

ВЫБОР МОДЕЛИ ФУНКЦИИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ВИХРЕАКУСТИЧЕСКИХ РАСХОДОМЕРОВ

А.П. Лапин, А.М. Дружков

SELECTION OF A MODEL FOR CONVERSION FUNCTION OF VORTEX SONIC FLOWMETERS

A.P. Lapin, A.M. Druzhkov

Использование алгоритмических методов коррекции погрешности предполагает знание функции преобразования расходомера. Авторами проведен выбор и исследование однофакторной модели функций преобразования вихреакустических расходомеров. Показана необходимость перехода от однофакторной функции преобразования к двухфакторной модели.

Ключевые слова: вихреакустические расходомеры, функция преобразования.

The use of algorithmic methods for errors correction implies the knowledge of conversion function of flowmeters. The author selects and analyzes one-factor model for conversion function of vortex sonic flowmeters. The necessity for transfer from one-factor conversion function to two-factor model is shown.

Keywords: vortex sonic flowmeters, conversion function.

Введение

В настоящее время существует острая потребность в измерении расхода жидкости – от нефтегазовой и химической отраслей промышленности до сферы ЖКХ. Для измерения расхода жидкости в тяжелых условиях эксплуатации широкое распространение нашли вихревые расходомеры с ультразвуковым детектированием [1], которые получили название вихреакустических расходомеров. Большинство расходомеров имеют малую точность измерения на малых расходах, вихреакустические расходомеры не являются исключением.

Построение расходомеров, как систем основанных на микроконтроллерах, позволяет перейти от схемотехнических решений к алгоритмическим методам коррекции погрешности. Повышение точности измерения связано в первую очередь с правильным выбором функции преобразования (ФП) расходомера.

Постановка задачи

Уменьшение погрешности измерения малых расходов жидкости путем выбора и обоснования функции преобразования является перспективным

методом, так как дает увеличение точности измерения без изменения конструкции расходомера.

Задача выбора модели функции преобразования решается в три этапа.

1. Этап выбора структуры функции преобразования представляет неформализованную процедуру. Выбор вида модели функции преобразования производится на основе априорной информации о средстве измерения и опыта исследователя.

2. Вторым этапом является выбор критерия близости объекта исследования и математической модели.

3. На третьем этапе происходит определение параметров модели, оптимальных с точки зрения выбранного критерия близости.

Наибольшую сложность вызывает выбор структуры модели. Основополагающие работы в области построения ФП измерительных приборов [2–4] не дают однозначных путей решения проблемы. Выбор модели можно осуществить путем детального изучения объекта исследования (вихреакустического расходомера). Для этого необходимо подробное рассмотрение физических принципов его работы. Построение модели может быть проведено с помощью квадратичного критерия

Лапин Андрей Павлович – канд. техн. наук, доцент кафедры информационно-измерительной техники, Южно-Уральский государственный университет; a_lapin@mail.ru
Дружков Александр Михайлович – аспирант кафедры информационно-измерительной техники, Южно-Уральский государственный университет; sandruzh@gmail.com

Angrey Pavlovich Lapin – Candidate of Science (Engineering), associate professor of Information and Measuring Technology Department of South Ural State University; a_lapin@mail.ru
Alexander Mikhailovich Druzhkov – postgraduate student of Information and Measuring Technology Department of South Ural State University; sandruzh@gmail.com

близости, реализуемого методом наименьших квадратов. Кроме того важной задачей является нахождение общей модели ФП для марки расходомеров, подходящей для всех типоразмеров.

Выбор и обоснование модели функции преобразования

В вихреакустическом расходомере реализован вихревой метод измерения расхода. Этот метод основан на явлении Ван Кармана: при обтекании неподвижного твердого тела потоком жидкости за телом образуется вихревая дорожка. В качестве тела обтекания применяются плохо обтекаемые тела, а детектирование вихрей производится с помощью ультразвукового луча. Образование вихрей происходит поочередно на противоположных ребрах тела обтекания. При этом частота образования вихрей прямо пропорциональна скорости потока. Важными чертами этого явления являются стабильность и высокая периодичность вихрей [5]:

$$f = S_t \frac{v}{d}, \tag{1}$$

где f – частота образования вихрей Кармана (Гц); S_t – число Струхала (эмпирическая величина, определенная геометрией расходомера и свойствами среды); v – скорость потока среды (м/с); d – ширина тела обтекания (м).

Из формулы (1) видно, что, определив частоту образования вихрей, возможно найти среднюю скорость потока среды, следовательно, и объемный расход среды. Вихревые расходомеры работают в области регулярного упорядоченного образования вихрей. Упорядоченное образование вихрей начинается только с определенного порога. Оценить турбулентность потока жидкости можно с помощью безразмерного параметра – числа Рейнольдса. В вихревых расходомерах используется тот эффект, что в определенном диапазоне чисел Рейнольдса число Струхала (S_t) практически равно константе, благодаря чему получается, что коэффициент преобразования частоты вихреобразования в объемный расход становится не зависящим ни от плотности, ни от вязкости измеряемой среды [5].

Из вышеуказанного следует, что объемный расход можно представить в виде однофакторной функция преобразования, зависящей от частоты вихреобразования. Причем эта функция должна

иметь простой вид и структуру, близкую к линейной. В литературе [3] предлагается список наиболее часто используемых однофакторных моделей.

Проведенные исследования

Данные для исследований были получены с реального производства вихреакустических расходомеров крупного приборостроительного предприятия. Исследованы датчики расхода различных типоразмеров с диаметрами условного прохода (Ду) от 32 до 300 мм.

Задача нахождения функции преобразования, общей для расходомеров определенного типоразмера, решалась следующим образом. Для каждого типоразмера на основе исследования некоторого количества расходомеров выяснялось, какая из моделей (табл. 1) в лучшей степени может служить ФП вихреакустического расходомера. Выбор наилучшей модели производился на основе минимума остаточной дисперсии.

В результате исследований было показано, что наилучшей моделью для каждого исследуемого типоразмера расходомеров может выступать линейная модель вида (2) с различными значениями коэффициентов:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x. \tag{2}$$

Данная модель обладает наименьшей дисперсией, чем все остальные исследуемые модели (табл. 2). Выбранная линейная модель хорошо согласуется с теоретическим обоснованием принципа работы вихреакустических расходомеров.

Данные для исследований расходомеров были собраны за год, но поскольку проливочный стенд находится внутри помещения, наблюдалось незначительное колебание температуры жидкости, примерно 10–12 °С. Построенная линейная модель справедлива для той температуры, при которой проводились испытания, то есть не учитывает температуру измеряемой среды, и является однофакторной.

Согласно теории расход жидкости должен быть прямо пропорционален частоте срыва вихрей, и не зависеть ни от плотности, ни от вязкости, ни от температуры измеряемой среды [5]. Однако анализ моделей, полученных при различных температурах измеряемой среды, показал, что существует зависимость значения коэффициента b_0 от температуры. Было отмечено, что с ростом температуры измеряемой среды значения коэффициента

Таблица 1

Исследуемые модели ФП

№ п.п.	Модели ФП	№ п.п.	Модели ФП	№ п.п.	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	$y = b_0 + b_1 x^n$

Выбор модели функции преобразования вихреакустических расходомеров

b_0 увеличиваются, значения коэффициента b_1 существенно не изменялись.

Для проверки статистически значимой связи между значениями температуры измеряемой среды и значениями коэффициентов модели необходимо исследовать их корреляцию. Был использован ранговый критерий Спирмана [6]. Согласно этому критерию вычислены коэффициенты корреляции между выборками значений коэффициентов и соответствующими им температурами. Связь признается статистически значимой, если коэффициент корреляции больше соответствующего квантиля распределения Спирмана [6].

Из табл. 3 следует, что коэффициент b_0 обладает статистически значимой связью с температурой измеряемой среды, а связь коэффициент b_1 слабо выражена. Вышеупомянутый факт свидетельствует об аддитивном характере влияния температуры на расход и обосновывает необходимость использования двухфакторной модели ФП расхода в зависимости от частоты срыва вихрей и температуры измеряемой среды.

Заключение

В результате проведенных исследований вихреакустических расходомеров с различными типо-

Таблица 2

Дисперсии моделей ФП для расходомеров различных типоразмеров

№	Модель ФП	Ду32	Ду 50	Ду 80	Ду 100	Ду 250	Ду 300
1	$y = b_0 + b_1 / x$	22,28	146,34	421,89	1008,480	13775	10872
2	$y = 1 / (b_0 + b_1 x)$	113,46	614,70	1867,83	5355,417	85069	110051
3	$y = x / (b_0 + b_1 x)$	0,05	0,10	0,12	0,087	2,15	11,48
4	$y = b_0 \cdot b_1^x$	17,24	46,50	81,28	208,64	6646,75	6411,11
5	$y = b_0 \cdot e^{b_1 x}$	17,23	46,52	81,30	208,65	6646,75	6411,11
6	$y = 1 / (b_0 + b_1 e^{-x})$	62,07	314,80	757,02	1868,21	338451	461071
7	$y = b_0 \cdot x^{b_1}$	0,03	0,12	0,29	0,15	2,21	7,41
8	$y = b_0 + b_1 \cdot \lg x$	6,34	43,85	124,50	294,73	4290,95	3267,93
9	$y = b_0 / (b_1 + x)$	113,46	614,71	1867,83	5355,42	85069	110051
10	$y = b_0 \cdot x / (b_1 + x)$	82,14	399,35	1056,94	2726,03	35325	32545
11	$y = b_0 \cdot e^{b_1/x}$	19,24	141,35	407,74	943,63	11348	7704,27
12	$y = b_0 + b_1 x$	1,65E-04	3,84E-04	8,02E-04	2,62E-03	1,08E-01	2,90E-01
13	$y = b_0 + b_1 x^2$	2,48	8,202	16,72	46,128	1238,28	1323,59

Таблица 3

Коэффициенты корреляция по критерию Спирмана

Модель для	Коэффициенты корреляции J для каждого коэффициента модели		Квантиль $J_{\alpha, (n-2)}$ при уровне значимости α	
	b_0	b_1	$\alpha=0,01$	$\alpha=0,05$
Ду 32	9,712	0,756	2,326	1,645
Ду 50	7,345	1,401	2,326	1,645
Ду 80	6,772	3,455	2,326	1,645
Ду 100	7,629	4,672	2,358	1,658
Ду 150	5,505	1,986	2,358	1,658
Ду 200	0,873	2,256	2,364	1,661
Ду 250	2,422	2,256	2,403	1,676
Ду 300	0,832	0,799	2,375	1,665

размерами было показано, что для всех типоразмеров может использоваться линейная модель одинакового вида (2), но с различными коэффициентами.

Анализ выбранной однофакторной модели показал наличие зависимости коэффициента b_0 модели ФП вида (2) от температуры измеряемой жидкости. Показано, что с целью повышения точности измерения на малых расходах необходимо выбрать двухфакторную модель ФП. Это потребует проведения специальных испытаний расходомеров на горячеводном стенде.

Также представляет интерес анализ двухфакторной модели с целью установления возможности выбора одинаковой структуры ФП для расходомеров с различным диаметром условного прохода.

Литература

1. Хоружев, Г.М. Применение вихревых расходомеров счетчиков Ирга-РВ в жестких условиях эксплуатации / Г.М. Хоружев // Датчики и системы. – 2006. – № 3. – С. 58–60.

2. Семенов, Л.А. Методы построения градуировочных характеристик средств измерений / Л.А. Семенов, Т.Н. Сирая. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 128 с.

3. Львовский, Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул: учебное пособие для вузов / Е.Н. Львовский. – М.: Высш. шк., 1988. – 239 с.

4. Грановский, В.А. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях / В.А. Грановский, Т.Н. Сирая. – Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1990. – 288 с.

5. Кремлевский, П.П. Расходомеры и счетчики количества: справочник / П.П. Кремлевский. – Л.: Машиностроение, 1989. – 701 с.

6. 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.

Поступила в редакцию 25 сентября 2012 г.