

# ВИХРЕВОЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА: МОДЕЛИ ВИХРЕОБРАЗОВАНИЯ И СОВРЕМЕННЫЕ СРЕДСТВА МОДЕЛИРОВАНИЯ

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

Статья посвящена изучению вихревого метода измерения расхода. Вихревые расходомеры получили широкое распространение на практике начиная с 80-х годов прошлого века. С целью улучшения качества измерения стали применяться различные методы исследования таких расходомеров. Методы исследования явления вихреобразования изменялись вместе с развитием технических решений: метод проб и ошибок, анализ измерительного сигнала, исследование поля течения жидкости, визуализация потока, проведение испытаний на испытательном стенде и моделирование. Рассмотрены основные аналитические модели вихреобразования, описанные в зарубежной научной литературе. Развитие вычислительной техники позволило использовать численное моделирование при исследовании вихревого расходомера. Представлены наиболее интересные результаты моделирования процесса вихреобразования, а также сформулированы рекомендации по проведению подобных исследований. Применение программного обеспечения ANSYS CFX при моделировании процесса вихреобразования позволяет учесть все влияющие на точность измерения расхода факторы.

*Ключевые слова: вихревой расходомер, модель вихреобразования, вихревая дорожка Кармана.*

## **Введение**

Целью данной статьи является систематизация знаний о методах исследования процесса вихреобразования, математических моделях вихреобразования и результатах проведенных исследований вихревых расходомеров.

Методы исследований, моделирования и сами модели в процессе исторического развития явления вихреобразования, а также в процессе научно-технического прогресса претерпели множество изменений. На ранних этапах развития вихревой расходомерии большинство усовершенствований в конструкции были получены методом проб и ошибок. С развитием сложных современных методов исследования, таких как визуализация потока высоких скоростей, измерение скорости потока с помощью термоанемометров и высокоскоростных вычислений, вихревая динамика, возникающая за телом обтекания, изучается достаточно подробно, что приводит к множеству полезных качественных и количественных выводов.

Однако не всегда перечисленные методы позволяют всесторонне осознать и исследовать процесс вихреобразования. Авторами работы [1] было проведено исследование явления вихреобразования с использованием горячеводного испытательного стенда. Данный стенд позволяет проводить испытания расходомеров с диаметром проточной части не больше 50 мм; провести испытания расходомеров с диаметром больше 50 мм экспериментально невозможно, и поэтому полную картину процесса вихреобразования можно получить только при помощи моделирования. Использование моделирования позволяет сократить затраты на разработку и совершенствование конструкции вихревого расходомера [2].

## **1. История развития методов исследования вихревых расходомеров**

С момента, как вихревые расходомеры получили широкое распространение в промышленности, стали применяться различные методы исследования таких расходомеров с целью улучшения качества измерения. Методы исследования явления вихреобразования изменялись вместе с совершенствованием технических решений. В самом начале развития вихревых расходомеров использовался метод проб и ошибок, который был основан на *анализе измерительного сигнала*, наблюдаемого на экране осциллографа [11]. Позднее стали использоваться другие методы исследования, такие как *исследование поля течения* с помощью термоанемометра [12], *визуализация потока жидкости* [16], *проведение испытаний* на испытательном стенде [1].

Исследователи пытаются использовать математические модели явления вихреобразования. Хотя уравнение Навье–Стокса, описывающее явления, происходящие в вихревом расходомере, было хорошо известно в течение длительного времени, отсутствие аналитического решения заставляло исследователей строить собственные модели: Birkhoff [4], Gerrard [7], Pankanin [13, 14] и др. Попытки найти численное современное решение берут свое начало в 1963 г. [11]. Отсутствие компьютеров с достаточной скоростью и памятью вносило значительные трудности в получении результатов численного моделирования в течение многих лет. Стремительное развитие вычислительной техники в последние годы, в том числе значительное увеличение скорости расчетов и рост оперативной памяти, позволило достичь значительного прогресса в *численном моделировании* вихревого расходомера. В статье [2] показаны возможности численного моделирования в осознании явлений, возникающих в вихревом расходомере. Результаты моделирования течений жидкостей и газов необходимо использовать как часть процесса разработки расходомера на основе инженерных расчетов, для описания функционирования изделия или описания процесса, выявления неполадок, оптимизации производительности.

## 2. Развитие математических моделей процесса вихреобразования

В настоящее время нет единой математической модели процесса образования вихрей. Ниже представлено несколько наиболее интересных моделей изучаемого процесса.

Первый удачный шаг в создании модели образования вихрей сделал А. Birkhoff. В 1953 году им была опубликована модель вихреобразования [4], представленная как процесс колебания «рыбьего хвоста» (рис. 1).

Угловые колебания «рыбьего хвоста» с центром тяжести в оси цилиндра приведены в [6]:

$$I \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + k \alpha = 0, \quad (1)$$

где  $I$  – момент инерции;  $\alpha$  – угол отклонения вихревого следа;  $k$  – коэффициент восстановления сил.

Данная модель позволила предложить гипотезу о том, что частота вихрей прямо пропорциональна скорости потока и не зависит от плотности потока и его числа Рейнольдса.

Более сложную модель движения пограничных слоев в момент формирования вихрей предложил Gerrard в 1966 году [7]. Как показано на рис. 2, два сдвигающихся слоя SL1 и SL2 поочередно закручиваются, формируя вихри за телом обтекания. Согласно данной модели в процессе генерации вихря можно различить три потока:

- поток А направляется в растущий вихрь противоположного сдвигающегося слоя SL1;
- поток В направляется турбулентным сдвигом слоя SL1;
- поток С направляется обратно в область формирования нового вихря.

Данная модель была подтверждена также и другими исследованиями [3, 10].

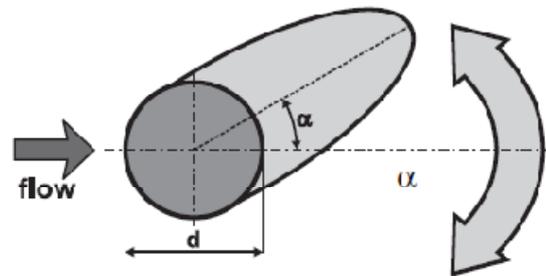


Рис. 1. Модель вихреобразования (авторы Birkhoff [4] и Cousins [6])

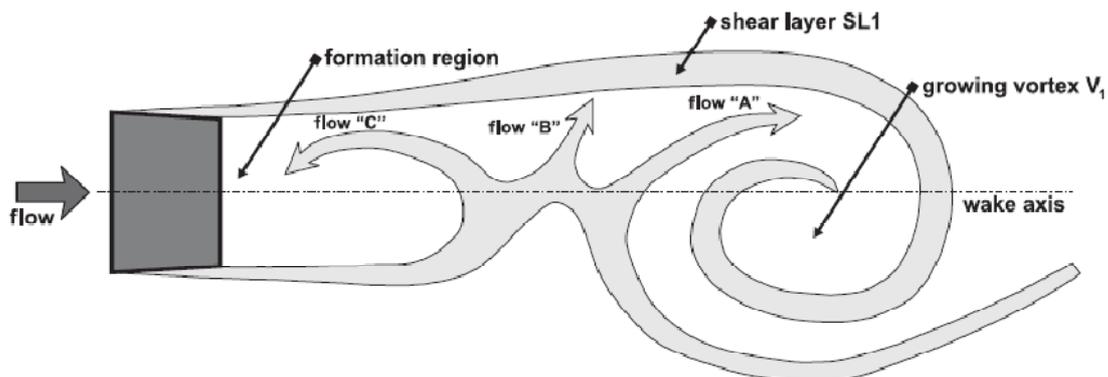


Рис. 2. Модель поведения потока в момент вихреобразования [7]

С позиции использования явления вихреобразования для задач измерения скорости потока следует, что поток С должен быть максимальным, поток А минимальным, а поток В должен быть достаточно большим для отрыва вихря.

Такая модель представления процесса вихреобразования позволила сделать выводы о том, что часть потока (поток С) за телом обтекания играет весьма важную роль в определении частоты вихреобразования. Важность ее заключается в тесной взаимосвязи размера тела обтекания, силы вихря и частоты вихреобразования.

Следующая математическая модель формирования вихрей была предложена Yamasaki [19] и базируется на постулате о том, что образование вихря сопровождается возникновением сил, направленных перпендикулярно потоку.

Сила  $L$ , называемая подъемом, выведена из теоремы Жуковского [11]:

$$L = \rho v \Gamma, \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность измеряемой среды;  $v$  – скорость потока;  $\Gamma$  – циркуляция потока.

Так как циркуляция пропорциональна диаметру  $d$  цилиндрического тела обтекания, подъем вихря зависит от плотности и скорости среды в квадрате [19]:

$$L = K \rho d v^2. \quad (3)$$

Вихри формируются за цилиндром, установленным в потоке жидкости. Вниз по течению от цилиндра формируются два ассиметричных ряда вихрей, возникая поочередно (рис. 3).

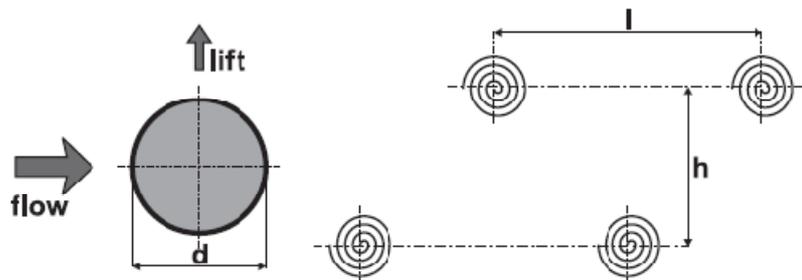


Рис. 3. Модель вихревой дорожки Кармана [9]

Карман показал [9], что расположение вихрей в два ряда нестабильно, если не выполняется условие:

$$\sin\left(\frac{\pi h}{l}\right) = 1 \quad \text{или} \quad \frac{h}{l} = 0,28, \quad (4)$$

где  $l$  – дистанция между последовательными вихрями, сгенерированными на одной стороне от тела обтекания;  $h$  – расстояние между двумя рядами вихрей.

В 1993 году Wei [18] доказал, что в реальных условиях отношение расстояния между двумя рядами вихрей и дистанции между последовательными вихрями может варьироваться в диапазоне 25 %.

С точки зрения применимости явления вихреобразования к измерению потока вопрос о постоянстве числа Струхала в зависимости от числа Рейнольдса имеет большое значение, хотя недавние исследования [1] зависимости числа Струхала позволили использовать нелинейное значение числа Струхала для измерения скорости потока, в частности на малых расходах.

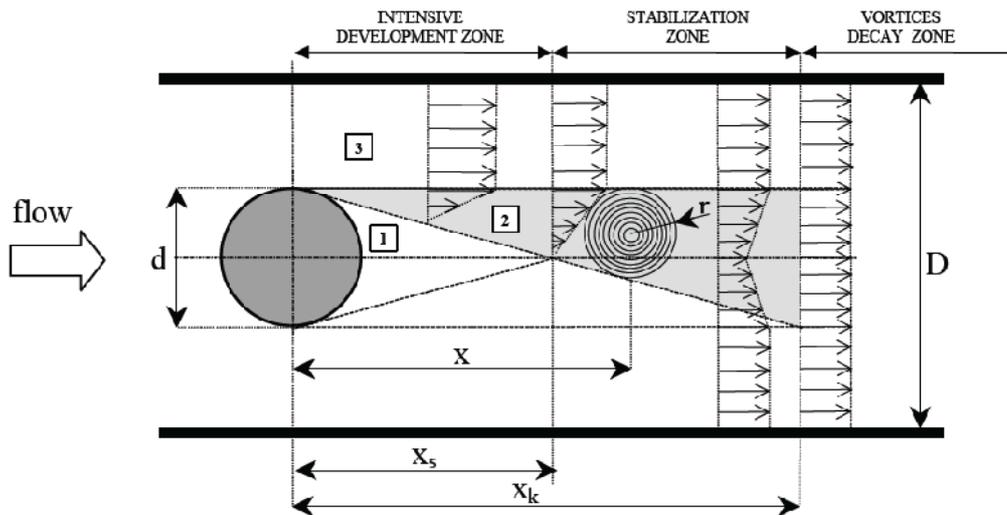
Roshko в 1954 году экспериментально исследовал наличие вихревой дорожки, образующейся за цилиндрическими телами обтекания различных сечений, при ламинарном (для чисел Рейнольдса 50–150) и турбулентном режиме (для чисел Рейнольдса 300–15000) движения жидкости и наблюдал геометрическую симметричность всех вихревых дорожек [17]. Данные соотношения описаны выражениями (5) и (6) соответственно:

$$St = 0,212 \left(1 - \frac{21,2}{Re}\right); \quad (5)$$

$$St = 0,212 \left(1 - \frac{12,7}{Re}\right). \quad (6)$$

Эти исследования экспериментально подтвердили особенность образования вихревых дорожек, независимость от числа Рейнольдса при турбулентном потоке, а также позволили установить, что число Струхала зависит от ширины вихревого следа. Анализируя уравнения (5) и (6), можно увидеть, что при увеличении числа Рейнольдса при переходном потоке значение числа Струхала в данной области радикально снижается.

Польский ученый Pankaniп на основе исследований потока при помощи термоанемометра получил наиболее современную аналитическую модель образования вихрей [15]. На рис. 4 представлена графическая модель вихревой дорожки Кармана, образующейся за цилиндрическим телом обтекания и ограниченной стенками трубопровода.



**Рис. 4. Модель развития вихрей за телом обтекания: 1 – застойная область; 2 – область развития вихря; 3 – область устойчивого профиля скорости [15]**

Вихри возникают на поверхности тела обтекания в области отрыва от него пограничного слоя. Затем они нарастают, двигаясь вниз по течению в застойной области. Последующие слои добавляются к вихрю, тем самым увеличивая его размер.

Для того чтобы описать различные этапы развития вихря, участок потока за телом обтекания был разделен на 3 зоны:

- зона интенсивного развития вихря;
- зона стабилизации вихря;
- зона затухания вихря.

В зоне интенсивного развития происходит быстрый рост вихрей. В этой зоне можно выделить область застоя, область устойчивого профиля скорости потока и область развития вихрей. *Клиновидная область застоя* (область 1 на рис. 4) находится ниже по потоку от тела обтекания. Область может рассматриваться как твердое тело, по которому с обеих сторон поочередно скатываются вихри. Размер вихря увеличивается наряду с уменьшением поперечного размера застойной области. Внутри области застоя перемещение жидкости не упорядочено. *В области устойчивого профиля скорости* (область 3 на рис. 4) нет никаких волнений. Увеличение локальной скорости вызвано перекрытием потока телом обтекания. Для упрощения модели предполагается, что векторы скорости в данной области параллельны. *В области развития вихря* (область 2 на рис. 3) вихрь, возникающий на поверхности тела обтекания, быстро увеличивается. Диаметр вихря увеличивается при перемещении его вниз по потоку. Pankaniп предположил, что процесс увеличения вихря соосен процессу «добавления слоев» с сохранением массы и геометрии вихря. В момент добавления слой вращается со скоростью, соответствующей локальной скорости вращения вихря. Количество слоев увеличивается с перемещением вихря вниз по потоку.

В зоне стабилизации развитие вихря происходит значительно медленнее. В этой зоне можно выделить только 2 области: область развития вихрей и область устойчивого профиля скоростей.

В зоне затухания вихри, движущиеся по потоку, теряют силу и постепенно исчезают.

Анализируя представленные в статье модели, можно сделать вывод о том, что исследование зависимости числа Струхала от частоты вихреобразования и температуры, проведенное авторами [1], позволило усовершенствовать модель, предложенную Roshko. Однако модель, которую представил Pankanin (см. рис. 4), помогает достичь наибольшего понимания процесса вихреобразования.

### 3. Исследования вихревых расходомеров, проведенные с помощью моделирования

Несмотря на то, что некоторые исследователи [11] иногда даже отрицали возможность полезного использования численного моделирования в проектировании вихревого расходомера, в последние годы были достигнуты значительные результаты. Особенно ценные результаты были получены учеными из университета Эссена: с помощью моделирования немецкие исследователи Hans и Windofer успешно оценили влияние вторичных вихрей на измерительный сигнал для треугольного тела обтекания [8]. На основе проведенных исследований предложены решения, позволяющие минимизировать образования вторичных вихрей и, как следствие, уменьшение паразитных составляющих в сигнале на датчике вихревого расходомера, что в свою очередь увеличивает соотношение сигнал/шум и повышает точность и стабильность результатов измерения вихревого расходомера в целом. Численное моделирование вихревой дорожки Кармана является самым мощным методом осознания этого явления. В случае вихревого расходомера моделирование крайне сложно, так как существует множество влияющих факторов.

Польский ученый Pankanin провел целую серию экспериментальных исследований явления вихреобразования [12] и исследований с использованием численного моделирования [13, 14] и на их основе выработал методику проведения подобных исследований [15]. Он показал, что, в сравнении с лабораторными исследованиями, численное моделирование позволяет исследовать недостижимое в лаборатории, а также позволяет более глубоко понять явление вихреобразования.

Следует отметить, что для проведения успешного моделирования исследователю необходимо учесть следующие факторы: сформировать правильный образ представления явления, принять во внимание все возмущающие факторы, выбрать правильные начальные и граничные условия, определиться с пространством моделирования – 2D или 3D [14].

При моделировании очень важно:

- 1) иметь четкую цель проведения исследований; многие статьи по моделированию не имеют в результате анализа конкретной цели;
- 2) поддерживать баланс между лабораторными исследованиями и моделированием;
- 3) подтверждать лабораторными исследованиями адекватность результатов моделирования [14].

В настоящее время на рынке представлено достаточное количество программного обеспечения, которое позволяет выполнять гидрогазодинамические расчеты ламинарных и турбулентных, сжимаемых и несжимаемых, стационарных и нестационарных многофазных потоков. Проведенный обзор существующего на данный момент программного обеспечения выявил следующих лидеров на данном рынке: ANSYS CFX/FLUENT, OpenFOAM, SolidWorks Flow Simulation, STAR-CD, FLOWVISION, GDT (GasDynamicsTool), Autodesk Simulation CFD, COMSOL CFD Module. В ходе проведенного обзора был сделан вывод о том, что большинство решателей не дают четкой картины вихреобразования и только программное обеспечение ANSYS CFX имеет вихреразрешающую модель турбулентности потока, которая позволяет проводить исследования потока в проточной части вихревого расходомера.

### Заключение

Авторами проведено экспериментальное исследование явления вихреобразования [1]. На его основе получена зависимость числа Струхала от частоты вихреобразования и температуры измеряемой среды, которая позволила разработать двухфакторную модель функции преобразования вихреакустического расходомера. Однако данное исследование невозможно провести экспериментально для расходомеров с диаметром проточной части больше 50 мм. Полную картину зависимости числа Струхала от частоты вихреобразования и температуры измеряемой среды возможно получить только при численном моделировании движения жидкости в расходомерах с диаметром проточной части больше 50 мм. В статье проведен обзор основных аналитических моделей

процесса вихреобразования, наиболее интересных результатов численного моделирования и современных средств моделирования. Средства моделирования турбулентного движения жидкости претерпели множество изменений и в настоящее время позволяют современным исследователям и конструкторам значительно сократить затраты на разработку и оптимизацию исследуемых конструкций. Использование ANSYS CFX применительно к задаче моделирования исследуемого процесса позволит сформировать полную картину зависимости числа Струхала и получить универсальную модель функции преобразования вихреакустического расходомера для всех типов диаметров проточной части.

### **Литература/References**

1. Лапин А.П., Дружков А.М., Кузнецова К.В. Анализ зависимости числа Струхала в уравнении измерения вихреакустического расходомера. Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии управление, радиоэлектроника». 2013. Т. 13, № 4. С. 70–77. [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 South Ural State University. Ser. Computer Technology, Automatic Control, Radio Electronics*, 2013, vol. 13, no 4, pp. 70–77. (in Russ.)].
2. Сафонов Е.В., Бромер А.К., Дорохов В.А. Разработка виртуального испытательного стенда для численного моделирования гидродинамических течений в бесфланцевых вихревых расходомерах с использованием высокопроизводительных вычислений. Вестник ЮУрГУ. Серия «Вычислительная математика и информатика». 2013. Т. 2, № 4. [Safonov E.V., Bromer K.A., Dorokhov V.A. (Development of Virtual Test Bench for CFD in Flangeless Vortex Flowmeter with Application of High-Performance Computing). *Bulletin of South Ural State University. Ser. Calculus mathematics and informatics*, 2013, vol. 2, no. 4, pp. 109–115. (in Russ.)].
3. Bentley J.P., Mudd J.W. Vortex Shedding Mechanisms in Single and Dual Bluff Bodies. *Flow Measurement Instruments*, 2003, vol. 14, pp. 23–31.
4. Birkhoff G. Formation Vortex Street. *Journal of Applied Physics*, 1953, vol. 24, pp. 98–103.
5. Chmielewski R., Berliński J., Pankanin G.L. Modelling of Karman Vortex Street with Moving Stagnation Region. *Proc. of International Conference on Flow Measurement FLOMEKO*. Lund Sweden, 1998, pp. 381–385.
6. Cousins T. The Performance and Design of Vortex Meters. *Proc. of International Conference on Flow Measurement in the mid 1970-s*. Scotland, 1975, pp. 134–142.
7. Gerrard J.H. The Mechanics of the Formation Region of Vortices behind Bluff Bodies. *Journal of Fluid Mechanics*, 1966, vol. 25, pp. 401–413.
8. Hans V., Windorfer H. Comparison of Pressure and Ultrasound Measurements in Vortex Flow Meters. *Measurement*, 2003, no. 33, pp. 121–133.
9. Karman T. von. 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, S. 509–517.
10. Lucas G.P., Turner J.T. Influence of Cylinder Geometry on the Quality of its Vortex Shedding Signal. *Proc. of International Conference on Flow Measurement FLOMEKO*. Melbourne, 1985, pp. 81–88.
11. Pankanin G.L. The Vortex Flowmeter: Various Methods of Investigating Phenomena. *Measurement science and technology*, 2005, no. 16, pp. 1–16.
12. Pankanin G.L. Experimental and Theoretical Investigations Concerning the Influence of Stagnation Region on Karman Vortex Shedding. *Proc. Of IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*. Warsaw, Poland, 2007, pp. 11–16.
13. Pankanin G.L., Berliński J., Chmielewski R. Simulation of Karman Vortex Street Development Using New Model. *Metrology & Measurement Systems*, 2006, vol. XIII, pp. 35–47.
14. Pankanin, G.L. Vortex Meter Designing – Simulation or Laboratory Investigations? *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*. Wilga, Poland, 2013, vol. 8903, R. 89032C.
15. Pankanin G.L., Chmielewski R., Berliński J. Analytical Modelling of Karman Vortex Street. *Metrology and Measurement Systems*, 2005, vol. XII, no. 4, pp. 413–425.
16. Popiel C.O., Robinson D.I., Turner J.T. Vortex Shedding from Specially Shaped Cylinders. *Proc. of 11th Australasian Fluid Mechanics Conference*. Australia, 1992, pp. 503–506.

- 
17. Roshko A. On the Development of Turbulent Wakes from Vortex Streets. *NACA Report*, 1954, no. 1191, p. 27.
18. Wei Z.L., Wang J.Z., Han H.Y., Yang Z.Y., Wang W. Frequency Shift behind an Oscillating Bluff Body in a Wake Flow. *Proc. of International Conference on Flow Measurement FLOMEKO*. Korea, 1993, pp. 515–524.
19. Yamasaki H., Rubin M. The Vortex Flowmeter. *Flow Measurement and Control in Science and Industry*. USA, 1974, pp. 975–983.

**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); sandrzh@gmail.com.

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

*Поступила в редакцию 1 сентября 2014 г.*

---

**Bulletin of the South Ural State University**  
**Series “Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics”**  
**2014, vol. 14, no. 4, pp. 28–34**

---

## **VORTEX METHOD OF FLOW MEASUREMENT: MODELS OF VORTEX SHEDDING AND MODERN MEANS OF MODELING**

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

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

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

Study of a vortex measurement method of the expenditure is considered in the article. Vortex flowmeters are widely used in practice. Various methods of investigation of these flowmeters have been used to improve the quality of measurements. Methods of investigation of vortex formation phenomenon were changing with the development of technical solutions: trial and error method, analysis of the measurement signal, investigation of the field of fluid flow, flow visualization, laboratory investigations on the test stand and modeling. The main analytical models of vortex formation described in foreign scientific literature are considered. Development of computer technology allowed the use of numerical modeling in the investigation of a vortex flowmeter. The most interesting results of process modeling of vortex formation are provided, and also recommendations about carrying out similar researches are formulated. The use of ANSYS CFX software in process modeling of vortex formation allows to consider all factors influencing on measurement accuracy of the expenditure.

*Keywords: vortex flowmeter, model of vortex formation, Karman vortex street.*

*Received 1 September 2014*