каждого завихрения, способствует дальнейшему созданию силового напряжения, которое уже воспринимается турбулизатором. До образования первого завихрения давление по обе стороны турбулизатора одинаково, но в результате формирования завихрения с одной стороны турбулизатора образуется об-

¹ . Богуш М.В., Пикалев Э.М. Проектирование пьезоэлектрических датчиков изгибающего момента для вихревых расходомеров газа и пара // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика, 2008, №3.

ласть низкого давления, а наличие областей низкого и высокого давления в месте установки турбулизатора приводит к появлению режима перепада давления. В результате режима перепада давления турбулизатор потока оказывается под воздействием силового напряжения то с одной, то с другой стороны, в соответствии с переменной последовательностью формирования завихрений. Другими словами, нагрузка или напряжение воспринимается турбулизатором потока то с одной, то, с другой стороны. [5]

Во второй главе рассмотрен датчик изгибающего момента. Предназначены такой датчик для регистрации частоты вихрей, образующихся в потоке жидкости, газа или пара за телом обтекания. Датчик изгибающего момента для вихревых расходомеров газа или пара, устанавливаемый в трубопроводе за телом обтекания, порождающим в потоке газа или пара цепочку вихрей. Данное изобретение содержит полый цилиндрический металлический корпус, который оканчивается с одной стороны клиновидным крылом (лопаткой), а с другой стороны герметичным вводом с коаксиальным кабелем, имеет экранированный и центральный проводники, соединенные с пьезоэлектрическим узлом, расположенным внутри корпуса. Пьезоэлектрический узел представляет собой две разнесенные в пространстве параллельные металлизированные по плоскостям пьезоэлектрические пластины, которые жестко зафиксированы между собой со стороны торцов узких граней с помощью кольцевого и Н-образного фиксаторов, к металлизированным поверхностям каждой из пластин присоединены проводники коаксиального кабеля, причем сумма длины пластин и толщины кольца совпадает с глубиной цилиндрической полый части металлического корпуса, а расстояние между внешними металлизированными поверхностями пластин, ширину пластин, зазор между внутренней поверхностью металлического корпуса датчика и краем внешней металлизированной поверхности пьезоэлектрической пластины выбирают из определенных условий. К металлизированным поверхностям пьезоэлектрических пластин со стороны кольцевого фиксатора может быть присоединён либо экранированный проводник коаксиального кабеля, либо центральный. Экранированный проводник коаксиального кабеля может быть дополнительно соединён с корпусом.

В третьей главе работы применение вихревого расходомера в промышленности. Расходомеры находят широкое применение во всех областях промышленности, где требуется измерить поток жидкости или газа. Самыми распространенными областями являются:

- добыча полезных ископаемых и дополнительных продуктов (например, попутный нефтяной газ - ПНГ);
- транспортировка жидкостей и газов по магистральным или распределительным трубопроводам;
- дозирование жидкостей или газов в технологических процессах;
- внутризаводская/внутристанционная циркуляция жидкостей и газов;

- технологические измерения (например, хладагента в системах охлаждения и теплоснабжения);

В настоящее время главным потребителем расходомеров является нефтегазовая отрасль. Помимо нефтегазовой отрасли можно выделить следующие ключевые отрасли-потребители расходомеров:

- химическая отрасль;
- тепловые, электрические и комбинированные станции;
- водоподготовка, водоснабжение и водоотведение;
- пищевая промышленность;
- фармацевтическая промышленность;
- целлюлозно-бумажная промышленность;
- металлургия;
- машиностроение;
- сельское хозяйство.

В четвертой главе рассмотрены современные пьезоэлектрические датчики для вихревых расходомеров и методы их анализа. Современные пьезоэлектрические датчики давления характеризуются малыми габаритами. Диаметр мембраны, как правило, не превышает 5–7 мм, а в отдельных образцах — 1–2,5 мм.

Собственная резонансная частота – от 100 до 500 кГц. Особенностью датчиков ведущих зарубежных фирм является также высокое сопротивление изоляции внутренних электрических цепей, составляющее 10¹¹–10¹³ Ом. Благодаря этому диапазон рабочих частот составляет от долей Гц до сотен кГц и градуировка их проводится высокоточным статическим методом. Нелинейность функции преобразования датчиков давления не превышает ±1–2%, а для образцовых датчиков ± 0,3%. Это достигается за счет применения стабильных кристаллических ПЭ, высокоточного исполнения геометрии мембраны и всех силовых элементов (СПЭ).

Принцип действия пьезоэлектрических датчиков основан на уравнениях пьезоэффекта. Уравнения состояния пьезоэлектрической среды выводятся из выражений для термодинамических потенциалов, которые представляются в виде разложения в степенные ряды по соответствующим независимым переменным, определяющим внешние механические, электрические или тепловые воздействия. Если в качестве независимых переменных использовать механические напряжения, электрическое поле и изменение температуры, то уравнения прямого и обратного пьезоэффекта в матричной форме имеют вид:

$$S_i = s_{ij}^{\varepsilon T} \sigma_j + d_{mi}^{T\varepsilon} \mathcal{E}_m + \beta_i^{\varepsilon\sigma} \Delta T;$$

$$D_m = d_{mi}^{T\varepsilon} \sigma_i + \varepsilon_{mk}^{\sigma T} \mathcal{E}_k + \chi_m^{\varepsilon\sigma} \Delta T;$$

В пятой главе рассмотрены методы и средства измерения расхода. Существует следующая классификация методов измерения по тем физическим законам, которые лежат в основе принципа действия этих устройств:

- объемный метод;
- метод переменного и постоянного перепада давления (дросселирующие устройства и расходомеры обтекания);
- метод скоростного напора (напорные трубки);
- метод переменного уровня (щелевые расходомеры);
- тепловой;
- ультразвуковой;
- электромагнитный;
- тахометрический;
- инерциальный;
- оптический.

В шестой главе своей работы провела экспериментальные исследования характеристик датчиков для вихревых расходомеров. В которые входят:

1. Измерение электрической емкости

- С помощью измерителя электрической емкости измерить емкости между центральным проводником и экраном каждого кабеля. Результаты измерений C_1 и C_2 занести в протокол.
- Вычислить относительную разницу электрических емкостей $\delta C(\%)$ по формуле:
- $\delta C = |(C_1 - C_2) / (C_1 + C_2)| \cdot 100\%$, где C_1 и C_2 – электрические емкости каналов датчика.
- Датчик считается прошедшим испытания, если величины C_1 , C_2 и δC удовлетворяют требованиям ТЗ.

2. Измерение коэффициента преобразования

- Проверку проводить на стенде (рисунок 1), используя измерительную схему, представленную на рисунке 2.
- Включить осциллограф цифровой и произвести настройку:
 - - напряжение – постоянное;
 - - амплитуда = 0.2 В/дел;
 - - время развёртки = 5 сек/дел.
- Подключить буферный усилитель ПКАД.411519.001 (в дальнейшем – усилитель, см. приложение А) к осциллографу.
- Закрепить датчик на штативе с помощью зажима таким образом, чтобы крыло датчика было ориентировано горизонтально.
- Подключить кабели датчика к усилителю.

- Надеть на крыло датчика планку-рычаг с подвешенным грузом.
- Запустить развёртку на осциллографе. Поднять рукой груз для получения импульсов на экране осциллографа (см. рисунок 6.3).
- По осциллограмме определить амплитуды сигналов U_1 , U_2 .

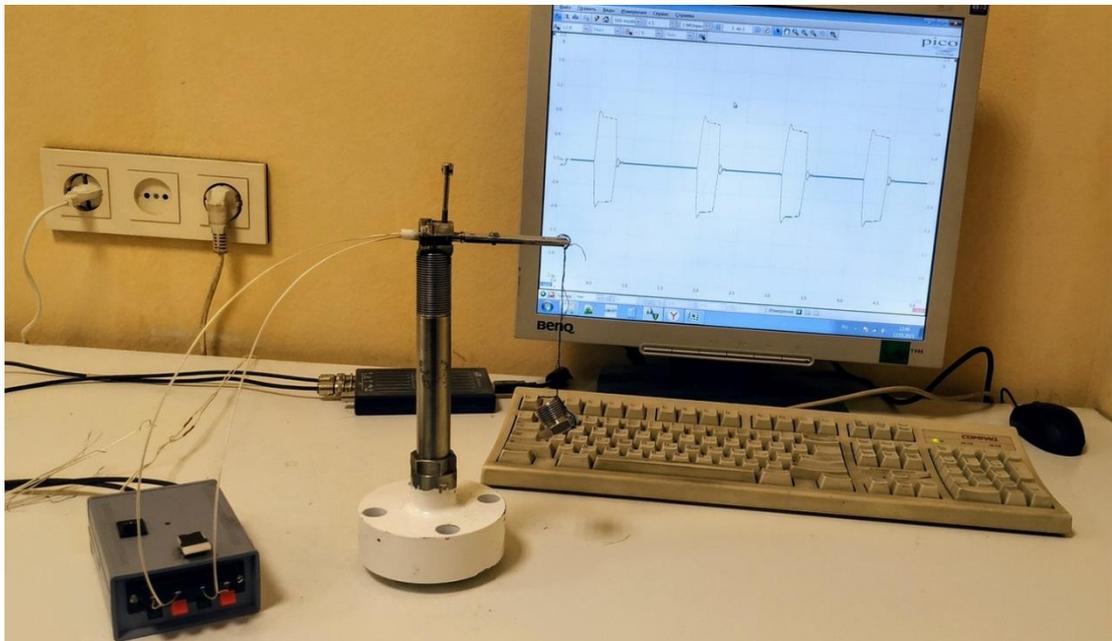


Рисунок 1 - Стенд для проверки коэффициента преобразования датчиков

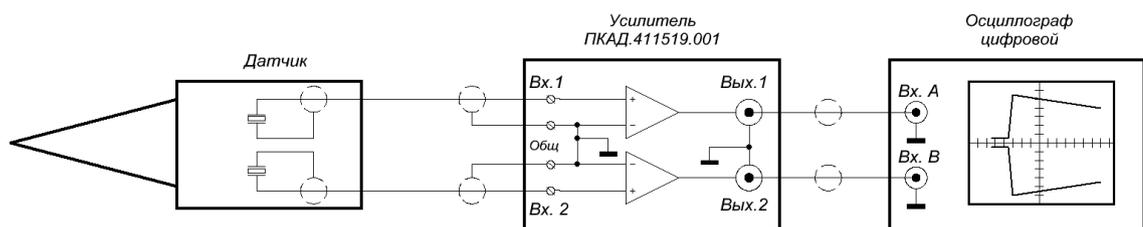


Рисунок 2 - Измерительная схема для определения коэффициента преобразования датчи-

КОВ

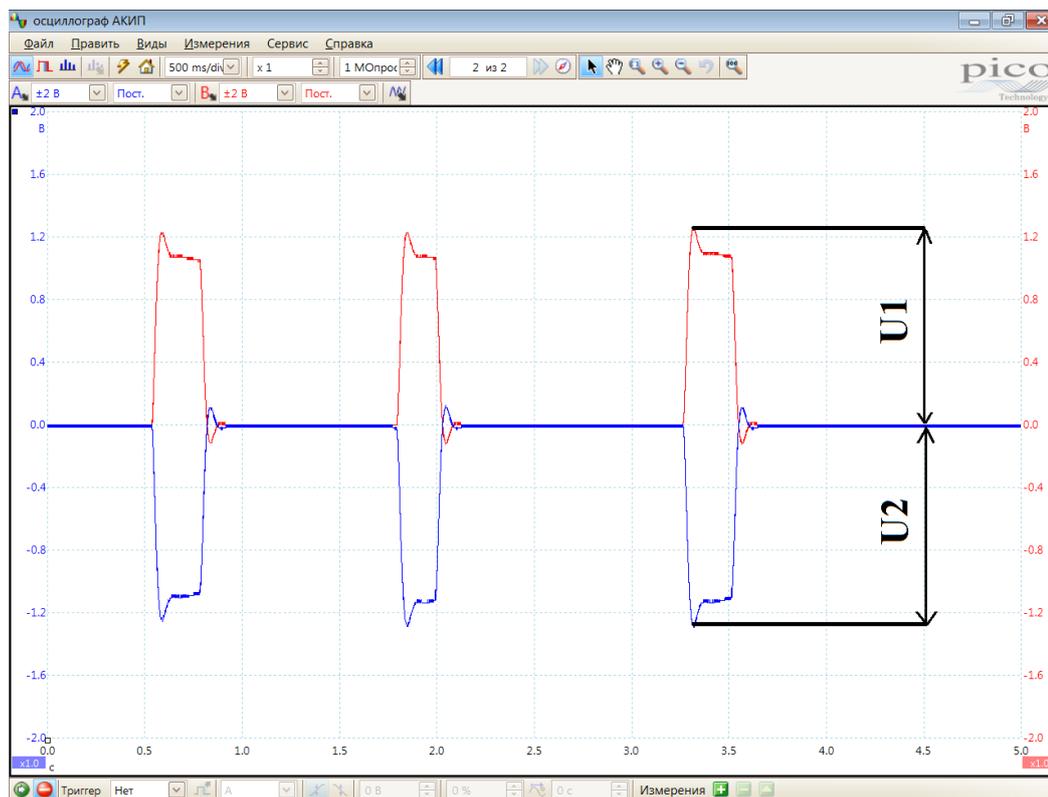


Рисунок 3 - Измерение амплитуды импульсов

- Повторить измерения не менее трех раз, перед каждым измерением кратковременно замыкая входы усилителя нажатием кнопки «Сброс». Результаты измерений записать в протокол.
- Рассчитать относительную разность амплитуд электрических сигналов секций датчика $\delta U[\%]$ по формуле:

$$\delta U = |(U_1 - U_2) / (U_1 + U_2)| \cdot 100\%$$

Произвести расчет коэффициента преобразования датчика $K_{II}[\text{нКл/Н}\cdot\text{м}]$ по формуле:

$$K_{II} = 10^3 \cdot [U_1 \cdot (C_1 + C_{вх}) + U_2 \cdot (C_2 + C_{вх})] / (m \cdot g \cdot L \cdot K_u),$$

где

U_1 и U_2 [В] – амплитуды электрических сигналов каналов датчика;

C_1 и C_2 [пФ] – электрические емкости каналов датчика;

$C_{вх} = 2 \cdot 10^4$ [пФ] – электрическая емкость входа усилителя;

m [г] – масса груза;

$L = (l+d)$ [мм] – плечо приложенной силы;

l, d [мм] – длины крыла датчика и планки-рычага соответственно (см. рисунок 1);

$g=9,8$ м/с² – ускорение свободного падения;

$K_u=10$ – коэффициент усиления усилителя.

Выводы

В ходе выполнения дипломной работы была изучена конструкция датчиков изгибающего момента для вихревых расходомеров жидкости и газа, проведены экспериментальные исследования характеристик датчиков, в частности: емкости и коэффициента преобразования и оценена чувствительность. Также был проведен литературный обзор на расходомеры, в том числе вихревые, изучены их принципы работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований были получены экспериментальные результаты, которые могут быть использованы для анализа особенностей работы датчиков изгибающего момента и улучшения их рабочих характеристик: повышение точности измерений, не внося изменений в конструкцию. Алгоритмические методы повышения точности требуют лишь изменения программы работы встроенного в расходомер микроконтроллера, что весьма удобно с экономической стороны.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, 1975, 776 с
2. Богуш М.В. Пьезоэлектрические датчики для экстремальных условий эксплуатации // Пьезоэлектрическое приборостроение: Сборник. В 3 т. Т. 3. Ростов н/Д: Издательство СКНЦ ВШ, 2006, 346 с.
3. Кулаков М.В. "Технологические измерения и приборы для химических производств", М.:Машиностроение.-1983.
4. Богуш М.В., Пикалев Э.М. Проектирование пьезоэлектрических датчиков изгибающего момента для вихревых расходомеров газа и пара // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика, 2008, №3.
5. Справочное пособие "Приборы измерения расхода, давления, уровня", АГТУ,1999
6. Богуш М.В., Пикалев Э.М. Оценка допустимых условий эксплуатации пьезоэлектрических датчиков изгибающего момента для вихревых расходомеров газа и пара // Из-

- вестия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2008, №5, с. 50-54.
7. Богуш М.В. Проектирование пьезоэлектрических датчиков на основе пространственных электроупругих моделей // Пьезоэлектрическое приборостроение. Т. IX. Техносфера, М., 2014, 312 с.
 8. Шишмарев В.Ю. Средства измерений. - Учебник для студентов - 3-е изд., стер. - Москва, Академия, 2009. - 320 с.
 9. Нубарян С.М. Контрольно-измерительные приборы в теплотехнических измерениях. - Курс лекций. - Харьков: ХНАГХ, 2006. - 283с
 10. Лепявко А.П. Расходомеры и счётчики жидкости и газа. - Учебное пособие - Москва: АСМС, 2005. - 98 с.
 11. Лепявко А.П. Расходомеры переменного перепада давления. - Учебное пособие - Москва: АСМС, 2004. - 106 с.
 12. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества веществ: Справочник. - СПб.: Политехника, 2002. - 409 с.
 13. Расходомеры и счётчики количества веществ. Справочник. -- Изд. 5-е, пер. и доп.. - - СПб.: Машиностроение, 2002.
 14. Авторы патента: Рогожин С. С., Петров В. В., Лапин С. А., Вельмогин А. М., Петров А. В., Костарев Е. В. Патент № 2709430 «Датчик изгибающего момента для вихревых расходомеров».
 15. Измерение расхода и количества жидкости и газов методом переменного перепада давления. Под ред. А. Б. Васильева. -- Минск: Изд-во стандартов, 1997.
 16. Конспект лекций по дисциплине "Измерительные преобразователи", доц. Лунеев Д.Е.
 17. Дивин А.Г. Методы и средства измерений, испытаний и контроля. - Тамбов: ТГТУ, 2012. - 108 с.
 18. Мазин В.Д. Метрология и теплотехнические измерения. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. - 77 с.