ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ПИТАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНО-ПЕРЕДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

МАТВЕЕВ Андрис Илмарович, *РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева* **АНДРЕЕВ Сергей Андреевич,** *РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева*

В статье обоснована целесообразность питания элементов телеметрических систем электрической энергией, получаемой посредством преобразования кинетической энергии воды в трубопроводах. Обоснованы конструктивные параметры вихревого устройства, обеспечивающие наиболее эффективное преобразование кинетической энергии воды. Определение этих параметров осуществлялось на компьютерной модели, в основу которой положен численный метод решения уравнений Больцмана (LBM, Lattice Boltzmann Method). В результате моделирования было установлено, что наиболее высокие значения вертикальной составляющей ускорения достигаются при радиусе препятствия в форме круга, установленного на расстоянии, превышающем удвоенную характеристическую длину трубы, а для обеспечения одновременно максимальных значений скорости и ускорения расстояние между препятствием и пьезоэлементом должно составлять 1,6...1,7 от характеристической длины трубы. При этом было отмечено, что частота вихреобразования растет с увеличением скорости потока и с уменьшением размеров препятствия.

Введение. Одной из наиболее сложных задач при конструировании телеметрических систем с беспроводной передачей информации является обеспечение электропитанием измерительно-передающих устройств. Традиционное решение этой задачи сводится к использованию химических источников электрической энергии, которые недолговечны и требуют обслуживания. Это обслуживание обычно заключается в периодической зарядке источников или их замене. Использование в качестве источников компактных преобразователей возобновляемой энергии пока не нашло широкого применения из-за низкого качества получаемой электрической энергии, ее нестабильности, малой плотности и случайного характера.

Расчеты показывают, что в ряде случаев электрическая энергия для питания измерительнопередающих устройств может быть получена в результате частичного использования энергии измеряемых величин. К таким случаям относятся, например, беспроводные телеметрические системы контроля текущего расхода воды в оросительных системах или сетях централизованного водоснабжения [1, 10].

Наиболее простое преобразование кинетической энергии потока в механическую форму достигается применением ротационных устройств. Однако при больших диаметрах трубопроводов они становятся неэффективными ввиду высокой стоимости. Эти устройства весьма чувствительны к динамическим воздействиям потока. Кроме того, ротационные преобразователи требуют периодической очистки рабочих поверхностей лопаток и обслуживания подшипников [5], что снижает их эксплуатационные показатели.

Перечисленных недостатков лишены пьезоэлектрические элементы, осуществляющие прямое преобразование кинетической энергии

потока в электрическую форму [7]. Однако использование пьезоэлектрических элементов ограничивается специфическими требованиями к характеру течения воды. Известно, что воздействие потока на пьезоэлектрические элементы должно происходить в импульсном режиме. В то же время поток воды в исходном состоянии представляет собой непрерывно движущуюся массу, динамические показатели которой изменяются только при изменении расхода. Поэтому необходимым условием работы пьезоэлектрических преобразователей является создание своеобразных квантов массы, которое может быть достигнуто установкой специальных препятствий на пути следования потока перед его взаимодействием с пьезоэлементами [6].

Техническая реализация квантования потока осуществляется образованием вихревой дорожки Кармана. При этом в области трубопровода, сосредоточенной между препятствием и пьезоэлементом, движение воды становится хаотичным, сопровождающимся периодическими (и разночастотными !) «всплесками» и микротечениями в трехмерных координатах.

Следует признать, что эффективность квантования потока воды в значительной степени зависит от соотношения параметров процесса: формы препятствия, соотношения геометрических размеров препятствия и диаметра трубопровода, а также от расстояния между препятствием и пьезоэлементом. Кроме того, на эффективность квантования существенно влияют режим течения жидкости и ее скорость. Сложность процесса также обусловлена различающимися значениями температуры воды в различных точках хаотичного потока [9]. Следствием этого является неоднородность плотности воды в этих точках, что еще больше искажает характер течения. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

47



АГРАРНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Кроме того, при частых изменениях режима водопотребления начинают проявляться переходные процессы, определяющие некоторое запаздывание в формировании вихревой дорожки.

Целью работы является определение конструктивных параметров вихревого устройства, обеспечивающего наиболее эффективное преобразование кинетической энергии воды в электрическую форму.

Методика исследований. В качестве материала исследований использовали современные знания по теории течения жидкости, известные закономерности и доказанные математические соотношения, связывающие изучаемые физические величины. В работе применяли индуктивный метод исследования, основанный на изучении частных физических явлений и распространении полученных выводов на решение глобальной задачи, а также метод компьютерного моделирования на языке Python 2.7.

Результаты исследований. Для оценки зависимости генерируемой электрической энергии $E_{_{9}}$ от воздействующей на пьезоэлемент механической энергии $E_{_{M}}$ используется коэффициент электромаханической связи, обозначаемый K_{15} [2]:

$$E_{\mathfrak{s}} = K_{1\mathfrak{s}}^2 E_{\mathfrak{m}} \tag{1}$$

Кинетическая энергия воды, взаимодействующей с плоскостью, расположенной перпендикулярно направлению потока, может быть определена в соответствии с выражением

$$E_{\rm m} = \frac{mv^2}{2},\tag{2}$$

где m – масса воды, кг; v – скорость потока, м/с.

Представив поток в виде сплошного перемещающегося тела, определив длину его пробега в течение секунды линейной скоростью *v* и заменив величину массы произведением объема и плотности *р*, это выражение можно свести к следующему виду [4]:

$$E_{\rm m} = \frac{Sv\rho v^2}{2} = \frac{S\rho v^8}{2}.$$
 (3)

Следует отметить, что выражение (3) характеризует только величину энергии статического давления, не учитывая ее переменную составляющую, наличие которой является обязательным для реализации пьезоэффекта.





Кроме того, даже располагая информацией о полной механической энергии, несмотря на наличие зависимости (1), мы не можем записать универсальную функцию, связывающую энергию потока жидкости с электрической энергией на выходе пьезоэлемента. Это объясняется тем, что зависимость эффективности преобразования от динамической составляющей механического усилия для каждого пьезоэлемента является индивидуальной из-за разности их резонансных частот. Однако не вызывает сомнения, что в общем виде полученная электрическая энергия может быть представлена в следующем виде:

$$E_{\mathfrak{s}} = f(F; \, \frac{dF}{dt}; N), \qquad (4)$$

где *F* – статическая составляющая (величина ме-

ханического усилия, кг); *аt* – динамическая составляющая (скорость приложения усилия, кг/с); *N* – обобщаюший коэффициент, учитывающий конструктивные свойства пьезоэлемента, гидравлического препятствия и их взаимное расположение.

Следует иметь в виду, что содержащиеся в формуле (4) значения F и df/dt в нашем случае не эквивалентны параметрам, характеризующим основной поток. Эти значения по отношению к нему являются вторичными, поскольку характеризуют импульсный поток в вихревой дорожке. Поскольку статическая составляющая однознач-

но связана со скоростью вторичного потока v_1 , а

динамическая – с его ускорением $\frac{dv_1}{dt}$, мы вправе записать:

$$E_{\mathfrak{s}} = f_1(v_1; \frac{dv_1}{dt}; N).$$
 (5)

Таким образом, поиск оптимальных параметров гидроэлектрического преобразователя можно ограничить определением условий формиро-

вания максимальных значений v_1 и $rac{dv_1}{dt}$.

Для обеспечения требуемой точности результатов поиска, а также снижения его трудоемкости, исследования производили на специально составленной компьютерной модели.

В основу модели был положен численный метод решения уравнений Больцмана (LBM, Lattice Boltzmann Method) [4]. Этот метод представляет собой существенно упрощенную реализацию оригинальной идеи Больцмана за счет сокращения частиц, их возможных положений в пространстве и возможных скоростей.

В используемом методе частицы могут располагаться только в узлах решетки. Каждый такой узел представляет собой некоторый объем жидкости, содержащий молекулы с определенным распределением скоростей. Скорость частицы в двумерном случае имеет всего 8 различных направлений и 3 величины. Течение времени также рассматривается дискретно [3]. Каждый узел решетки представляет собой некоторый объем

среды, содержащий молекулы, которые характеризуются определенным распределением скоростей. Особенностью модели является то, что в течение одного временного шага возмущение передается только на один шаг решетки, то есть на ближайший узел. При этом в модели используется виртуальная система единиц, в которой расстояние, скорость и время напрямую не связаны с системой СИ.

Таким образом, исследуемая модель может быть обозначена аббревиатурой D2Q9, где число 2 обозначает двумерность, а число 9 – количество скоростей.

$$f_i(\vec{x} + \vec{e_i} \cdot \Delta t_6, t_6 + \Delta t_6) = f_i(\vec{x}, t_6) + \frac{1}{\tau} (f_i^{eq} - f_i), (6)$$

где x – координаты отдельного узла; \vec{e}_l – дискретная решетчатая скорость в направлении i; Δt_6 – длительность интервала моделирования, $\Delta t_6 = 1$; t_6 – время; f_i – функция распределения;

 τ – решетчатое время релаксации; f_i^{eq} – равновесная функция распределения.

В процессе моделирования поток жидкости представляется в виде сетки, каждый узел которой характеризуется значениями скорости и плотности. Поскольку одновременно с этими параметрами фиксируются текущие моменты времени, впоследствии программным путем легко рассчитываются величины ускорений.

Значения плотности и скорости в каждом узле формируются программой исходя из значений функций распределений:

$$\rho_6 = \sum_0^9 f_i, \tag{7}$$

где р_б – макроскопическая плотность среды;

$$v_1 = \frac{f_2 + f_5 + f_6 - f_4 - f_7 - f_2}{\rho_6},\tag{8}$$

где υ_1 – вертикальная составляющая скорости узла.

Программой используется вертикальная составляющая скорости узлов, поскольку пьезоэлементы, как правило, выполняются в форме лопатки, расположенной вдоль потока [8]. При этом влияние горизонтальной составляющей остается минимальным. Впоследствии полученные результаты можно использовать для оценки энергии, приходящейся на пьезоэлемент, в соответствии с выражением (3).

В процессе моделирования осуществляли варьирование скоростью основного потока υ, формой препятствия *K*, расстоянием от препятствия до пьезоэлемента L и размерами препятствия R. Расстояние между препятствием и началом моделируемого пространства L соответствовало ширине потока, а ось потока совпадала с центром препятствия.

Скорость основного потока варьировалась на трех уровнях: от 0,08 до 0,16 узла /шаг с интервалом 0,04 узла/шаг. Расстояние между препятствием и пьезоэлементом варьировалось от 100 до 500 узлов с шагом 1 узел. Размеры препятствия определялись радиусом круга *R* и варьировали на трех уровнях, составляющих соответственно 10, 15 и 20 % от ширины исследуемого потока.

На рис. 1 представлена графическая интерпретация модели. Вертикальная составляющая скорости вихря характеризуется насыщенностью цвета соответствующей области пространства. Оранжевый цвет определяет вертикальную составляющую скорости, направленной вверх, зеленый – вниз. Таким образом, максимальный пьезоэффект наблюдается при максимальной частоте чередования цветов с максимальной насыщенностью (амплитудой).

Значение вязкости во всех экспериментах соответствовало 0,02 относительным единицам, подразумевая один тип жидкости. Внутренняя стенка трубы принималась и моделировалась в виде гладкой поверхности. На рис. 2 представлена зависимость вертикальной составляющей скорости υ_1 (скорости вторичного потока) от расстояния между препятствием и пьезоэлементом для различных скоростей первичного потока ⁰ в течение 16000 операций. При этом зависимости, соответствующие скоростям первичного потока 0,08, 0,12 и 0,16 узла/шаг изображены тонкими, нормальными и жирными кривыми соответственно. Помимо этого представленный график отражает зависимость скорости вторичного потока от радиуса препятствий: для радиуса, соответствующего 10 % от ширины потока, кривая скорости показана синим цветом, для 15 % – зеленым, для 20 % – красным.

По рис. 2 легко заметить, что максимальное значение скорости вторичного потока при всех скоростях первичного потока и всех размерах препятствий наблюдается при удалении пьезоэлемента от препятствия на расстояние 40–80 узлов.

В соответствии с выражением (5) эффективность пьезоэффекта во многом определяется ус-

корением входного воздействия $\frac{dv_1}{dt}$.



Рис. 1. Графическая интерпретация модели потока в трубе с препятствием



Поскольку образование вихревой дорожки носит периодический характер, оценка величины этого ускорения может осуществляться по его частоте (см. таблицу).

Из данных таблицы видно, что частота вихреобразования растет с увеличением скорости потока и с уменьшением размера препятствия. Полученные данные позволяют сделать вывод об увеличении кинетической энергии, действующей на пьезоэлемент, и одновременном уменьшении частоты вихреобразования при увеличении размеров препятствия.

Для построения зависимостей ускорения вторичного потока от расстояния между препятствием и пьезоэлементом значения скорости в каждой точке графика на рис. 2 были поделены на величину длительности полупериода изменения скорости. Результатом вычислений стали зависимости, представленные на рис. 3.

Нетрудно заметить, что характеры кривых, представленных на рис. 2, 3, в целом совпадают. Вместе с тем, для достижения максимального ускорения вертикальной составляющей вторичного потока необходимо создавать условия, при которых расстояние от оси препятствия до пьезоэлемента составляло бы 190-249 узлов (немного превышать удвоенную характеристическую длину трубы). Для одновременного удовлетворения условий максимума вертикальных составляющих по скорости и ускорению вторичного потока, а также при недостатке информации о характеристиках трубопровода можно рекомендовать устанавливать препятствие на удалении от пьезоэлемента на расстояние, соответствующее 1,6-1,7 от характеристической длины трубы.

Несмотря на явновыраженные максимумы кривых, соответствующих малым значениям расстояния от оси препятствия до пьезоэлемента (30-50 узлов на рис. 2, 3), эксплуатация устройс-

(Узлы решетки/Шаг времени)

Рис. 2. Зависимости вертикальной составляющей скорости v_1 (скорости вторичного потока) от

расстояния между препятствием и пьезоэлементом для различных скоростей

первичного потока в в течение 16000 операций

тва в этой зоне нежелательна, так как элементы конструкции пьезоэлектрического преобразователя начинают выполнять роль препятствий, порождая дополнительные вихревые дорожки. Возникающие при этом вторичные потоки не используются и создают дополнительные нагрузки на трубопроводы.

При необходимости преобразования энергии высокоскоростных потоков и малых расстояниях между препятствием и пьезоэлементом целесообразно использовать препятствия, радиус которых не превышает 10 % от ширины моделируемого пространства.

Заключение. Наиболее высокие значения вертикальной составляющей ускорения вторичного потока достигаются при радиусе препятствия в форме круга, установленного на расстоянии, превышающем удвоенную характеристическую длину трубы. Частота вихреобразования растет с увеличением скорости потока и с уменьшением размеров препятствия. При неизвестных технических характеристиках участка трубопровода с устанавливаемым пьезоэлектрическим преобразователем для обеспечения максимальных значений скорости и ускорения вторичного потока расстояние между препятствием и пьезоэлементом должно составлять 1,6–1,7 от характеристической длины трубы. Уменьшение расстояния между препятствием и пьезоэлементом до значения, составляющего половину характеристического длины трубы, может привести к снижению энергетических показателей устройства из-за появления вторичной вихревой дорожки вследствие влияния на поток элементов пьезоэлектрического преобразователя. При необходимости преобразования энергии высокоскоростных потоков и расстоянии между препятствием и пьезоэлементом меньшим 1,5 характеристической длины трубы, целесообразно использовать круглые препятствия, радиус которых не превышает 10 % от ширины моделируемого пространства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев С.А., Судник Ю.А., Матвеев А.И. Устройство для измерения количества потребленной жидкости. Патент РФ на полезную модель № 147360, опубл. 10.11.2014. Бюл. № 31, заявка № 2014116863 от 28.04.2014.

2. Бобцов А.А., Бойков В.И., Быстров С.В., Григорьев В.В. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений. – СПБ ГУ ИТМО, 2011. – 131 с.

3. Дещеревский О.А. Курсовая работа по дисциплине "Параллельное программирование" Моделирование гидродинамики методом решеточных уравнений Больцмана. - М., 2015. - 15 с.

4. *Зубов В.Г.* Механика. – М.: Наука, 1978. – 352 с. (серия «Начала физики»).

5. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества веществ: справочник. – СПб: Политехника, 2002. – 409 c.

6. Лапин А.П., Дружков А.М., Кузнецова К.В. Вихревой метод измерения расхода: история вопроса и направления исследований // Вестник Южно-Уральского



Длительность полупериода вертикальной составляющей скорости в зависимости от начальной скорости потока, формы и размера препятствия

Нацальная ско-		Размер препятствия (радиус	Длительность полу-
пачальная ско-	Форма препятствия	круга, % от ширины иссле-	периода, количество
рость узел/шаг		дуемого потока)	операций
0,08,	Круг	10	555
0,08	Круг	15	605
0,08	Круг	20	630
0,12	Круг	10	369
0,12	Круг	15	414
0,12	Треугольник с вершиной, обращен-	15	408
	ной к пьезоэлементу		
0,12	Треугольник с основанием, обращен-	15	401
	ным к пьезоэлементу		
0,12	Полоса	15	367
0,12	Круг	20	530
0,16	Круг	10	284
0,16	Круг	15	319
0.16	Круг	20	411



Рис. 3. Зависимости вертикальной составляющей ускорения V₁ (ускорения вторичного потока) от расстояния между препятствием и пьезоэлементом для различных скоростей первичного потока V в течение 16000 операций

государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2014. – С. 19–28.

7. *Рутчин В.А.* Пьезоэлемент как альтернативный источник энергии // Новые технологии – нефтегазовому региону: материалы Всерос. науч.-практ. конф. – Тюмень, 2014. – С. 208–211.

8. *Самоловов Д.А., Губкин А.С.* Вычислительные возможности метода решеточного кинетического уравнения Больцмана // Вестник Тюменского государственного университета. – 2014. – № 7. – С. 83–91.

9. Сейдагалиев М.К., Генаев Р.В. Метод генерации электричества с использованием пьезокерамических пластин // Научное сообщество студентов XXI столетия. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ: сб. статей. – Новосибирск, 2015. – № 9(35). – С.225–229.

10. Amphiro Smart Water Meters, Amphiro AG, c/o ETH Zurich, WEV G217, Weinbergstrasse 56/58, CH-8092, Zurich Switzerland, Copyright 2013, Amphiro AG, 6 P,

11. *Sukop M.C., Thorne D.T.* Lattice Boltzmann modeling: an introduction for geoscientists and engineers. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. 172 c.

Матвеев Андрис Илмарович, аспирант кафедры «Автоматизация и роботизация технологических процессов имени академика И.Ф. Борнодина», РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева. Россия.

Андреев Сергей Андреевич, канд. техн. наук, доцент кафедры «Автоматизация и роботизация технологических процессов имени академика И.Ф. Борнодина», РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева. Россия.

127550, г. Москва, Тимирязевская улица, 49. Тел.: (499) 977-1455.

Ключевые слова: метод решетчатых уравнений Больцмана; вихри, гидродинамика; численное моделирование; конструктивные параметры расходомера; энергия потока воды.

INVESTIGATION OF PARAMETERS OF THE HYDRO-ELECTRIC TRANSDUCER FOR MEASURING-TRANSMISSION DEVICE

Matveev Andris Ilmarovich, Post-graduate Student of the chair "Automatization and Robotization of Technological Processes named after Academician I.F. Borodin", Russian Agrarian University, Moscow Agricultural academy named after K.A. Timiryazev. Russia.

Andreev Sergey Andreevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the chair "Automatization and Robotization of Technological Processes named after Academician I.F. Borodin", Russian Agrarian University, Moscow Agricultural academy named after K.A. Timiryazev. Russia.

Keywords: Lattice Boltzmann Method; vortex; hydrodynamics; articulated modeling; design parameters of the flowmeter; water flow energy.

The article substantiates the expediency of feeding the elements of telemetric systems with the help of electric en-

ergy, obtained by converting the kinetic energy of water in pipelines. The article substantiates the design parameters of the vortex device, which ensure the most effective conversion of the kinetic energy of water. The determination of these parameters was carried out on a computer model based on the Lattice Boltzmann Method. As a result of the simulation, it was found out that the highest values of the vertical component of the acceleration are achieved with an obstacle radius in the form of a circle set at a distance exceeding the doubled characteristic length of the pipe. To ensure simultaneous maximum values of speed and acceleration, the distance between the obstacle and the piezoelectric element should be 1.6 ... 1.7 from the characteristic length of the pipe. It was noted that the vortex formation frequency increases with increasing flow velocity and with a decrease in the size of the obstacle.



