

УДК 621.121

ОСОБЕННОСТИ ОПТИМИЗАЦИИ ФОРМЫ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВИХРЕВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ РАСХОДА ЖИДКОФАЗНОЙ СРЕДЫ

И. В. КОРОБКО, В. А. КОВАЛЕНКО

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт»

Введение

Подготовка, транспортировка, распределение, потребление топливно-энергетических ресурсов и воды (ТЭРВ) непосредственно связаны с организацией их точного учета, который базируется на применении технических средств измерений, систем учета и регулировки энергопотребления. Разнообразие и сложность требований, предъявляемых к современным измерительным преобразователям расхода (ИПР) ТЭРВ, а также области их применения привели к появлению различных методов измерения. Среди них широко применяются для коммерческого учета и потребления воды в различных отраслях промышленности благодаря многим преимуществам вихревые ИПР.

Современные вихревые расходомеры и счетчики имеют достаточно высокие метрологические характеристики (погрешность в среднем составляет $\pm 0,5-1\%$) [1]. Отсутствие у данного типа ИПР движущихся частей значительно повышает их надежность и, как следствие, продлевает срок эксплуатации. В то же время более широкое использование вихревых преобразователей ограничивается характером взаимодействия потока жидкости с чувствительными элементами (ЧЭ) преобразователей. На характер данного взаимодействия оказывают влияние многочисленные факторы и параметры, одними из главных являются размер и форма ЧЭ, которые представляют собой тело обтекания (ТО).

Постановка задачи

Принцип действия ИПР и ТО базируется на фиксации вихрей, которые возникают за телом, расположенным в потоке. Частота срыва вихрей пропорциональна объемному расходу. Учитывая требования современности к ИПР, а именно: высокие точность, надежность и повторяемость результатов измерения, линейность шкалы, большой диапазон измерения и быстродействие прибора, для создания современных приборов необходимо определить рациональные значения конструктивных параметров, особенно оптимальную геометрию ТО.

Экспериментальные исследования влияния формы ТО на метрологические характеристики вихревых ИПР связаны со значительными сложностями, в частности временного и экономического плана. В то же время особой популярностью среди ученых пользуются методы численного моделирования гидродинамических процессов на технологической базе вычислительной гидродинамики CFD (Computational Fluid Dynamics), благодаря которым можно ставить эксперименты, не тратя на них много времени и средств [2]. Кроме того, во многих случаях такой способ получения информации есть единственно возможным для определения эффектов от сложного взаимодействия потока измеряемой среды и ЧЭ ИПР [3], [4].

Исследование геометрических форм тел обтекания вихревых измерительных преобразователей

Все ТО, которые используются в вихревой расходомерии, можно условно разделить на призматические и цилиндрические. Первые в поперечном сечении представляют собой многоугольник (как правило, треугольник или трапецию, реже Т-образные тела, размещенные основой навстречу потоку), вторые – кругообразные фигуры (обычно различные варианты срезанных кругов) [5]. Такие ТО образуют сильные и регулярные вихревые колебания, хотя и создают большую потерю давления [1], [3].

В современных конструкциях вихревых ИПР получили широкое применение ТО следующих геометрических форм: цилиндр, треугольная и трапециевидная призма и параллелепипед, которые и были выбраны для исследований. Во многих случаях в качестве критерия оптимальности формы ТО принимают [6]: устойчивость частоты образования вихрей при возможно меньших скоростях потока, неизменность числа Струхала Sh в рабочем диапазоне ИПР, появление кавитационных процессов при как можно больших скоростях, технологичность конструкций ТО.

В то же время кавитационное число зависит от потери давления на ТО, поэтому целесообразно рассмотреть в качестве критерия оптимальности величину потери давления [5]. Что касается технологичности конструкции, то современные технологии позволяют достаточно просто создавать ТО сложной геометрической формы. Учитывая вышесказанное, в качестве критерия оптимальности формы ТО можно взять [5]: устойчивость частоты образования вихрей при малых скоростях потока (небольших числах Рейнольдса Re), стабильность в рабочем диапазоне расхода ИПР числа Струхала Sh , которое характеризует периодические процессы, связанные с движением жидкости, и минимальные потери давления на ТО.

Анализ результатов исследований зависимости числа Струхала от числа Рейнольдса в широком диапазоне расхода жидкости [7] показывает, что для обеспечения удовлетворительного совпадения закона распределения числа Струхала с нормальным для чисел Рейнольдса отношение характерного размера ЧЭ к диаметру условного прохода D должно быть не более 0,3. Характерным размером ТО цилиндрической формы является его диаметр, для трапециевидной формы – ширина основания.

Оптимальные соотношения между характерным размером ТО d и внутренним диаметром измерительной камеры преобразователя D , при которых обеспечивается пропорциональность между расходом и частотой вихреобразования при постоянном числе Струхала Sh [3], [7] имеют следующие значения:

а) для цилиндрических ТО: $\frac{d}{D} = 0,15-0,25$;

б) для ТО в форме треугольной призмы: длина основания $l_0 = \frac{D}{3}$, а высота равнобедренного треугольника $h = \frac{D}{9}$;

в) для прямоугольного ТО: $\frac{d}{D} = 0,26$ и $\frac{h}{d} = 0,66$;

г) для ТО в форме трапециевидной призмы: $\frac{d}{D} = 0,21$ и $\frac{h}{d} = 0,57$.

Для определения рациональной формы ТО вихревых ИПР исследованы с использованием программного комплекса ANSYS CFX зависимости потери давления на преобразователе от числа Рейнольдса Re , определены значения числа Струхала Sh и устойчивая частота вихреобразования.

При численном моделировании были построены пространственные 3D модели измерительного участка трубопровода с ТО в виде цилиндра, треугольной и трапециевидной призм и параллелепипеда (табл. 1). При расчетах, полученных с 3D моделей была выбрана сетка Tet/Hybrid типа TGrid. Размер одной ячейки составлял $8 \cdot 10^{-4}$ м, что обеспечило высокую точность расчетов данной сетки, также выбрана турбулентная модель потока k -epsilon, поскольку расчеты числа Рейнольдса показывают, что во всем диапазоне измерения расхода должен быть турбулентный, по характеру протекания, поток жидкости.

Среднее значение скорости потока жидкости на участке вихреобразования задавалось равным $v_{cp} = 4,5 \cdot 10^{-2} \frac{м}{с}$, что соответствует расходу $Q = 15 \frac{м^3}{ч}$.

Геометрические параметры исследуемых ТО приведены в табл. 1.

Таблица 1

Геометрические параметры ТО

Форма ТО	Длина l , м	Ширина основания a , м	Высота b , м	Характерный размер d , м
Цилиндр	0,05	–	–	0,01
Призма	0,05	0,01	0,01	$14,3 \cdot 10^{-3}$
Параллелепипед	0,05	0,01	–	$10 \cdot 10^{-3}$
Трапеция	0,05	0,01	0,01	$12,76 \cdot 10^{-3}$

По результатам численного моделирования получены визуализированные картины течения жидкости в области взаимодействия измеряемой среды с ТО (рис. 1–4), отражающие характер обтекания неподвижных тел и вихреобразования за ними.

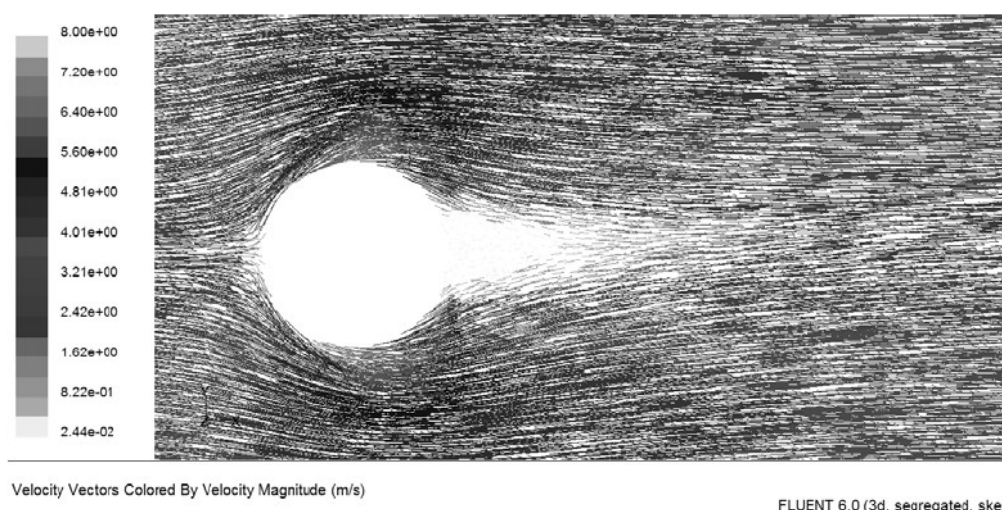
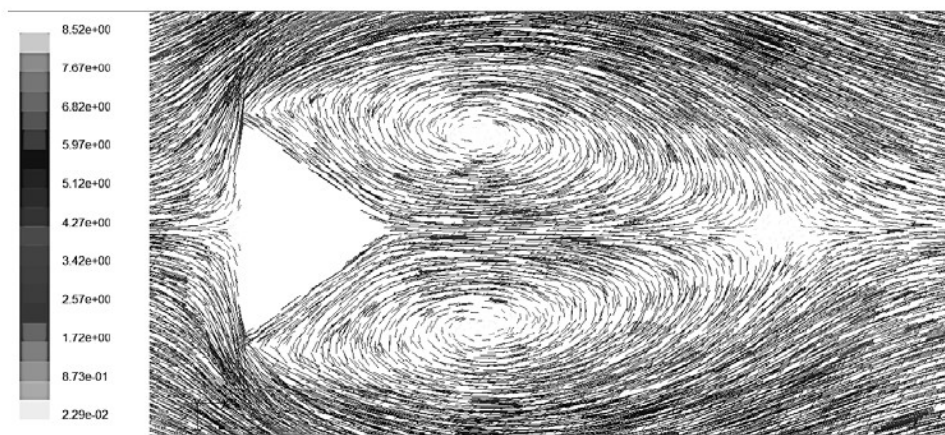


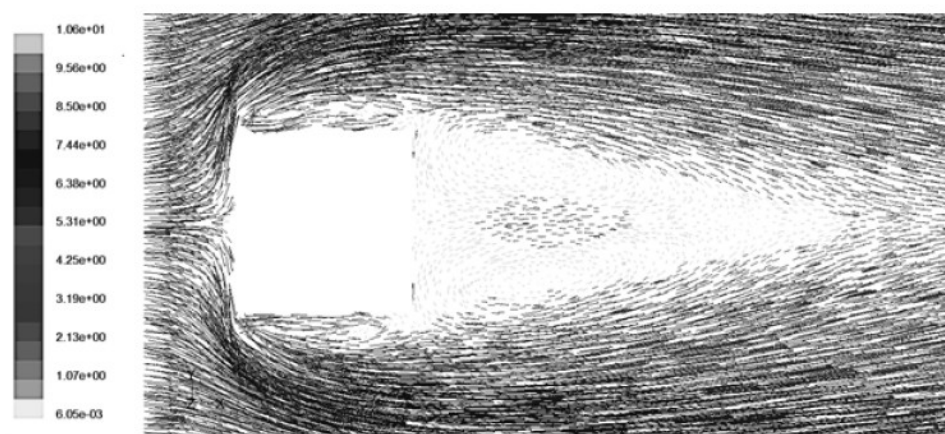
Рис. 1. Визуализированная картина течения жидкости в области взаимодействия измеряемой среды с ТО в форме цилиндра



Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude (m/s)

FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske)

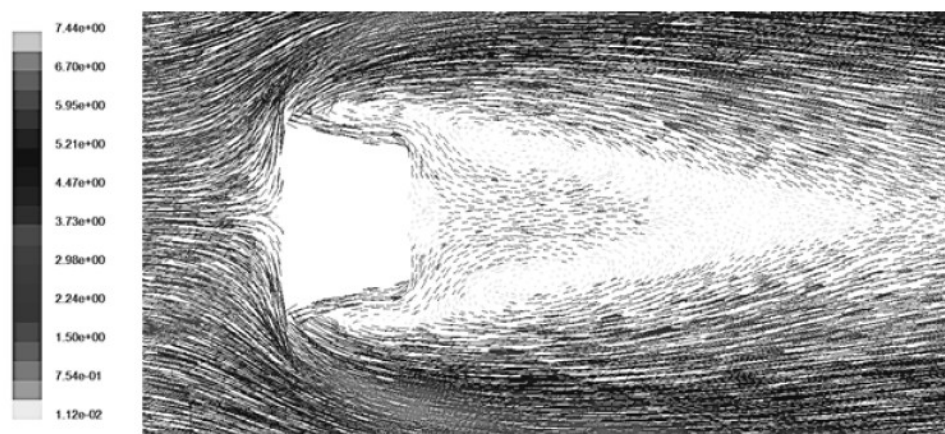
Рис. 2. Визуализированная картина течения жидкости в области взаимодействия измеряемой среды с ТО в форме треугольной трапеции



Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude (m/s)

FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske)

Рис. 3. Визуализированная картина течения жидкости в области взаимодействия измеряемой среды с ТО в форме параллелепипеда



Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude (m/s)

FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske)

Рис. 4. Визуализированная картина течения жидкости в области взаимодействия измеряемой среды с ТО в форме трапециевидной призмы

Анализ результатов численного моделирования взаимодействия жидкофазной среды с ТО цилиндрической формы (рис. 1) показывает, что после него образуются незначительные завихрения потока, которые не являются достаточно устойчивыми для обеспечения точного измерения скорости потока, а соответственно и расхода. Это указывает на отсутствие четкой точки отрыва пограничного слоя, что нарушает устойчивость частоты вихреобразования и необходимость других исходных условий (скорость потока, соотношение диаметра трубопровода к характерному размеру ТО, которым в данном случае является диаметр цилиндра). В то же время ТО цилиндрической формы получили довольно широкое применение благодаря тому, что они создают условия для уменьшения потери давления, обеспечивают устойчивость геометрической формы и легкую очистку от имеющихся в потоке примесей и включений.

Исследования ТО в форме треугольной призмы (рис. 2) показали, что после ТО образуется завихрение, но геометрические параметры этих тел не позволяют образоваться правильной дорожке Кармана с последовательным срыванием вихрей с разных сторон ТО. Необходимо отметить, что значительное влияние на вихреобразование имеет острота кантов (ребер) таких ТО, которые могут изменяться в результате изнашивания при эксплуатации (особенно при измерении агрессивных сред и веществ с абразивными примесями).

Предварительный анализ результатов исследований ТО в форме прямоугольного параллелепипеда (рис. 3) показывает, что характер обтекания зависит от ориентации данного тела относительно набегающего потока. В целом наблюдается устойчивое вихреобразование и его особенности проявляются в срыве вихрей на острых кантах препятствия в потоке, вихри образуются в достаточно четкой последовательности. В то же время необходимо отметить достаточно высокое падение давления на таком ТО.

Исследования трапециевидного ТО показывают, что за ТО образуется постоянная дорожка Кармана с последовательным срывом вихрей с обеих сторон препятствия (рис. 4).

Для более точного анализа взаимодействия жидкофазной среды с ТО были исследованы с помощью программного комплекса ANSYS CFX гидродинамические параметры потока (частота вихреобразования, скорости вдоль оси вихреобразования, число Струхалия) и падение давления на измерительном участке.

Скорость вихря можно определить по выражению [3], [4]:

$$u = \frac{\Gamma}{2\sqrt{2}l_{\text{в}}}, \quad (1)$$

где

$$\Gamma = \iint v dS = \iint \omega r \cdot r d\varphi = \omega r^2 \cdot \varphi_0^{2\pi} = 2\pi r^2 \omega; \quad (2)$$

ω – угловая частота вихря; v – скорость потока в зоне вихреобразования; $l_{\text{в}}$ – расстояние между вихрями.

Учитывая (2), выражение (1) приобретает вид:

$$u = \frac{\pi dv}{2\sqrt{2}l_{\text{в}}}. \quad (3)$$

По значению скорости образования вихрей u можно определить число Струхалия. В системе координат, в которой ТО находится в состоянии покоя, дорожка вихрей движется со скоростью, что по абсолютной величине равна $v - u$. Когда дорожка

сместится на l_b , то вся картина движения вихрей повторяется. Выражение для периода движения вихрей можно записать в виде:

$$T = \frac{l_b}{v - u}. \quad (4)$$

Учитывая зависимость (4), определим частоту вихреобразования:

$$f = \frac{v - u}{l_b}. \quad (5)$$

После преобразований выражение (5) приобретает вид:

$$f = \left(1 - \frac{u}{v}\right) \frac{dv}{l_b d}. \quad (6)$$

С другой стороны,

$$f = \text{Sh} \frac{v_2}{d}, \quad (7)$$

где v_2 – средняя скорость потока в сечении трубопровода, где установлено ТО.

С учетом (7) и (6) получим выражение для числа Струхали:

$$\text{Sh} = \left(1 - \frac{u}{v}\right) \frac{d}{l_b}. \quad (8)$$

Используя выражения (7) и (8), по результатам численного моделирования определяем частоту вихреобразования и значение числа Струхали, а также падение давления на измерительном участке (табл. 2).

Таблица 2

Сравнительная характеристика тел обтекания

Форма тела обтекания	f , Гц	Sh	ΔP , Па
Цилиндр	11,6	0,18	3321
Треугольная призма	12,04	0,2	10756
Правильный параллелепипед	18,3	0,22	12837
Трапециевидная призма	22,08	0,23	4055

Заключение

Анализируя результаты исследований ТО различных форм, можно сделать выводы, что для вихревого ИПР жидкофазной среды целесообразно использовать ТО в форме трапециевидной призмы, поскольку частота вихреобразования наибольшая при данном ТО, а также наибольшее значение числа Струхали. Кроме этого, после ТО в форме трапециевидной призмы образуется дорожка Кармана с устойчивыми характеристиками.

Поэтому вихревые расходомеры с ТО трапециевидной формы имеют лучшие метрологические характеристики и измеряют расход жидкости с высокой точностью.

Литература

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

2. Гришанова, І. А. Системи CAD/CAE. ANSYS FLUEN / І. А. Гришанова, І. В. Коробко. – К. : Дія ЛТД, 2012. – 208 с.
3. Киясбейли, Л. Ш. Вихревые счетчики-расходомеры / Л. Ш. Киясбейли, М. Е. Перельштейн. – Л. : Машиностроение, 1974. – 160 с.
4. Перельштейн, М. Е. Приборы и системы управления / М. Е. Перельштейн. – 1977. – № 1. – С. 22–24.
5. Остапів, В. В. Критерії оптимізації ТО вихорових витратомірів / В. В. Остапів, Н. М. Піндус, С. А. Чеховський // Системи обробки інформації. – 2010. – Вип. 9 (90). – С. 77–79.
6. Лурье, М. С. Тела обтекания вихревых расходомеров / М. С. Лурье, О. М. Лурье // Датчики и системы. – 2008. – № 10. – С. 21–23.
7. Маштаков, Б. П. Вихревые расходомеры с телом обтекания. Перспективы вихревой расходомерии / Б. П. Маштаков, А. В. Грикевич // Приборы и системы управления. – 1990. – № 12. – С. 24–26.

Получено 20.09.2013 г.