

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. Измерения чувствительности**

АВТОРЕФЕРАТ

ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ  
студента 4 курса 432 группы  
направления 03.03.02 «Физика»  
физического факультета  
Багдасаряна Нвера Левовича

Научный руководитель

Профессор,

д.ф.-м.н., профессор

\_\_\_\_\_

Петров В.В.

Зав. кафедрой

профессор, д.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_

Аникин В.М.

Саратов 2019

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Расходомеры (счетчики) количества вещества являются важными элементами систем учета потребления энергоресурсов и управления технологическими процессами в различных отраслях промышленности и жилищно-коммунальном хозяйстве. Наиболее универсальными и востребованными до настоящего времени являются расходомеры, в которых реализуется метод, основанный на измерении перепада давления на сужающем устройстве. Но его недостатком является квадратичная зависимость перепада давления от расхода и значительная погрешность, достигающая в нижней части диапазона 3-5%.

**Цели и основные задачи работы.** В связи с этим актуальной является задача разработки и практической реализации такого метода, который мог бы конкурировать по универсальности с методом измерения перепада давления, но обеспечивал более высокую точность измерений в широком динамическом диапазоне. Перспективными для решения этой задачи являются вихревые расходомеры, которые в настоящее время уже нашли широкое применение для контроля расхода жидкости, газа и пара и обеспечивают около 5% мирового рынка приборов учета расхода.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

**В первой главе** рассмотрены понятие вихревой расходомер и его принципы работы. Вихревые расходомеры (рис. 1) предназначены для измерения объемного и массового расхода жидкостей, газов и пара. Расходомеры состоят из блока электроники и первичного преобразователя. Блок выполнен в виде цилиндрического корпуса с отсеками для смотрового

окна и разъемов. На корпусе расположены кабельные вводы и переходник для преобразователя. На рисунке 1 представлена структурная схема вихревого расходомера.

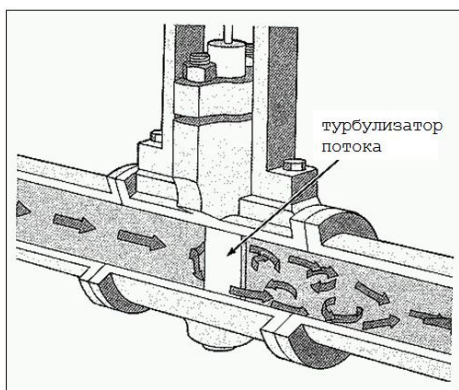


Рис.1 Схема вихревого расходомера

Принцип работы. В вихревых расходомерах для создания вихревого движения на пути движущего потока жидкости, газа или пара устанавливается обтекаемое тело, обычно, в виде трапеции в сечении. Образовавшаяся за ним 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  $d$ :

$$f = Sh \cdot v / d [3]$$

Поток обходит острые выступы турбулизатора, формируя завихрения. Область низкого давления, образующаяся в центре каждого завихрения, способствует дальнейшему созданию силового напряжения, воспринимаемого турбулизатором. До формирования первого завихрения давление по обе стороны турбулизатора одинаково, но в результате формирования завихрения с одной стороны турбулизатора образуется область 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.

**Во второй главе** рассмотрен датчик изгибающего момента для высокотемпературных вихревых расходомеров. Отличительная особенность данного датчика изгибающего момента, используемого в вихревых расходомерах жидкости, заключается в том, что во внутреннюю полость пьезоэлемента введены контактные элементы в виде двух цилиндрически изогнутых металлических пластинок, отделенных друг от друга пластинкой изолятора, предварительно соединенных с проводниками кабеля точечной сваркой, установленных внутрь пьезокерамического цилиндра и прижимаемых к его электродам силами упругости, обеспечивающими электрический контакт электродов пьезоэлемента с кабелем и линией связи. Технический результат - повышение границы рабочего диапазона температур (рис.2).

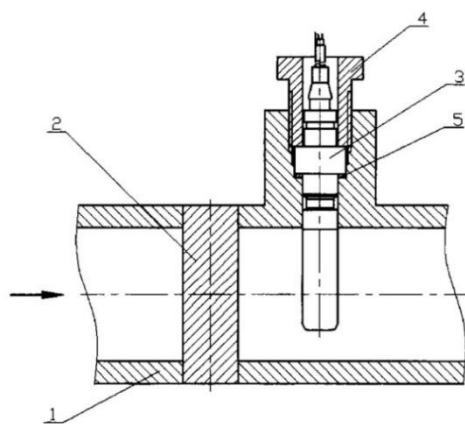


Рис. 2. Схема вихревого расходомера с датчиком изгибающего момента  
1. Трубопровод; 2. Тело обтекания; 3. Датчик 108; 4. Штуцер; 5. Прокладки

Изобретение используется в вихревых расходомерах жидкости, газа или пара и предназначено для регистрации частоты вихрей, образующихся в потоке жидкости, газа или пара за телом обтекания. Известно, что за телом обтекания в потоке жидкости, газа или пара образуется цепочка вихрей, так называемая вихревая дорожка Кармана, причем частота образующихся

вихрей пропорциональна скорости потока жидкости, газа или пара, поэтому регистрация частоты вихрей позволяет измерить скорость потока и, следовательно, расход жидкости, газа или пара в трубопроводе.

**В третьей главе**, где применяется вихревой расходомер 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);
- промышленные выбросы и очистка.

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;
- микроэлектронная промышленность;
- целлюлозно-бумажная промышленность;
- металлургия;
- машиностроение;
- сельское хозяйство.

**В четвертой главе** мною рассмотрены современные пьезоэлектрические датчики для вихревых расходомеров и их методы. 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 10<sup>11</sup>–10<sup>13</sup> 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:

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

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

Рис. 3 Уравнения прямого и обратного пьезоэффекта в матричной форме

**В пятой главе** - методы и средства измерения частоты колебаний возникающие в жидкости и газе. 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;
- маркерный.

В шестой главе в ходе практики были рассмотрены измерения чувствительности датчика изгибающего момента.

#### **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  $\delta C$  удовлетворяют требованиям ТЗ.

#### **Измерение коэффициента преобразования**

- Проверку проводить на стенде (рисунок 6.1), используя измерительную схему, представленную на рисунке 6.2.

- Включить осциллограф цифровой и произвести настройку:
- - напряжение – постоянное;
- - амплитуда = 0.2 В/дел;
- - время развёртки = 0,2...1 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 4).
- По осциллограмме определить амплитуды сигналов  $U1, U2$ .

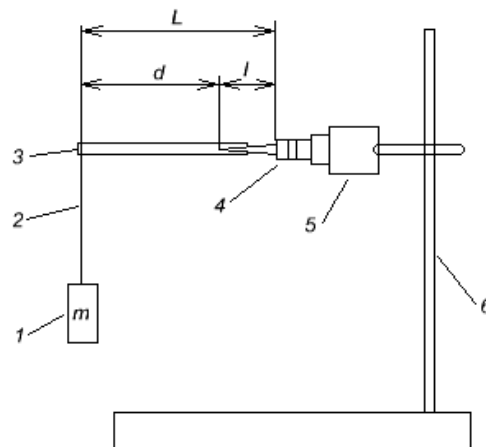


Рисунок 4 - Стенд для проверки коэффициента преобразования датчиков

1 – груз, 2 – подвес, 3 – планка-рычаг, 4 – датчик, 5 – зажим, 6 –штатив

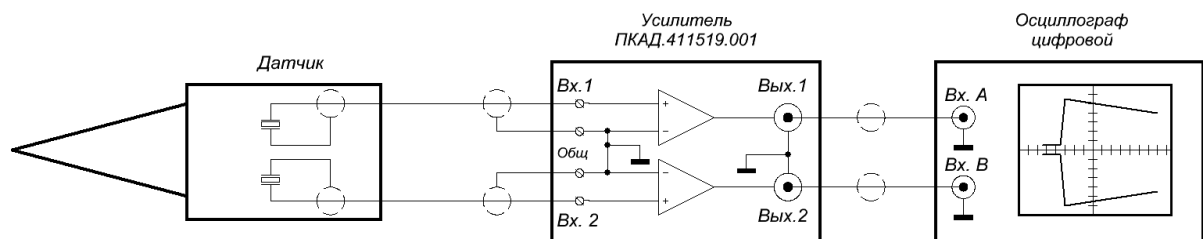


Рисунок 5 - Измерительная схема для определения коэффициента преобразования датчиков



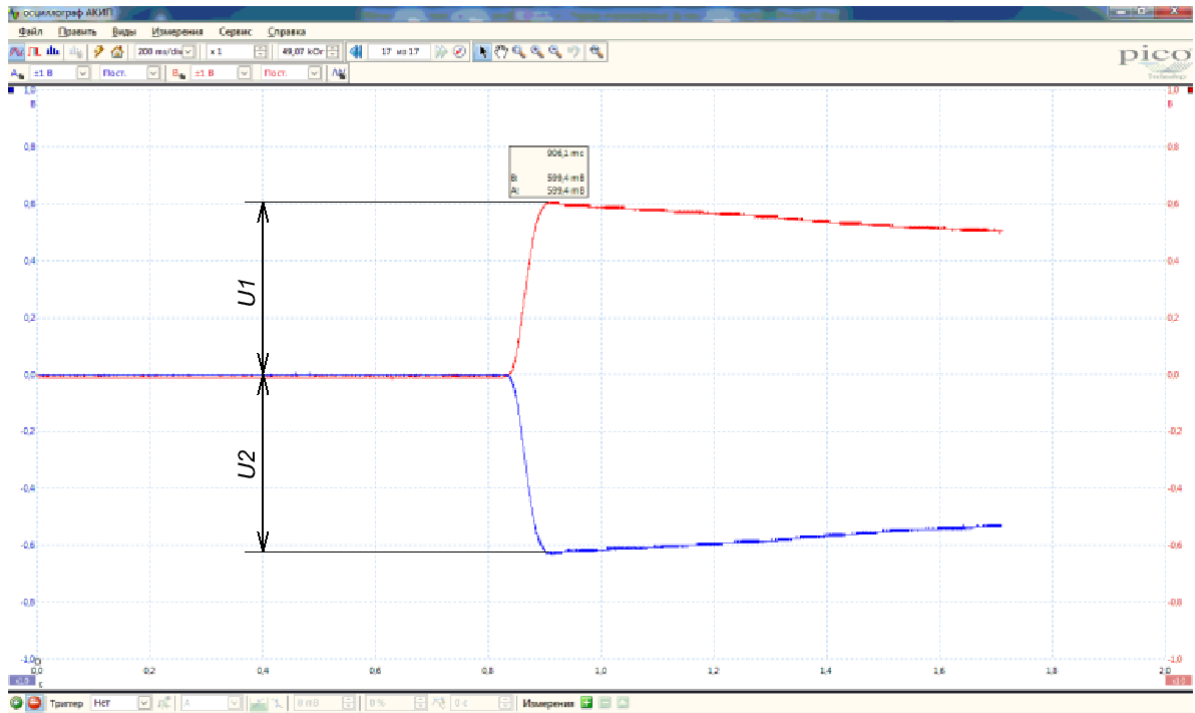


Рисунок 6 - Измерение амплитуды импульсов

- Повторить измерения не менее 3-х 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  $K_{II}$  [нКл/Н·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/с<sup>2</sup> – ускорение свободного падения;

$K_u = 10$  – коэффициент усиления усилителя.

Измерение коэффициента преобразования экспериментального образца датчика

Измеренные параметры:

$L=50$ мм

$m=30$ г

$U_1=0.61$  В

$U_2=0.63$  В

$C_1=1100$  мФ

$C_2=1050$  мФ

Рассмотренное значение коэффициента преобразования

$$K_n = 125 \frac{\text{нКл}}{\text{Н} * \text{м}}$$

## ВЫВОДЫ

В ходе выполнения дипломной работы были экспериментально определены (измерены) коэффициенты преобразования датчиков изгибающего момента для вихревых расходомеров и оценена их чувствительность.

В работе были приведены методы, которые за счёт детального анализа конструкции и принципа работы вихревого расходомера позволяют повысить точность его измерения, не внося изменений в его конструкцию. Алгоритмические методы повышения точности требуют лишь изменения

программы работы встроенного в расходомер микроконтроллера, что весьма целесообразно экономически.

Результаты выпускной квалификационной работы могут быть использованы при разработке расходомеров жидкости и газа.

### **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 // Известия 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. Конспект лекций по дисциплине "Измерительные преобразователи", доц. Лунеев Д.Е.
9. Дивин А.Г. Методы и средства измерений, испытаний и контроля. - Тамбов: ТГТУ, 2012. - 108 с.

10. Мазин В.Д. Метрология и теплотехнические измерения. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. - 77 с.
11. Шишмарев В.Ю. Средства измерений. - Учебник для студентов - 3-е изд., стер. - Москва, Академия, 2009. - 320 с.
12. Нубарян С.М. Контрольно-измерительные приборы в теплотехнических измерениях. - Курс лекций. - Харьков: ХНАГХ, 2006. - 283с
13. Лепявко А.П. Расходомеры и счётчики жидкости и газа. - Учебное пособие - Москва: АСМС, 2005. - 98 с.
14. Лепявко А.П. Расходомеры переменного перепада давления. - Учебное пособие - Москва: АСМС, 2004. - 106 с.
15. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества веществ: Справочник. - СПб.: Политехника, 2002. - 409 с.
16. Расходомеры и счётчики количества веществ. Справочник. -- Изд. 5-е, пер. и доп.. -- СПб.: Машиностроение, 2002.
17. Измерение расхода и количества жидкости и газов методом переменного перепада давления. Под ред. А. Б. Васильева. -- Минск: Изд-во стандартов, 1997.