

# ВИХРЕВОЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА: ИСТОРИЯ ВОПРОСА И НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

*А.П. Лапин, А.М. Дружков, К.В. Кузнецова*

Статья посвящена вихревому методу измерения расхода. Расходомеры, основанные на использовании явления вихреобразования за телом обтекания, играют важную роль в мировом бизнесе измерения расхода. Представлена информация об истории возникновения вихревого метода измерения расхода, начиная с наблюдений Леонардо да Винчи в XV в., до момента создания первого коммерческого вихревого расходомера в 1967 г. Описаны физические основы явления вихреобразования и принцип работы вихревого расходомера на примере расходомера с ультразвуковым датчиком. На основе анализа научной литературы были систематизированы задачи, с которыми сталкивались исследователи в процессе конструирования расходомеров. Авторами дана оценка результатов исследований в данной области, а также рассмотрена возможность применения этих результатов для улучшения метрологических характеристик вихреакустических расходомеров. В качестве перспективных направлений были отмечены исследования по применению статистических и алгоритмических методов обработки информации в расходомерии.

*Ключевые слова:* вихревой расходомер, вихреакустический расходомер, вихревая дорожка Кармана.

## Введение

Рост цен на энергоносители приводит к увеличению спроса на средства точного измерения расхода. Все производимые расходомеры можно разделить на 2 группы: традиционные (устройства дифференциального давления) и расходомеры новых технологий. Качество таких расходомеров, как правило, в области точности и надежности работы находится на более высоком уровне, по сравнению с традиционными расходомерами. В настоящее время лидерами на рынке среди расходомеров, основанных на новых технологиях, являются Кориолисовы, ультразвуковые и вихревые расходомеры [1].

Преимуществом вихревого расходомера над двумя другими является его низкая стоимость и невысокие эксплуатационные требования. Вихревой расходомер не чувствителен к физическим свойствам жидкости, таким как плотность и вязкость, что делает его универсальным.

Вихревые расходомеры играют важную роль в мировом бизнесе измерения расхода. Они широко используются в промышленности, применяются при измерении жидкостей, газов и пара в широком диапазоне измерения расхода. Однако, существуют определенные трудности расширения диапазона измерений таких расходомеров в сторону малых расходов, исследованные в работах [2–4]. Решение данной проблемы может быть достигнуто путем более глубокого анализа принципа работы и методов исследования вихревых расходомеров.

## 1. История открытия явления вихреобразования

Образование вихрей за преградой, находящейся в канале с текучей средой, наблюдалось учеными с древнейших времен. В XV в. Леонардо да Винчи наблюдал за вихрями, образующимися в реке, и сделал набросок [5] дорожки из вихрей, возникающих вниз по течению за преградой (рис. 1). Он обратил внимание на то, как большие вихри дробятся на меньшие, а те, в свою очередь, распадаются на ещё более мелкие.

Следующий шаг в описании этого явления сделал в 1878 г. Винсент Струхаль, чешский физик и гидродинамик, один из основателей Департамента физики в Карловом университе-



Рис. 1. Изображение турбулентного потока, выполненное Леонардо да Винчи

те в Праге, а затем и ректор этого университета. В. Струхаль открыл, что частота звучания пропорциональна скорости звука, деленной на толщину струны [6]. Он обнаружил, что причиной возникновения звука при колебании струны являются периодический отрыв воздуха и связанное с ним вихреобразование. Он также предложил критерий (число Струхаля), связывающий частоту колебаний потока со скоростью направленного течения и характерным размером тела обтекания.

Важный вклад в исследования вихревого потока внес Джон Уильям Стретт, третий барон Рэлей, Лорд Рэлей – британский физик и механик, член Лондонского королевского общества, его президент в 1905–1908 гг. Он предсказал существование поверхностных волн, которые также называются волнами Рэля. Лорд Рэлей открыл в 1879 году существование сил подъема, сопровождающих вихреобразование, и направленных перпендикулярно направлению потока [7].

Значительное развитие вопросов теории вихреобразования было сделано в трудах Теодора фон Кармана. Во многом благодаря его исследованиям стало возможно измерение расхода вихревым методом. Изыскания, проведенные фон Карманом, привели к открытию периодичности явления вихреобразования. В 1911 г. он опубликовал работу [8], посвященную математическому анализу перемежающегося двойного ряда вихрей, которые образуются за плохообтекаемым телом в турбулентном потоке жидкости. Получающиеся при этом цепочки вихрей стали называть в его честь дорожкой Кармана [8].

Исследования, проведенные вышеперечисленными учеными, стали базисом для создания в 1967 г. первого современного вихревого расходомера [9].

## 2. Принцип работы вихревого расходомера

Принцип работы вихревого расходомера основан на образовании вихрей за телом обтекания, установленном в проточной части расходомера [10] (рис. 2) и последующем их учете (измерении).

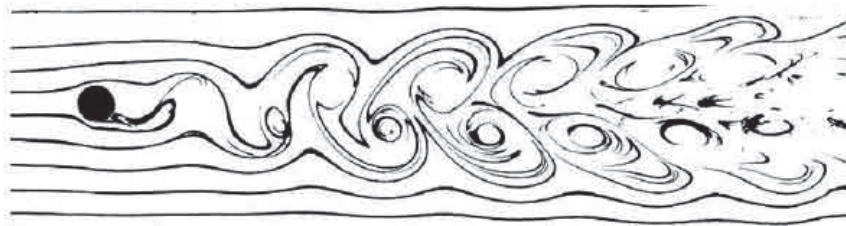


Рис. 2. Вихревая дорожка Кармана

Частота вихреобразования за телом обтекания зависит от скорости потока:

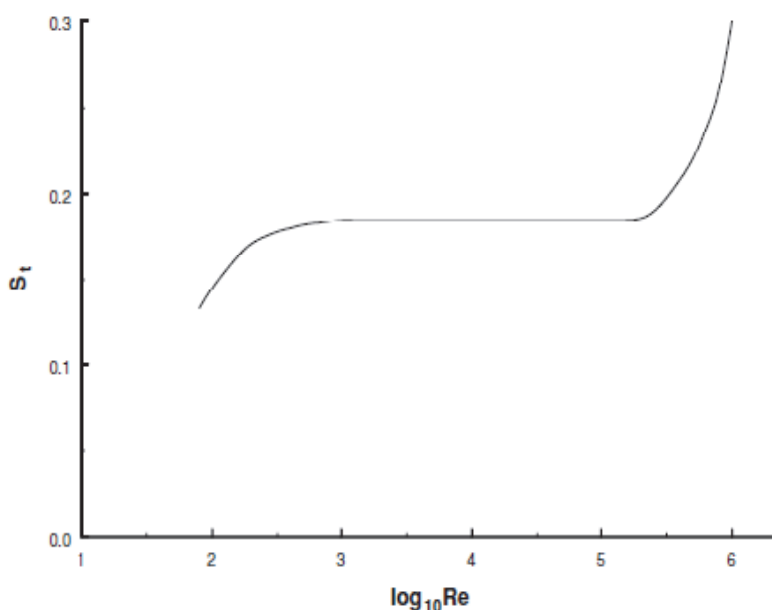


Рис. 3. Зависимость числа Струхаля от числа Рейнольдса для цилиндрического тела обтекания [9]

$$f = St \cdot \frac{v}{d}, \quad (1)$$

где  $v$  – скорость потока;  $d$  – характерный размер тела обтекания;  $St$  – безразмерная величина, называемая числом Струхаля.

Кривая зависимости числа Струхаля от числа Рейнольдса, полученная в результате исследований, приведена на рис. 3. Известно, что число Рейнольдса прямопропорционально скорости потока. Из рис. 3 следует, что число Струхаля постоянно в определенном диапазоне чисел Рейнольдса, что обеспечивает на этом диапазоне линейность выражения (1). При малых значениях числа Рейнольдса зависимость числа Струхаля становится су-

щественно нелинейной. Форма кривой для каждого тела обтекания отличается и может быть уточнена только путем исследований конкретных тел обтекания, как это сделано, например, в работе [4]. Более общие выводы о характере изменения числа Струхала можно сделать на основе анализа моделей процесса вихреобразования.

Среди вихревых расходомеров широкое распространение в промышленности получили расходомеры с ультразвуковым датчиком, называемые также вихреакустическими. Рассмотрим функциональную схему такого расходомера.

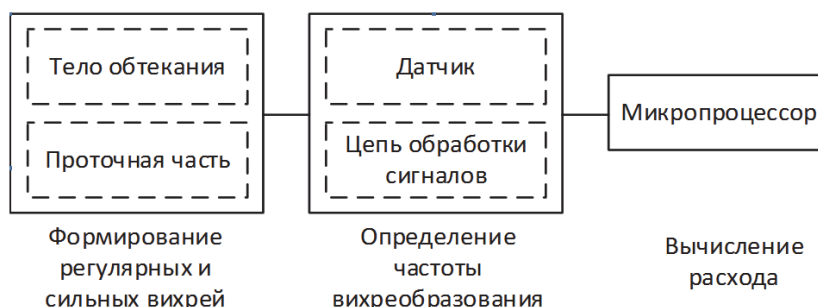
### 3. Функциональная схема вихревого расходомера

Рассмотрение 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 устройство расходомера и алгоритмы обработки измерительной информации.

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.

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 (рис. 4). Каждый из блоков выполняет определенную функцию, необходимую для определения расхода жидкости или газа.



**Рис. 4. Конструкция вихревого расходомера**

### 4. Методы улучшения метрологических характеристик вихревого расходомера

Методы улучшения метрологических характеристик можно разделить на три основных группы.

К первой группе отнесем *методы исследования формы и геометрических параметров тела обтекания и 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 порах исследовались, в основном, цилиндрические и призматические тела, образующие в своем сечении прямоугольник и треугольник. В первом расходомере использовался цилиндр [9]. Такая форма тела обтекания не обеспечивала в должной мере стабильность 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 [11, 12]. 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 [13–16], его применение значительно улучшало качество сигнала на датчике расходомера. Также были проведены многочисленные исследования сложных конструкций тел обтекания таких как: Т-образное тело обтекания [17], двойная и тройная конструкция тела обтекания [18–20] и кольцевое тело обтекания [21, 22].

Проводились исследования, посвященные ориентации треугольных и Т-образных тел обтекания «по» и «против» потока [23], а также были проведены очень интересные исследования [16, 23–25], показывающие, что даже небольшие изменения в геометрии тела обтекания вызывают значительные изменения качества вихревого сигнала.

Исследователи уделяли внимание изучению геометрии не только тела обтекания, но и проточной части. Т. Cousins доказал, что параметры проточной части вихревого расходомера играют важную роль в стабилизации дорожки Кармана, что привело к необходимости исследовать тело обтекания не в свободном потоке, а в потоке, ограниченном стенками проточной части. Также в своей работе [26] он опубликовал рекомендации по выбору геометрических размеров тел обтекания для различных диаметров трубопровода.

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

Ко второй группе отнесены *методы исследования, посвященные датчику и устройству обработки сигналов измерительной информации вихревого расходомера*, направленные на повышение точности нахождения частоты вихреобразования за телом обтекания. Данные методы призваны обеспечить наилучшее соотношение сигнал/шум для сигналов, получаемых с датчика.

Эти методы ориентированы на следующие направления:

- 1) выбор наилучшего места установки сенсора;
- 2) усовершенствование аппаратных средств;
- 3) аппаратно-программные методы.

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.

Среди методов повышения точности определения частоты вихреобразования с помощью аппаратных средств можно выделить два основных направления: увеличение количества каналов измерения и применение фильтров. Увеличение количества каналов измерения дает возможность значительно уменьшить шумовые составляющие, оказывающие воздействие на сигнал [10, 27]. В работе [28] 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. Применение фильтрующих элементов позволяет повысить соотношение сигнал/шум, что является важным при измерении малых расходов. В работах [29, 30] для решения данной задачи используется адаптивный полосовой фильтр.

С развитием вычислительной мощности контроллеров 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, а также различные математические методы обработки цифровых данных. Принципиальным различием между предлагаемыми аппаратно-программными методами 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; Вайвлет-преобразование и преобразование Гильберта – Хуанга. Методы перечислены в хронологическом порядке их возникновения.

Наиболее разработанным и изученным методом является преобразование Фурье. В работах [28, 31, 32] 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 колебаний с разными частотами [33]. Вайвлет-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 [34] показано, что Вайвлет-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 область малых расходов, где шумовая составляющая в сигнале может быть больше полезного сигнала.

Преобразование Гильберта–Хуанга [35] является современным методом обработки сигналов. Применение преобразования Гильберта–Хуанга к задачам вихревой расходомерии нашли свое отражение в ряде работ [36–38]. В исследованиях [37, 38] 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 или усложнения конструкции, что экономически оправдывается в высокоточных и дорогостоящих расходомерах.

К третьей группе отнесены *методы исследований, позволяющие повысить точность измерения расхода за счет правильного выбора и обоснования функции преобразования расходомера.*

В настоящее время четкие и универсальные алгоритмы для выбора функций преобразования средств измерений не разработаны, однако в отдельных областях достигнуты значительные успехи. Например, в работе [39] предложены методики выбора ФП измерительных преобразователей давления, позволяющие выбрать наиболее простые ФП для каждого типа измерительного преобразователя давления.

Для вихревых расходомеров исследователями предлагаются различные подходы в области выбора модели ФП. В исследовании [40] в качестве ФП предложено использовать однофакторную кусочно-линейную модель, а при проведении калибровки исследуемых расходомеров предложено использовать нейронную сеть для выбора режимов испытания расходомеров на расходомерном стенде. В работе [3] рассматриваются двухфакторная математическая модель ФП и алгоритм поиска ее коэффициентов, позволяющие обеспечить высокую точность измерения, в том числе и на малых расходах. Оригинальный подход к поиску ФП вихревых расходомеров продемонстрирован в исследовании [4]. Модель ФП строится на основе уравнения измерения расхода, составные части которого исследуются обособленно. Авторами была исследована и аппроксимирована зависимость числа Струхала от частоты вихреобразования.

В настоящее время алгоритмические методы повышения точности измерения вихревыми расходомерами являются наиболее перспективными и наименее затратными в задачах измерения малых расходов, поэтому их изучение и разработка являются актуальной задачей.

### **Заключение**

С момента создания первого вихревого расходомера, его конструкция существенно изменилась. Первоначально исследователями было уделено значительное внимание геометрии тел обтекания и проточной части расходомера, с целью получения стабильных и сильных вихрей за телом обтекания. По мере накопления опыта эксплуатации расходомеров интерес исследователей смещается к методам повышения точности определения частоты вихреобразования, что приводит к усовершенствованию конструкции датчика и устройств обработки сигналов измерительной информации.

В настоящее время при существовании большого количества конструкций вихревых расходомеров на первый план выходят алгоритмические методы повышения точности измерения расхода, такие как выбор и обоснование функции преобразования расходомера. Данные методы 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.

Для проведения анализа конструкции расходомера современные исследователи широко используют возможности новых программных пакетов, позволяющих осуществить моделирование вихреобразования за телом обтекания, что позволяет детально изучить природу данного процесса и выделить ключевые факторы, влияющие на него. Возможность изучения явления вихреобразования на новом уровне, в совокупности с разработанными алгоритмическими методами [3, 4], позволит глубже разобраться в проблеме повышения точности вихревых расходомеров и предложить эффективные решения в области измерения малых расходов.

### Литература

1. Venugopal, A. Review on vortex flowmeter – designer perspective / A. Venugopal // *Sensors and Actuators*. – 2011. – Vol. 170. – P. 8–23.
2. 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, № 35 (294). – С. 161–164.
3. Лапин, А.П. Выбор и исследование двухфакторной модели функции преобразования вихреакустических расходомеров / А.П. Лапин, Дружков А.М. // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии управление, радиоэлектроника»*. – 2013. – Т. 13, № 3. – С. 4–12.
4. 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. – Т. 13, № 4. – С. 70–77.
5. Pankanin, G.L. The vortex flowmeter: various methods of investigating phenomena / G.L. Pankanin // *Measurement science and technology*. – 2005. – No. 16. – R1–R16.
6. Strouhal, V. Über eine besondere Art der Tonerregung / V. Strouhal // *Annalen der Physik und Chemie. Neue Folge*. – 1878. – Bd. V. – S. 216–251.
7. Стрэтт, Дж. У. Теория звука: в 2 т. / Дж. У. Стрэтт; пер. с англ. Н. Успенского. – М.: Гос. изд-во техн.-теорет. лит., 1955. – Т. 1. – 504 с.
8. Von Karman, T. Über den Mechanismus des Widerstandes, den ein bewegter Körper in einer Flüssigkeit erzeugt / T. von Karman // *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse*. – 1911. – P. 509–517.
9. Yamasaki, H. The vortex flowmeter / H. Yamasaki, M. Rubin // *Flow Measurement and Control in Science and Industry (USA)*. – 1974 – P. 975–983.
10. Кремлевский, П.П. Расходомеры и счетчики количества: справ. / П.П. Кремлевский. – Л.: Машиностроение, 2004 – 701 с.
11. Miller, R.W. A vortex flowmeter – calibration results and application experience / R.W. Miller, J.P. De Carlo, J.T. Cullen // *Proc. Flow-Con, Brighton, UK*. – 1977. – P. 549–570.
12. Lomas, D.J. Vortex flowmetering challenges the accepted techniques / D.J. Lomas // *Control & Instrumentation*. – 1975.
13. 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.
14. 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. – Vol. 21. – P. 656–664.
15. Olsen, J.F. Vortex shedding behind modified circular cylinders / J.F. Olsen, S. Rajagopalan // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. – 2000. – Vol. 86, no. 1. – P. 55–63.
16. 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 Visualization FLUCOME'94*. – 1994. – P. 893–898.
17. 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. – Vol. 2, no. 3. – P. 169–179.

18. 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.
19. 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. – Vol. 7, no. 2. – P. 85–90.
20. Bentley, J.P. *Vortex shedding mechanisms in single and dual bluff bodies* / J.P. Bentley, J.W. Mudd // *Flow Measurement and instrumentation*. – 2003. – Vol. 14, no. 1. – P. 23–31.
21. Takamoto, M. *A vortex ring shedding flowmeter* / M. Takamoto, K. Komiyama // *Proc. IMEKO IX Congress (Berlin, Germany)*. – 1982. – P. 156–165.
22. Miao, J.J. *Axisymmetric-type vortex shedders for vortex flowmeters* / J.J. Miao, M.T. Hsu // *Flow Measurement and Instrumentation*. – 1992. – Vol. 3, no. 2. – P. 73–79.
23. *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. – No. 9. – P. 79–82.
24. Volker, H. *Comparison of pressure and ultrasound measurements in vortex flow meters* / H. Volker, H. Windorfer // *Measurement*. – 2003. – No. 33. – P. 121–133.
25. Pankanin, G.L. *Comparison of characteristics of vortex meters with various bluff bodies* / G.L. Pankanin, D.S. Goujon // *Proc. Int. Metrology Congress*. – 1993.
26. 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.
27. *Вихревые расходомеры digitalYEWFLOW Компании «Юкогава»*. – <http://www.rsk-k.ru/journals.html>.
28. 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.
29. Ghaoud, T. *Modeling and tracking a vortex flow-meter signal* / T. Ghaoud, D.W. Clarke // *Flow Measurement and Instrumentation*. – 2002. – Vol. 13, no. 3. – P. 103–117.
30. 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. – No. 3 – P. 1541–1544.
31. *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. – No. 2 – P. 832–835.
32. *Applied digital signal processing systems for vortex flowmeter with digital signal processing* / Ke-Jun Xu, Zhi-Hai Zhu, Yang Zhou et al. // *Review of Scientific Instruments*. – 2009. – Vol. 80, no. 2.
33. Павлов, А.Н. *Частотно-временной анализ нестационарных процессов: концепция вейвлетов и имперических мод* / А.Н. Павлов, А.Е. Филатова, А.Е. Храмов // *Известия вузов «ПНД»*. – 2011. – № 2 – С. 141–156.
34. Hongjun, Sun. *Digital signal processing based on wavelet and statistic method for vortex flowmeter* / Hongjun Sun, Tao Zhang, Hua-Xiang Wang // *Proceedings of the Third International Conference on Machine Learning and Cybernetics*. – 2004. – No. 5. – P. 3160–3163.
35. *The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis* / N.E. Huang, Z. Shen, S.R. Long et al. // *Proceeding of the Royal Society A: Mathematical physical and engineering science*. – 1998. – Vol. 454. – P. 903–995. – <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.1998.0193>.
36. 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.
37. *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. – No. 18 – P. 2769–2776.
38. Sun Zhi-qiang. *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. – Vol. 13, no. 5. – P. 501–505.

---

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

40. Yi, Y. An improved intelligent calibration method for vortex flowmeter / Y. Yi, W. Hui Feng // American Control Conference, 2007.ACC'07. – IEEE, 2007. – P. 2927–2931.

**Лапин Андрей Павлович**, канд. техн. наук, доцент кафедры информационно-измерительной техники, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск); a\_lapin@mail.ru.

**Дружков Александр Михайлович**, аспирант кафедры информационно-измерительной техники, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск); sandruzh@gmail.com.

**Кузнецова Кристина Витальевна**, магистрант кафедры информационно-измерительной техники, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск); kristi.kuznetsova@gmail.com.

Поступила в редакцию 20 апреля 2014 г.

---

**Bulletin of the South Ural State University**  
**Series “Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics”**  
**2014, vol. 14, no. 3, pp. 19–28**

---

## **VORTEX METHOD OF FLOW MEASUREMENT: HISTORY AND LINE OF DEVELOPMENT**

**A.P. Lapin**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,  
a\_lapin@mail.ru,

**A.M. Druzhkov**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,  
sandruzh@gmail.com,

**K.V. Kuznetsova**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,  
kristi.kuznetsova@gmail.com

This paper is devoted to the vortex method of flow measurement. Flowmeters based on the use of the phenomenon of vortex shedding after the bluff body, play an important role in global flow measurement business. The article presents information about the history of the vortex flow measurement since observations of Leonardo da Vinci in the XV century until the establishment of the first commercial vortex flowmeter in 1967. The physical fundamentals of the vortex formation phenomenon and principle of operation the vortex meter on the example of the ultrasound transducer flowmeter are described. The problems which researchers had faced in the design process flowmeters were systematized on the basis of scientific literature analysis. The authors evaluated the results of research in this area, and considered the possibility of applying these results to improve the metrological characteristics of the vortex sonic flowmeters. Researches on application of statistical and algorithmic techniques of information processing in flowmeter survey are marked as the perspective directions.

*Keywords: vortex flowmeter, vortex sonic flowmeter, Karman vortex street.*

### **References**

1. Venugopal A. Review on Vortex Flowmeter – Designer Perspective. *Sensors and Actuators*, 2011, vol. 170. – pp. 8–23.

2. Lapin A.P., Druzhkov A.M. [Selection of Model for Conversion Function of Vortex Sonic Flowmeters]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technology, Control, Radioelectronics*, 2012, iss. 17, no. 35 (294), pp. 161–164. (in Russ.)



3. Lapin A.P., Druzhkov A.M. [Selection and Research of Two-factor Model for Conversion Function of Vortex Sonic Flowmeters]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technology, Control, Radioelectronics*, 2013, vol. 13, no. 2, pp. 4–12. (in Russ.)
4. Lapin A.P., Druzhkov A.M., Kuznetsova K.V. [Analysis of the Dependence of the Strouhal Number in the Measurement Equation for Vortex Sonic Flowmeters]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technology, Control, Radioelectronics*, 2013, vol. 13, no. 4, pp. 70–77. (in Russ.)
5. Pankanin G.L. The Vortex Flowmeter: Various Methods of Investigating Phenomena. *Measurement Science and Technology*, 2005, no. 16, R1–R16.
6. Strouhal V. Über eine besondere Art der Tonerregung. *Annalen der Physik und Chemie. Neue Folge*, 1878, Bd. V, S. 216–251.
7. Strett J.U. *Teoriya zvuka* [Sound Theory]. Moscow, State Publishing House of Technical and Theoretical Literature, 1955, vol. 1. 504 p.
8. Von Karman T. Über den Mechanismus des Widerstandes, den ein bewegter Körper in einer Flüssigkeit erzeugt. *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse*, 1911, pp. 509–517.
9. Yamasaki H., Rubin M. The Vortex Flowmeter. *Flow Measurement and Control in Science and Industry (USA)*, 1974, pp. 975–983.
10. Kremlevskiy P.P. *Raskhodometry schetchiki kolichestva: Spravochnik* [Flowmeters and Counters: Hand-book], Leningrad, Mashinostroyeniye publishing house, 1989. 701 p.
11. Miller R.W., De Carlo J.P., Cullen J.T. A Vortex Flowmeter – Calibration Results and Application Experience. *Proc. Flow-Con, Brighton, UK*, 1977, pp. 549–570.
12. Lomas D.J. Vortex Flowmetering Challenges the Accepted Techniques. *Control & Instrumentation*, 1975.
13. Igarashi T. Fluid Flow Around a Bluff Body Used for a Karman Vortex Flowmeter. *Proc. of International Symposium on Fluid Control and Measurement FLUCOME TOKYO'85*, 1985, pp. 1017–1022.
14. Igarashi T. Flow Characteristics Around a Circular Cylinder with a Slit. I-Flow Control and Flow Patterns. *International Journal. Series B*, 1978, vol. 21, pp. 656–664.
15. Olsen J.F., Rajagopalan S. Vortex Shedding behind Modified Circular Cylinders. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2000, vol. 86, no. 1, pp. 55–63.
16. Pankanin G.L. Sensitivity of Vortex Meter Characteristics on Bluff Body Design. *Proc. of Fourth Triennial International Symposium on Fluid Control, Measurement and Visualization FLUCOME'94*, 1994, pp. 893–898.
17. El Wahed A.K., Sproston J.L. The Influence of Shedder Shape on the Performance of the Electrostatic Vortex Flowmeter. *Flow Measurement and Instrumentation*, 1991, vol. 2, no. 3, pp. 169–179.
18. Benson R.A., Bentley J.P. The optimization of blockage ratio for optimal multiple bluff body vortex flowmeters. *Proc. 4th Int. Symp. on Fluid Control, Fluid Measurement and Visualization FLUCOME'94 (Toulouse, France, 29 August – 1 September 1994)*, 1994, pp. 887–891.
19. Bentley J.P., Benson R.A., Shanks A.J. The Development of Dual Bluff Body Vortex Flowmeters. *Flow Measurement and Instrumentation*, 1996, vol. 7, no. 2, pp. 85–90.
20. Bentley J.P., Mudd J.W. Vortex Shedding Mechanisms in Single and Dual Bluff Bodies. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2003, vol. 14, no. 1, pp. 23–31.
21. Takamoto M., Komiya K. A Vortex Ring Shedding Flowmeter. *Proc. IMEKO IX Congress (Berlin, Germany)*, 1982, pp. 156–165.
22. Miao J.J., Hsu M.T. Axisymmetric-type Vortex Sheddors for Vortex Flowmeters. *Flow Measurement and Instrumentation*, 1992, vol. 3, no. 2, pp. 73–79.
23. Hans V., Poppen G., von Lavante E., Perpeet S. Vortex Shedding Flowmeter and Ultrasound Detection: Signal Processing and Influence of Bluff Body Geometry. *Flow Measurement and Instrumentation*, 1998, no. 9, pp. 79–82.
24. Volker H., Windorferb H. Comparison of pressure and ultrasound measurements in vortex flow meters. *Measurement*, 2003, no. 33, pp. 121–133.
25. Pankanin G.L., Goujon D.S. Comparison of characteristics of vortex meters with various bluff bodies. *Proc. Int. Metrology Congress*, 1993.

26. Cousins T., Foster S.A., Johnson P.A. A Linear and Accurate Flowmeter Using Vortex Shedding. *Proc. Power Fluid for Process Control Symposium, Inst. Measurement and Control, Guildford, UK*, 1973, pp. 45–56.
27. *Vikhreyye raskhodometry digitalYEFWLO kompanii Yokogawa* [Vortex Flowmeters DigitalYEFWLO Companies “Yokogawa”]. Available at: <http://www.rsk-k.ru/journals.html>.
28. Chen J., Min K., Zhong L. Vortex Signal Processing Method with Dual Channel. *Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, 2011, pp. 2833–2837.
29. Ghaoud T., Clarke D.W. Modeling and Tracking a Vortex Flow-meter Signal. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2002, vol. 13, no. 3, pp. 103–117.
30. Poremba A., Blischke F. Robust Vortex Flowmeter Based on a Parametric Frequency Estimator. *Industrial Electronics, Control, Instrumentation, and Automation, Power Electronics and Motion Control., Proceedings of the International Conference on San Diego*, 1992, no. 3, pp. 1541–1544.
31. Jianbo M., Zu L., Liang D., Liang X. Adaptive Frequency Measurement (AFM) for Vortex Flowmeter Signal. *Industrial Electronics, Proceedings of the IEEE International Symposium*, 1992, no. 2, pp. 832–835.
32. Ke-Jun Xu, Zhi-Hai Zhu, Yang Zhou, Xiao-Fen Wang, San-Shan Liu, Yun-Zhi Huang, Zhi-Yuan Chen. Applied Digital Signal Processing Systems for Vortex Flowmeter with Digital Signal Processing. *Review of Scientific Instruments*, 2009, vol. 80, no. 2.
33. Pavlov A.N., Filatova A.E., Khramov A.E. [Time-and-Frequency Analysis of Nonstationary Processes: Concept of Wavelets and Empirical Modes]. *Izvestiya vuzov “PND”*, 2011, no. 2, pp. 141–156. (in Russ.)
34. Hongjun Sun, Tao Zhang, Hua-Xiang Wang. Digital Signal Processing Based on Wavelet and Statistic Method for Vortex Flowmeter. *Proceedings of the Third International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, 2004, no. 5, pp. 3160–3163.
35. Huang N.E., Shen Z., Long S.R., Wu M.C., Shih H.H., Zheng Q., Yen N.C., Tung C.C., Liu H.H. The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-stationary Time Series Analysis. *Proceeding of the Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Science*, 1998, vol. 454, pp. 903–995. Available at: <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.1998.0193>.
36. De-ming H., Wen-jun L., Yong-jun Zh. A Vortex Flowmeter Based on Multiprocessor Technique. *International Conference on Networking and Information Technology*, 2010, pp. 322–325.
37. Zheng D., Zhang T., Xing J., Mei J. Improvement of the HHT Method and Application in Weak Vortex Signal Detection. *Measurement science and technology*, 2007, no. 18, pp. 2769–2776.
38. Sun Zhi-qiang, Zhou Jie-min, Zhou Ping. Application of Hilbert-Hang Transformer to Denoising in Vortex Flowmeter. *Journal of Central South University of Technology*, 2006, vol. 13, no. 5, pp. 501–505.
39. Lapina E.A. *Algoritmy obrabotki informatsii pri vybore i obosnovanii funktsii preobrazovaniya izmeritel'nyh preobrazovateley davleniya dlya ASU TP. Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Algorithms of Information Processing in Case of a Choice and Reasons for a Conversion Function of Measuring Transducers of Pressure for Industrial Control System. Abstract of Cand. Sci. Diss]. Chelyabinsk, 2011. 21 p.
40. Yi Y., Huifeng W. An Improved Intelligent Calibration Method for Vortex Flowmeter. *American Control Conference, 2007.ACC'07. IEEE*, 2007, pp. 2927–2931.

*Received 20 April 2014*