

Р. Р. Акчурин, А. А. Трофимов

ВИХРЕВОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ОБЪЕМНОГО И МАССОВОГО РАСХОДА ЖИДКОСТИ

R. R. Aktchurin, A. A. Trofimov

VORTEX MEASURER OF MASS AND VOLUMETRIC FLOW RATE

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Использование современных методов компьютерного анализа позволяет предварительно оценить работоспособность того или иного метода в кратчайшие сроки, отсеять нерациональные варианты и приступить к разработке будущего изделия. Объектом исследования является вихревой волоконно-оптический измеритель расхода, в котором чувствительными элементами являются решетки Брэгга. **Материалы и методы.** При решении поставленных задач использованы методы интегрального и дифференциального исчисления, математического моделирования, метод конечных элементов, теории механики деформируемого тела. При проектировании конструкции датчиков применялись системы автоматизированного проектирования КОМПАС, SolidWorksSimulation и Ansys. Предложена функциональная схема измерительного преобразователя, измеряющего массовый и объемный расходы, а также плотность жидкой или газовой среды. **Результаты.** В результате моделирования процессов вихреобразования определены конструктивные параметры тела обтекания и деформационного фрагмента. Получены значения частот колебаний деформационного фрагмента, зависящих от объемного расхода и плотности среды. **Выводы.** Установленные в результате исследования значения сил, действующих на деформационный фрагмент, позволили оценить значение его деформаций и необходимого уровня чувствительности.

A b s t r a c t. Background. Using the modern methods of computer analysis prior to a fabrication allows to evaluate, as soon as possible, if one of the methods is efficient or no, to delete unpractical variants and begin to develop a future device. The research object is the vortex fiber-optic measurer of flow rate with Bragg arrays used there as the sensing elements. **Materials and methods.** The following methods were using during the objective researching: integral and differential calculus, mathematical simulation, finite element method, mechanic theory of the deformed body. During the sensors construction designing were using such CAD-systems like COMPAS, SolidWorksSimulation and Ansys. A functional scheme of the measurement transducer for a measuring of mass and volumetric flow rate as well as a density of a liquid and gaseous medium was proposed. **Results.** As a result of the vortex formation processes simulation design factors of a flow body and deformation fragment were detected. Oscillation frequency values of the deformation fragment depending on the volumetric flow rate and media density were obtained. **Conclusions.** The force values, influenced on the deformation fragment, which were detected as a result of the research made it possible to evaluate a value of its deformation and necessary sensitivity level.

К л ю ч е в ы е с л о в а: вихревой расходомер, тело обтекания, частота срыва вихрей, вихревая дорожка Кармана.

К e y w o r d s: vortex flowmeter, bluff body, frequency of failure whirlwinds, vortex path of the Karman.

Принцип действия вихревых измерителей объемного расхода заключается в преобразовании поступательного движения жидкой или газообразной среды в вихревое с последующим измерением частоты срыва вихрей [1]. В вихревых преобразователях массового расхода дополнительно измеряется частота собственных механических колебаний деформационного фрагмента [2]. Первичный измерительный преобразователь содержит тело обтекания (вихреобразователь), расположенное поперек потока, также деформационный фрагмент, на котором расположены чувствительные элементы, один из которых преобразовывает энергию вихревого движения в частотный электрический сигнал, при этом частота образования вихрей прямо пропорциональна объемному расходу среды. Частотный сигнал с другого чувствительного элемента равен частоте собственных колебаний деформационного элемента, которая зависит от плотности среды, в которой он находится [3].

Важнейшим компонентом вихревых расходомеров являются преобразователи энергии вихревого движения жидкости или газа в информационный сигнал, где применяются пьезоэлектрические, акустические, емкостные, индуктивные, анемометрические, оптоэлектронные, волоконно-оптические чувствительные элементы [3–7].

Использование в качестве чувствительного элемента волоконно-оптической деформационной решетки Брэгга перспективно в силу следующих причин:

- возможностью передачи энергии излучения и информационного сигнала по одному оптическому волокну на достаточно большие расстояния (к первичному измерительному преобразователю подходит только оптическое волокно);
- возможность конструктивной интеграции решетки в структуру деформационного фрагмента;
- высокая чувствительность к деформациям и незначительная постоянная времени решетки;
- возможность использования решеток в контакте с горючими смесями, что обеспечивает пожарную безопасность и взрывобезопасность;
- отсутствие чувствительности к электромагнитным воздействиям;
- относительно высокая химическая стойкость.

Частота вихреобразования связана с объемным расходом следующим соотношением [1–3]:

$$f = \frac{Sh \cdot Q}{\alpha \left(\frac{\pi}{4} - \alpha \right) D^3}, \quad (1)$$

где f – частота вихреобразования, Гц; D – диаметр проточной части, мм; α – отношение фронтальной ширины тела обтекания к диаметру; Sh – число Струхалия; Q – объемный расход, м³/с.

В свою очередь из теории подобия [8] вытекает, что число Струхалия Sh является функцией числа Рейнольдса Re :

$$Re = \frac{DV}{\nu}, \quad (2)$$

где V – средняя скорость потока, м/с; ν – кинематическая вязкость контролируемой жидкости, являющаяся функцией температуры, м²/с.

Из формул (1) и (2) следует, что одному и тому же расходу могут соответствовать разные значения Re , что является источником систематической погрешности. Кроме того, зависимость $Sh = f(Re)$ не линейна даже при фиксированной вязкости ν . Для того, чтобы обеспечить необходимую допустимую систематическую погрешность в широком диапазоне значений Q и V , необходимо учитывать нелинейность зависимости $Sh = f(Re)$, а также ввести коррекцию показаний на изменение вязкости ν .

В качестве деформационного фрагмента в работе используется конструкция типа «хвост» [9].

На сегодняшний день существует несколько способов, основанных на построении модели и способных дать адекватное представление об исследуемой системе. Такие способы принято называть способами моделирования. При всем многообразии способов рассматриваемого теории моделирования можно выделить две группы: аналитическое и имитационное модели-

рование. Аналитическое моделирование заключается в построении модели, основанной на описании поведения объекта или системы объектов в виде аналитических выражений – формул. При таком моделировании объект описывается системой линейных или нелинейных алгебраических или дифференциальных уравнений, решение которых может дать представление о свойствах объекта. К полученной аналитической модели с учетом вида и сложности формул применяются аналитические или приближенные численные методы. Применение аналитического моделирования ограничено сложностью получения и анализа выражений для больших систем. Имитационное же моделирование предполагает построение модели с характеристиками, адекватными оригиналу, на основе физического или информационного принципа. Это означает, что внешние воздействия на модель и объект вызывают идентичные изменения свойств оригинала и модели. При таком моделировании отсутствует общая аналитическая модель большой размерности, а объект представлен системой, состоящей из элементов, взаимодействующих между собой и с внешним миром. Задавая внешние воздействия, можно получить характеристики системы и провести их анализ. В последнее время имитационное моделирование все больше ассоциируется с моделированием объектов на компьютере, что позволяет в интерактивном режиме исследовать модели самых разных по природе объектов.

При имитационном моделировании расходомера воспроизводится алгоритм функционирования системы во времени – поведение системы; причем имитируются элементарные явления, составляющие процесс, с сохранением их логической структуры и последовательности протекания, что позволяет по исходным данным получить дающие возможность оценить характеристики системы сведения о состояниях процесса в определенные моменты времени. Основным преимуществом имитационного моделирования является возможность решения сложных задач. Имитационные же модели позволяют достаточно просто учитывать такие факторы, как наличие дискретных и непрерывных элементов, нелинейные характеристики элементов системы, многочисленные случайные и другие воздействия, которые часто создают трудности при аналитических исследованиях.

В настоящее время имитационное моделирование не только наиболее эффективный метод исследования систем, а часто единственный, практически доступный метод получения информации о поведении системы.

Для определения конструктивных параметров деформационного фрагмента проведено компьютерное моделирование в программных пакетах SolidWorks (модуль FlowSimulation) и ANSYS. Конструктивные параметры обеспечивают наличие ослабленного турбулентного режима, что позволяет судить о снижении потерь давления на участке вихреобразования, а также кинетической энергии отдельных слоев измеряемой среды. Деформационный фрагмент колеблется под воздействием скоростного напора, и его функционирование не зависит от физических характеристик жидкости. Соответствие размеров «хвоста» размерам вихря обеспечивает интегрирующий эффект и, как следствие, высокое отношение «сигнал/шум». Моделирование проводилось при следующих условиях: $D_y = 50$ мм; объемный расход $Q = 1,3 \dots 60$ м³/ч; начальная скорость ламинарного потока (при $Q = 60$ м³/ч) $V = 8,8$ м/с; динамическая вязкость $\eta = 0,025$ Па·с; плотность НП $\rho = 750$ кг/м³; температура НП $T = 40$ °С. Конструктивные параметры деформационного фрагмента «хвоста»: плотность материала пластины $\rho_{пл.} = 7700$ кг/м³; длина $L = 40$ мм; ширина $G = 20$ мм; толщина $K = 4$ мм.

По результатам измерения массовый расход вычисляется в соответствии с зависимостью [9]

$$Q_M = \rho Q, \quad (3)$$

где Q_M – массовый расход, кг/с; ρ – плотность жидкости, кг/м³.

В процессе компьютерного моделирования построены эпюры и графики: эпюры скоростей и давления; зависимость воздействия силы на деформационный фрагмент «хвост» от времени; зависимость воздействия силы на чувствительный элемент (ЧЭ) от времени; модели, описывающей деформацию, как деформационного фрагмента, так и ЧЭ; результаты моделирования собственных колебаний деформационного фрагмента в вакууме.

Эпюры на рис. 1 представляют собой интерпретацию скоростей и давлений, образующихся за телом обтекания вдоль деформационного фрагмента «хвоста» в результате воздей-

ствия потока на него. Третья эпора (рис. 2) является фрагментом вида слева и соответствует боковой стороне «хвоста».

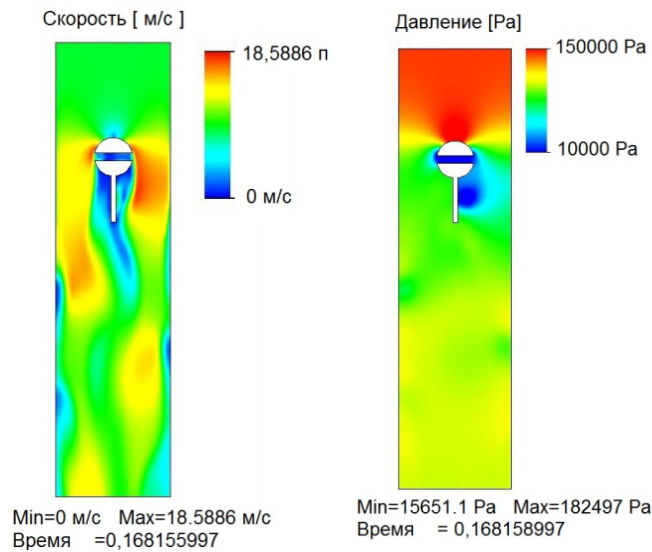


Рис. 1. Эпоры скоростей и давлений

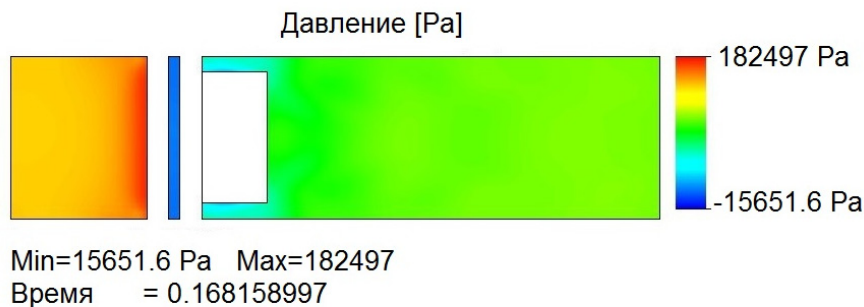


Рис. 2. Эпора давлений (вид слева)

При анализе можно сделать вывод о том, что развитый турбулентный режим не устанавливается. Это происходит вследствие наличия «хвоста» (эффект присоединения массы) [9], препятствующего конечному образованию вихрей, что и предусмотрено конструкцией. Данный факт является несомненным преимуществом, так как жидкость, протекающая в условиях переходного турбулентного режима, имеет меньшие потери кинетической энергии на характерной длине вихреобразования по сравнению с развитым турбулентным режимом. Снижается потеря давления при прохождении жидкости через вихреобразователь, т.е. стабилизация потока жидкости (переход ее обратно в ламинарный поток) происходит за более короткое время и на более коротком участке трубопровода.

Эпора давлений показывает воздействие отдельных вихрей на разные стороны хвоста, что обусловлено природой явления образования дорожек Кармана, в частности их цикличностью и периодичностью [1–3]. Поскольку момент времени был выбран статично, то и давление показано на эпоре всего на одной плоскости и составляет порядка 70 кПа. Передняя часть вихреобразователя принимает удар ламинарного потока, вследствие чего давление потока жидкости, оказываемое на фрагмент, существенно повышается. Увеличение давления ближе к основанию показанной части вызвано сложными гидромеханическими процессами и объясняется приближением слоев жидкости к «точке отрыва вихрей». В результате моделирования и на основании эпоры давлений и заданных конструктивных параметров «хвоста» был получен график зависимости периодической силы, действующей на «хвост» (силы Кармана) от времени (рис. 3).

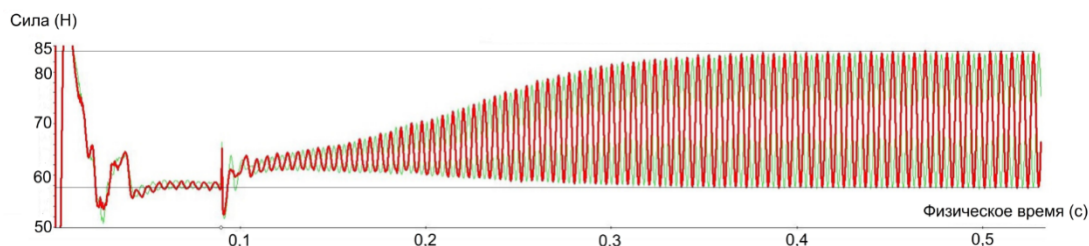


Рис. 3. Зависимость силы Кармана, действующей на деформационный фрагмент, от времени

Из графика видно, что в момент времени 120 мс начинает развиваться турбулентный режим и появляется периодическая сила Кармана, достигающая установившегося значения амплитуды в момент времени 350 мс, что позволяет получить значение силы в нижней и верхней точке амплитуды соответственно 58 и 85 Н.

На рис. 4 приведен график зависимости деформирующей силы Кармана от времени относительно ЧЭ.

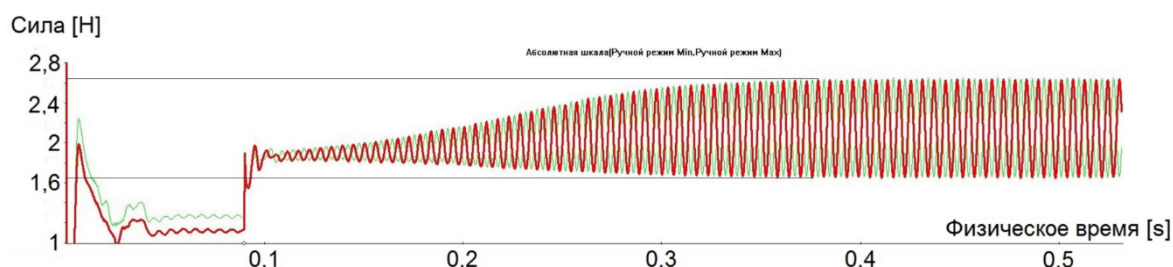


Рис. 4. Зависимость силы Кармана, действующей на ЧЭ, от времени

Процесс вихреобразования симметричен процессу воздействия на «хвост», однако диапазон сил меняется: 1,6...2,6 Н. В соответствии с графиком частота вихреобразования f определяется выражением

$$f = \frac{n}{\Delta t}, \quad (4)$$

где n – количество периодов за время Δt ; Δt – выбранный диапазон времени, мс.

Результаты моделирования деформации «хвоста» (деформационного фрагмента) в зоне установки чувствительного элемента приведены на рис. 5.

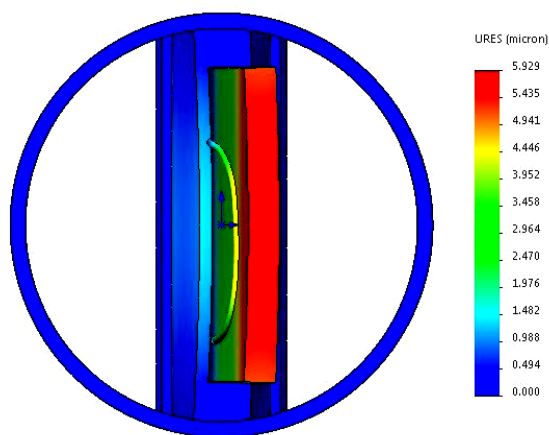


Рис. 5. Результаты моделирования деформации «хвоста» (деформационного фрагмента)

Из рисунка видно, максимальная деформация «хвоста» на отдельных участках составляет до 6 мкм. Используя первичный преобразователь с чувствительностью не хуже 1,4 пм/мг,

можно легко получить периодические колебания резонансной длины волны λ_c , необходимые для измерения объемного расхода (рис. 6).

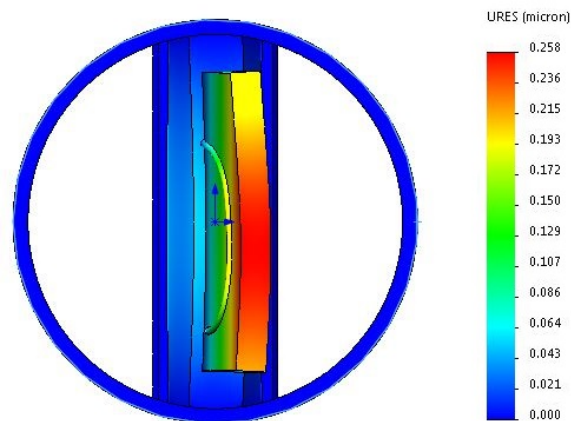


Рис. 6. Результаты моделирования деформации ЧЭ

При моделировании собственных колебаний деформационного фрагмента «хвоста» (рис. 7) в зоне установки ЧЭ, отвечающего за измерение плотности, деформация составила 0,2 мкм, что также достаточно для измерения плотности с чувствительностью не хуже 1,4 пм/мг, а частота собственных колебаний деформационного элемента $f = 4572$ Гц.

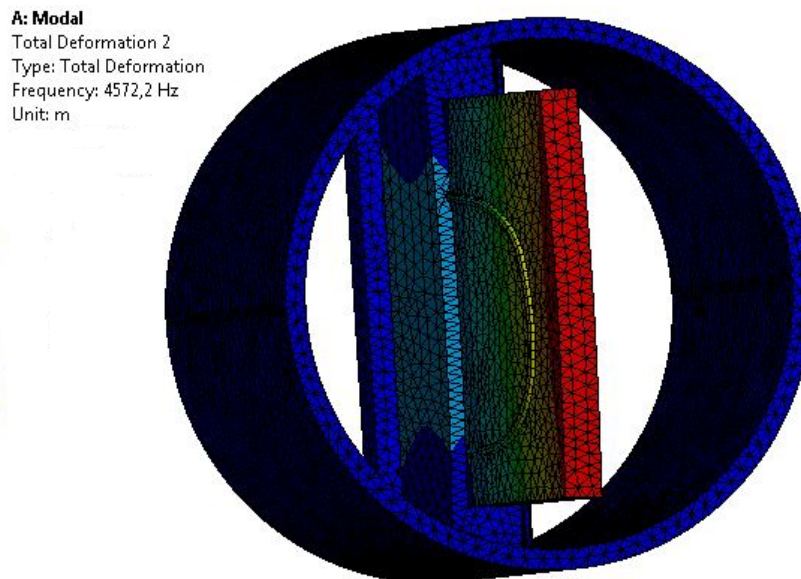


Рис. 7. Модель собственных колебаний деформационного фрагмента в вакууме

Зависимость частоты собственных колебаний f от конструктивных параметров деформационного фрагмента «хвост» определяется выражением [8]

$$f = \frac{C^2}{2\pi G^2} \sqrt{\frac{EI_{\text{ЧЭ}}}{\mu}}, \quad (5)$$

где C – постоянная, зависящая от конструктивных особенностей вихреобразователя; G – ширина деформационного фрагмента (ДФ), мм; L – длина ДФ, мм; E – модуль Юнга ЧЭ, Па; $I_{\text{ДФ}}$ – момент инерции второго порядка ДФ, кг·м³; μ – масса на единицу длины ДФ, кг/м.

Из формулы (5) следует, что частота собственных колебаний изменяется при изменении плотности текучей среды (эффект «присоединенной массы»). Упругая часть ЧЭ вихреобразующего элемента вызывает ускорение части окружающей среды, что приводит к уменьшению частоты собственных колебаний.

Заключение

Разработан измеритель массового и объемного расхода, а также плотности жидкой или газовой среды. В результате моделирования процессов вихреобразования определены конструктивные параметры тела обтекания и деформационного фрагмента. Получены значения частот колебаний деформационного фрагмента, зависящих от объемного расхода и плотности среды. На основе этих данных выбраны полосы пропускания фильтров нижних и верхних частот. Установленные в результате исследования значения сил, действующих на деформационный фрагмент, позволили оценить значение его деформаций и необходимого уровня чувствительности.

Библиографический список

1. *Кремлевский, П. П.* Расходомеры и счетчики количества веществ / П. П. Кремлевский. – Ленинград : Машиностроение, 1989. – 701 с.
2. *Киясбейли, А. Ш.* Вихревые измерительные приборы / А. Ш. Киясбейли, М. Е. Перельштейн. – Москва : Машиностроение, 1978. – 152 с.
3. *Киясбейли, А. Ш.* Вихревые счетчики – расходомеры / А. Ш. Киясбейли, М. Е. Перельштейн. – Москва : Машиностроение, 1974. – 160 с.
4. *Кратиров, Д. В.* Измерение расхода вихревым расходомером в условиях неравномерности потоков / Д. В. Кратиров, В. М. Мекешкин, Н. И. Михеев, В. М. Молочников // Материалы докладов национальной конференции по теплоэнергетике НКТЕ. – Казань, 2006. – С. 121–124.
5. Вихревые расходомеры DY (digitalYEWFLOW) и YF100 (YEWFLOW). – Москва : ЗАО «Техносистемы», 2007. – URL: tehnosystems.ru/katalog.php?id=27
6. *Акчурин, Р. Р.* Вихревой измеритель массового и объемного расхода на волоконно-оптических решетках Брэгга / Р. Р. Акчурин, В. А. Соловьев, А. С. Баранов // Вестник Пензенского государственного университета. – 2017. – № 3 (19). – С. 76–83.
7. *Баранов, А. С.* К вопросу о выборе метода измерения массового расхода криогенных жидкостей при проектировании расходомеров / А. С. Баранов, М. А. Фролов, А. А. Трофимов // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2015. – № 2 (12). – С. 19–27.
8. *Седов, Л. И.* Методы подобия и размерности в механике / Л. И. Седов. – Москва : Наука, 1967. – С. 71–76.
9. Устройство, выполненное с возможностью детектирования физической величины движущейся текучей среды, и соответствующий способ. – URL: <http://www.findpatent.ru/patent/255/2555206.html>. с экрана (дата обращения: 06.05.2017).
10. *Башта, Т. М.* Гидравлика, гидромашин и гидроприводы / Т. М. Башта, С. С. Руднев, Б. Б. Некрасов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1982. – 424 с.

References

1. Kremlevskiy P. P. *Raskhodometry i schetchiki kolichestva veshchestv* [Flow meters and counters number of substances]. Leningrad: Mashinostroenie, 1989, 701 p. [In Russian]
2. Kiyasbeyli A. Sh., Perel'shteyn M. E. *Vikhrevyye izmeritel'nyye pribory* [Vortex measuring devices]. Moscow: Mashinostroenie, 1978, 152 p. [In Russian]
3. Kiyasbeyli A. Sh., Perel'shteyn M. E. *Vikhrevyye schetchiki – raskhodometry* [Vortex flow meters]. Moscow: Mashinostroenie, 1974, 160 p. [In Russian]
4. Kratirov D. V., Mekeshkin V. M., Mikheev N. I., Molochnikov V. M. *Materialy dokladov natsional'noy konferentsii po teploenergetike NKTE* [Materials of reports of the national conference on heat power NCTE]. Kazan, 2006, pp. 121–124. [In Russian]
5. *Vikhrevyye raskhodometry DY (digitalYEWFLOW) i YF100 (YEWFLOW)* [Vortex flow meters DY (digitalYEWFLOW) and YF100 (YEWFLOW)]. Moscow: ZAO «Tekhnosistemy», 2007. Available at: tehnosystems.ru/katalog.php?id=27 [In Russian]
6. Akchurin R. R., Solov'ev V. A., Baranov A. S. *Vestnik Penzenskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Penza State University]. 2017, no. 3 (19), pp. 76–83. [In Russian]
7. Baranov A. S., Frolov M. A., Trofimov A. A. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurements. Monitoring. Management. Control]. 2015, no. 2 (12), pp. 19–27. [In Russian]
8. Sedov L. I. *Metody podobiya i razmernosti v mekhanike* [Similarity and dimensionality methods in mechanics]. Moscow: Nauka, 1967, pp. 71–76. [In Russian]
9. *Ustroystvo, vypolnennoe s vozmozhnost'yu detektirovaniya fizicheskoy velichiny dvizhushcheyasya tekuchey sredy, i sootvetstvennyy sposob* [A device designed to detect the physical quantity of a moving flu-

id, and the corresponding method]. Available at: <http://www.findpatent.ru/patent/255/2555206.html>. s ekrana (accessed May 06, 2017). [In Russian]

10. Bashta T. M., Rudnev S. S., Nekrasov B. B. *Gidravlika, gidromashiny i gidroprivody* [Hydraulics, hydraulic machines and hydraulic drives]. 2nd ed., rev. and suppl. Moscow: Mashinostroenie, 1982, 424 p. [In Russian]

Акчурин Роман Ринатович

магистрант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: iit@pnzgu.ru

Akchurin Roman Rinatovich

mastergraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Трофимов Алексей Анатольевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра информационно-измерительной
техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: iit@pnzgu.ru

Trofimov Aleksey Anatol'evich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of information
and measurement technology and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Акчурин, Р. Р. Вихревой измеритель объемного и массового расхода жидкости / Р. Р. Акчурин, А. А. Трофимов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 1 (31). – С. 51–58. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-1-7.