

УДК 620.1.08

DOI 10.18698/0536-1044-2016-9-45-52

Методы и средства измерения расхода жидкости и газа: перспективы применения ультразвуковых преобразователей с широким измерительным лучом

В.И. Хлебнова

Санкт-Петербургский горный университет; ООО «Константа», 198095, Санкт-Петербург, а/я 42

Methods and Instruments for Measuring the Rate of Liquids and Gases: Prospects of Application of Ultrasonic Transducers with a Wide Measuring Beam

V.I. Khlebnova

Saint Petersburg Mining University; OOO Constanta, 198095, Saint Petersburg, P.O. Box 42



e-mail: hlebnova-violetta@yandex.ru

i Развитие автоматизации производства и транспортирования газов и жидкостей тесно связано с нарастающим использованием вычислительной техники и электроники. В связи с этим возможности измерительных приборов, контролирующих те или иные параметры и процессы, являются одним из определяющих факторов их качества. Поскольку все ресурсы требуют строгого учета их объемов, в настоящее время ни одна отрасль промышленности не обходится без применения расходомеров. В России ужесточается государственный контроль за рациональным использованием ресурсов в отраслях нефтедобычи и нефтепереработки, поэтому задача измерения расхода нефти становится все более актуальной. В статье приведены описание и результаты сравнительного анализа наиболее применяемых современных методов и средств измерения скорости потоков жидкостей и газов. Представлены принцип работы, достоинства и недостатки каждого из них. Показано, что из всех рассмотренных методов измерения наиболее перспективным является ультразвуковой с использованием волн Лэмба.

Ключевые слова: сужающие устройства, турбинный расходомер, вихревой расходомер, ультразвуковой расходомер, волны Лэмба.

i The development of industrial automation and transportation of gases and liquids is closely linked with the growing usage of computers and electronics. Therefore, performance capabilities of measuring instruments controlling certain parameters and processes are one of the factors determining their quality. Since all the resources require strict accounting of volumes, currently no industry can do without the use of flow meters. In Russia state control over the rational use of resources in oil production and oil refining is tightening, so the task of measuring the oil flow rate is becoming urgent. The article describes the results of the comparative analysis of the most commonly used modern methods and instruments for measuring flow rates of liquids and gases. It presents the operating principle, advantages and disadvantages of each. It is shown that out of all the above measuring methods the ultrasonic Lamb wave method is the most promising one.

Keywords: orifice, turbine flow meter, vortex flow meter, ultrasonic flow meter, Lamb waves.

В настоящее время существует множество видов приборов контроля скорости движения веществ (расходомеров), у каждого из которых имеются свои достоинства и недостатки. Цель работы — рассмотрение и сравнение наиболее распространенных методов учета расхода с обоснованием выбора ультразвукового расходомера как наиболее перспективного.

Расходомеры переменного перепада давления. Приборы данного типа (рис. 1) имеют ряд разновидностей, но наибольшей популярностью на сегодняшний день пользуются расходомеры с сужающими устройствами — диафрагмами 2. Принцип действия таких расходомеров заключается в зависимости перепада давления, возникающего в результате преобразования в диафрагме части потенциальной энергии в кинетическую, от расхода вещества [1]. Измеряют давление дифференциальным манометром — дифманометром 1. Для повышения точности измерений (уменьшения степени турбулентности потока) используют струевыпрямители.

Зависимость расхода вещества Q от перепада давления Δp [2] имеет вид

$$Q = \alpha \varepsilon F_0 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}},$$

где α и ε — коэффициенты расхода и расширения; F_0 — площадь отверстия сужающего устройства; ρ — плотность вещества.

Таким образом, относительная погрешность будет зависеть от целого ряда факторов: погрешности измерительных средств перепада давления, абсолютного давления, температуры и др. [3].

Достоинствами приборов, основанных на методе переменного перепада давления, являются универсальность (возможность измерения расхода почти любых жидких и газообразных веществ в трубах малого и большого диаметров

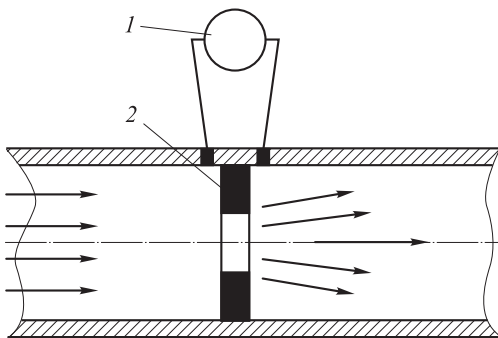


Рис. 1. Расходомер переменного перепада давления

с достаточно широким диапазоном температур и давлений) и низкая стоимость.

К недостаткам относятся высокая относительная погрешность (до 1...2 %) и малый диапазон уровней сигналов, в пределах которых можно получить корректный результат измерения (далее — динамический диапазон), равный примерно 5:1, а также сложность применения в потоках с примесями, пульсирующих потоках и при малых расходах вещества [4].

Тахометрические расходомеры. В таких приборах используется зависимость расхода от скорости движения чувствительных элементов, помещенных в поток. Из всех разновидностей тахометрических расходомеров наибольшее распространение получили турбинные. На рис. 2 показан турбинный расходомер, в котором в качестве преобразователя использована катушка 3 с магнитом. Принцип действия прибора заключается в следующем. Одна из лопастей турбинки 1 — ферромагнитная, и при ее прохождении мимо катушки с магнитом изменяется магнитный поток, пронизывающий катушку, что вызывает в ней наведение ЭДС. При этом число оборотов турбинки, умноженное на число лопастей, будет равно частоте следования импульсов. Далее сигнал поступает на измерительный блок, где преобразуется в токовый, изменяющийся пропорционально расходу [5].

В общем виде зависимость числа оборотов лопастей турбинки в единицу времени от объемного расхода жидкости Q_0 имеет вид

$$n = f(Q_0, \nu, \rho, M_c, D, d_n, d_b, z, l, H),$$

где ν и ρ — кинематическая вязкость и плотность жидкости; M_c — момент сопротивления от трения в опорах и реакции тахометрического преобразователя; D — диаметр трубопровода; d_n и d_b — наружный и внутренний диаметры лопастей турбинки; z — число лопастей тур-

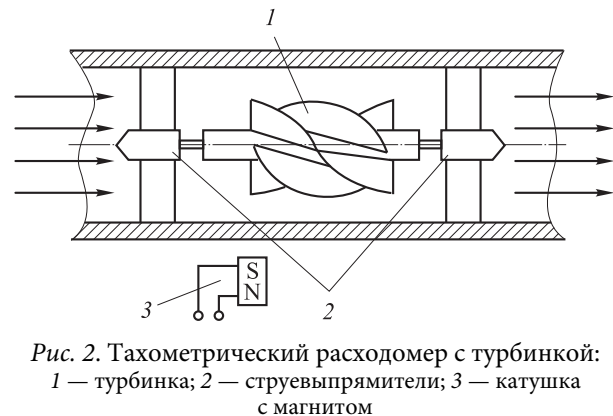


Рис. 2. Тахометрический расходомер с турбинкой: 1 — турбинка; 2 — струевыпрямители; 3 — катушка с магнитом

бинки; l — осевая длина лопастей; H — шаг винтовой линии.

Для измерения расхода газа турбинные расходомеры применяют реже. Это связано с тем, что вследствие малой плотности газа достаточно большой вращающий момент достигается только при больших давлениях, что уменьшает диапазон измерения расходомера и повышает порог чувствительности — параметр, определяющий погрешность измерения. Кроме того, в газовой среде ускоряется износ подшипников [6].

Достоинствами приборов, основанных на тахометрическом методе, являются: широкий диапазон температур; малые потери давления; высокая стойкость давления воздействию; нечувствительность к загрязнениям.

К основным недостаткам относятся существенная зависимость от вязкости среды и быстрое изнашивание вращающихся деталей, вследствие чего расходомеры имеют ограниченный срок службы. Динамический диапазон ~30:1 [7].

Вихревые расходомеры. Принцип действия таких приборов основан на зависимости частоты колебаний давления от расхода вещества. Колебания образуются в потоке жидкости или газа за счет вихреобразования после препятствий определенной формы [8]. Это явление, имеющее название «срыв вихрей», обычно возникает при обтекании трапецеидальной призмы (рис. 3). Чувствительный элемент 2, воспринимающий колебания, находится позади препятствия 1.

Частота колебаний вихрей f прямо пропорциональна скорости потока ϑ :

$$f = \text{Sh} \frac{\vartheta}{d},$$

где Sh — число Струхала; ϑ — скорость потока; d — ширина преграды.

Достоинствами приборов, основанных на вихревом методе, являются: отсутствие подвижных частей, простота, надежность, незави-

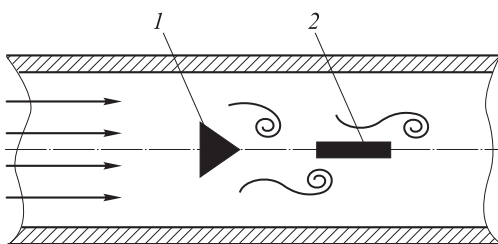


Рис. 3. Вихревой расходомер

симось от показаний температуры и давления, большой диапазон измерения и малая относительная погрешность (0,5...1,5 %).

К недостаткам относятся ограничение в применении (при малых скоростях поток обходит препятствия без вихреобразования), значительные потери давления (до 50 кПа) и трудности в измерении загрязненных и агрессивных веществ. Динамический диапазон порядка 50:1.

Ультразвуковые расходомеры. Принцип действия таких расходомеров основан на зависимости параметров распространяющейся в среде акустической волны от скорости потока этой среды [9]. Такие приборы комплектуются в основном двумя видами преобразователей: фазосдвиговыми и времяимпульсными.

Фазосдвиговой преобразователь (рис. 4) оснащен пьезопреобразователями 1 и 2, работающими в совмещенном режиме излучения-приема. Принцип действия данного метода основан на эффекте Доплера и заключается в следующем. Акустический сигнал известной частоты распространяется в среде, затем, отражаясь от движущихся частиц, попадает на преобразователь, где вычисляют усредненную частоту сигнала и сравнивают с ее исходной частотой [10]. Измеренная разность Δf_d является мерой расхода потока вещества Q :

$$\Delta f_d = \frac{f_1 (\cos \alpha' - \cos \alpha'') QB}{c},$$

где f_1 — исходная частота ультразвуковых колебаний; α' и α'' — углы между вектором скорости частицы отражателя и направлением соответственно исходного и отраженного луча; Q — расход; B — функция, зависящая от параметров измеряемой среды и трубопровода: числа Рейнольдса Re , плотности среды ρ , вязкости среды μ , времени t , давления p , проницаемости ϵ , диаметра трубы D ; c — скорость акустических колебаний в измеряемой среде.

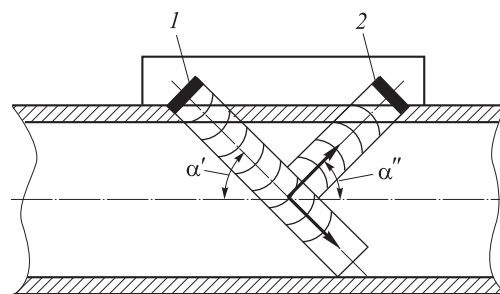


Рис. 4. Фазосдвиговой преобразователь

Достоинством такого метода является возможность применения в загрязненных средах. Динамический диапазон в среднем составляет 120:1.

Недостатками, по сравнению с другими ультразвуковыми методами, являются врезной способ монтажа и невозможность применения в чистых средах, так как там отсутствуют отражающие частицы [11].

Времяимпульсные расходомеры (рис. 5) созданы на основе соответствующего метода, принцип действия которого заключается в зависимости скорости потока от разности времени перемещения коротких ультразвуковых импульсов по направлению потока и против него на длине пути. По способу монтажа приборы могут быть как врезными, так и накладными.

Импульс пуска от генератора Γ поступает на пьезоэлементы П1 и П2 поочередно через управляемые ключи К1 и К2. В первый момент времени ключ К1 замкнут на П1, а К2 — на зарядное устройство ЗУ1, и пьезоэлемент П1 посылает в среду ультразвуковые импульсы. Одновременно ключ К2 включает ЗУ2 (от генератора Γ импульс поступает как на П1, так и на

ЗУ2, устанавливая его в активное состояние проводимости). При этом включается устройство С2, вырабатывающее напряжение пилообразной формы. В момент прихода ультразвукового импульса от П1 к П2 устройство С2 отключается. Аналогично импульс проходит через преобразователь П2 одновременно с зарядного устройства ЗУ1, и за время прохода ультразвукового импульса против потока от П2 к П1 устройство С1 вырабатывает пилообразное напряжение. Максимальное значение напряжения от С1 и С2, пропорциональное времени, фиксируется с помощью измерительного устройства ИУ. Такой цикл повторяется 400 раз в секунду [12].

Зависимость скорости потока v от разности времени распространения ультразвукового сигнала по потоку и против него Δt можно представить в виде

$$v = \frac{\Delta t c_0^2}{2L_a \cos \alpha},$$

где c_0 — скорость ультразвука в неподвижной воде; L_a — длина активной части акустического канала.

На сегодняшний день приборы времяимпульсного метода комплектуются первичными преобразователями, работающими в двух режимах (рис. 6): с узким измерительным и широким измерительными лучами.

Первый из них создается поверхностными волнами Релея. Данный режим можно реализовать врезными преобразователями (рис. 7, в) и накладными, имеющими два исполнения: V-образное (рис. 7, а) для широких труб и W-образное для узких (рис. 7, б).

Первый режим с использованием узкого измерительного луча в основном применяют для измерения расхода чистых жидких сред, так как инородные частицы примеси могут перекрыть

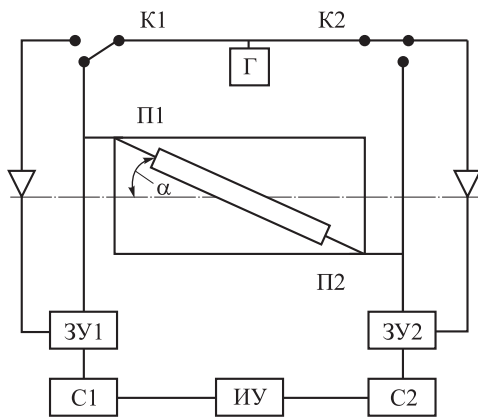


Рис. 5. Структурная схема времяимпульсного расходомера

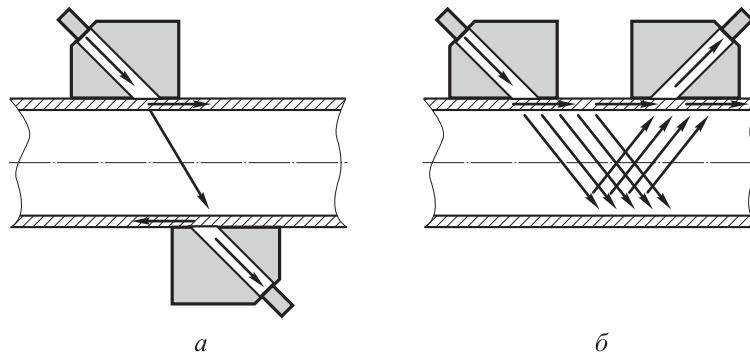


Рис. 6. Времяимпульсный преобразователь с узкой (а) и широкой (б) диаграммами направленности

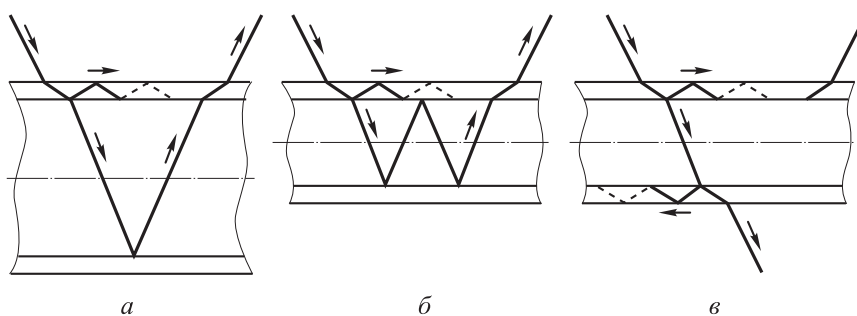


Рис. 7. Виды исполнений преобразователей:
 а — V-образное; б — W-образное; в — врезное

сигнал. Кроме того, если существенно изменится скорость, то луч может сместиться и не дойти до приемника [13].

Второй режим с использованием широкого измерительного луча имеет больше достоинств. Он реализуется волнами Лэмба — волнами, генерируемыми и распространяющимися в стенке трубы. Сигнал многократно отражается от границы трубы и распространяется в поток, создавая не один луч, а целый пучок когерентных лучей, который и называется широким. Такой луч охватывает большую часть потока, тем самым решается проблема смещения луча:

поскольку измерительных сигналов много, изменение скорости не влияет на функциональность и точность преобразования [14]. Данный метод нечувствителен к загрязнениям среды и имеет меньшие энергетические потери в стенке трубы. Монтаж преобразователя можно осуществить по V-образной схеме, что позволяет компенсировать возможное влияние неосевых токов измеряемой среды. Динамический диапазон составляет 230:1. Массогабаритные размеры преобразователя очень малы [15].

Следует отметить, что современные ультразвуковые расходомеры имеют накладные пре-

Сравнение характеристик приборов контроля расхода

Прибор		Характеристики				
Вид	Модель (компания-производитель)	Рабочее давление, МПа	Диаметр труб, мм	Динамический диапазон	Погрешность, %	Рабочая среда
Переменного перепада давления	Deltaset DPO (Endress + Hauser)	До 16	10...1 000	6:1	До 1,00	Жидкость, газ
	Rosemount 405 (Промышленная группа «Метран»)	До 10	15...200	14:1	0,75	Жидкость, газ
Тахометрический с турбинкой	TRZ G65-G4000 (Elster)	До 10	50...300	30:1	1,00	Газ
	Эмис-ДИО 230 (ЗАО «ЭМИС»)	До 6,4	8...400	35:1	До 0,50	Жидкость, вязкая жидкость
Вихревой	Sitrans FX300 (Siemens)	До 10	15...300	30:1	До 1,00	Жидкость, газ
	Эмис-Вихрь 200 (ЗАО «ЭМИС»)	До 25	15...300	40:1	До 1,00	Жидкость, газ
Ультразвуковой	Optisonic 7060 (Krohne)	До 10,3	50...600	200:1	До 1,00	Газ
	Daniel SeniorSonic (Emerson Process Managment)	До 40	100...1 050	200:1	До 0,35	Жидкость, газ
	ПИР RG704 (ООО «Технологии ПИР»)	От 1,2	100...1 400	230:1	1,00	Жидкость, газ

образователи. Это означает, что: они не имеют контакта с измеряемой средой, а следовательно, процесс измерения проводится без нарушения целостности трубы и прерывания технологического процесса; их легче устанавливать; отсутствуют движущиеся части (тем самым увеличивается срок эксплуатации), а также протечки и коррозия металлов [16].

В таблице приведены характеристики различных расходомеров.

Выводы

1. Выполненный анализ показал преимущества ультразвукового метода перед другими наиболее распространенными способами. Метод перепада давления достаточно надежен и хорошо изучен, но имеет малый динамический диапазон и ограничен в применении. Вихревой и тахометрический способы имеют примерно одинаковые недостатки: низкую взрывобез-

опасность, движущиеся части и части, контактирующие со средой, недостаточную точность измерений, низкий динамический диапазон, сложность измерения в газовой среде. Ультразвуковой метод характеризуется широким динамическим диапазоном; возможностью реализации не только в жидкостях разной вязкости и загрязненности, но и в газах; безопасностью эксплуатации и монтажа; простотой; высокой точностью и надежностью, а также относительной погрешностью, не превышающей при низких давлениях 1 %.

2. Современные ультразвуковые расходомеры обладают функцией реализации разных способов измерения (доплеровский режим, с узким и широким измерительными лучами), а значит, отсутствует необходимость использования дополнительной аппаратуры и измерения любой среды (пара, жидкости или газа) можно осуществлять одним преобразователем.

Литература

- [1] ГОСТ 8.563.1–97. *Измерение расхода и количества жидкостей и газов методом переменного перепада давления. Диафрагмы, сопла ИСА 1932 и трубы Вентури, установленные в заполненных трубопроводах круглого сечения*. Введен 1998-07-01. Москва, Изд-во стандартов. 1998. 64 с.
- [2] Zhang H.J., Lu S.J., Yu G.Z. An investigation of two-phase flow measurement with orifices for low-quality mixtures. *International Journal of Multiphase Flow*, 1992, vol. 18 (1), pp. 149–155. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/03019322/18/1> (дата обращения 13 февраля 2016).
- [3] Mattar L., Nicholson M., Aziz K., Gregoru G.A. Orifice metering of two-phase flow. *Journal of Petroleum Technology*, 1979, vol. 31, iss. 8, pp. 955–961.
- [4] Steven R.N. Wet gas metering with a horizontally mounted Venturi meter. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2002, vol. 12, iss. 5-6, pp. 361–372.
- [5] Кремлевский П.П. *Расходомеры и счетчики количеств веществ*. Санкт-Петербург, Политехника, 2004, с. 259–308.
- [6] Oddie G., Pearson J.R.A. Flow-rate measurement in two-phase flow. *Annual Reviews of Fluid Mechanics*, 2004, vol. 36, pp.149–172.
- [7] Oliveira J.L.G., Passos J.C., Verschaeren R., Geld C.V.D. Mass flow rate measurements in gas-liquid flows by means of a Venturi or orifice plate coupled to a void fraction sensor. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2009, vol. 33, iss. 2, pp. 253–260. URL: <http://www.mate.tue.nl/mate/pdfs/9599.pdf> (дата обращения 06 февраля 2016).
- [8] *Расходомеры и счетчики*. URL: <http://www.btsm-kipia.ru/schetchiki.html> (дата обращения 27 января 2016).
- [9] Биргер Г.И., Бражников Н.И. *Ультразвуковые расходомеры*. Москва, Metallurgia, 1964, с. 204–301.
- [10] Тросников Д., Жук В. Расходомеры: принципы работы и опыт эксплуатации. *Энергетика и ТЭК*, 2008, № 4 (61). URL: http://www.energetika.by/arch/~year__m21=2008~month__m21=4~page__m21=1~news__m21=120 (дата обращения 27 января 2016).
- [11] Falcone G., Hewitt G.F., Alimonti C., Harrison B. Multiphase flow metering: current trends and future developments. *Journal of Petroleum Technology*, 2002, vol. 54, iss. 4, pp. 77–84.

- URL: <https://www.onepetro.org/journal-paper/SPE-74689-JPT> (дата обращения 13 февраля 2016).
- [12] Бобровников Г.Н., Новожилов Б.М., Сарафанов В.Г. *Бесконтактные расходомеры*. Москва, Машиностроение, 1985. 128 с.
- [13] Drury J.C. *Ultrasonic Flaw Detection for Technicians*. UK, Silver wing Ltd., 2004, pp. 125–213.
- [14] ГОСТ 8.611–2013. *Государственная система обеспечения единства измерений. Расход и количество газа. Методика (метод) измерений с помощью ультразвуковых преобразователей расхода*. Введен 2014-07-01. Москва, Стандартинформ, 2014. 54 с. URL: <http://www.rags.ru/gosts/gost/54912/> (дата обращения 27 января 2016).
- [15] Yeung H. Editorial to: multiphase flow measurement. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2003, vol. 14, p. 137. Doi: 10.1016/S0955-5986(03)00043-8.
- [16] Whalley P.B. *Boiling, Condensation, and Gas-Liquid Flow*. New York, Oxford University Press, 1987. 291 с.

References

- [1] GOST 8.563.1–97. *Izmerenie raskhoda i kolichestva zhidkosti i gazov metodom peremennogo perepada davleniia. Diafragmy, sopla ISA 1932 i trubyy Venturi, ustanovlennyye v zapolnennykh truboprovodakh kruglogo secheniia* [State Standard 8.563.1–97. State system for ensuring the uniformity of measurements. Measurement of liquids and gases flow rate and quantity by differential pressure method. Orifice plates, nozzles ISA 1932 and Venturi tubes inserted in circular cross-section filled conduits. Specifications]. Moscow, Standartinform publ., 1998. 64 p.
- [2] Zhang H.J., Lu S.J., Yu G.Z. An investigation of two-phase flow measurement with orifices for low-quality mixtures. *International Journal of Multiphase Flow*, 1992, vol. 18, iss. 1, pp. 149–155. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/03019322/18/1> (accessed 13 February 2016).
- [3] Mattar L., Nicholson M., Aziz K., Gregoru G.A. Orifice metering of two-phase flow. *Journal of Petroleum Technology*, 1979, vol. 31, iss. 8, pp. 955–961.
- [4] Steven R.N. Wet gas metering with a horizontally mounted Venturi meter. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2002, vol. 12, iss. 5-6, pp. 361–372.
- [5] Kremlevskii P.P. *Raskhodometry i schetchiki kolichestv veshchestv* [Flowmeters and counters quantities of substances]. St. Petersburg, Politekhnik publ., 2004, pp. 259–308.
- [6] Oddie G., Pearson J.R.A. Flow-rate measurement in two-phase flow. *Annual Reviews of Fluid Mechanics*, 2004, vol. 36, pp.149–172.
- [7] Oliveira J.L.G., Passos J.C., Verschaeren R., Geld C.V.D. Mass flow rate measurements in gas-liquid flows by means of a Venturi or orifice plate coupled to a void fraction sensor. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2009, vol. 33, iss. 2, pp. 253–260. Available at: <http://www.mate.tue.nl/mate/pdfs/9599.pdf> (accessed 06 February 2016).
- [8] *Raskhodometry i schetchiki* [Flowmeters and counters]. Available at: <http://www.btsm-kipia.ru/schetchiki.html> (accessed 27 January 2016).
- [9] Birger G.I., Brazhnikov N.I. *Ul'trazvukovyye raskhodometry* [Ultrasonic flowmeters]. Moscow, Metallurgiya publ., 1964, pp. 204–301.
- [10] Trosnikov D., Zhuk V. *Raskhodometry: printsipy raboty i opyt ekspluatatsii* [Flow: operating principles and operating experience]. *Energetika i TEK* [Power and Energy]. 2008, no. 4(61). Available at: http://www.energetika.by/arch/~year__m21=2008~month__m21=4~page__m21=1~news__m21=120 (accessed 27 January 2016).
- [11] Falcone G., Hewitt G.F., Alimonti C., Harrison B. Multiphase flow metering: current trends and future developments. *Journal of Petroleum Technology*, 2002, vol. 54, iss. 4, pp. 77–84. Available at: <https://www.onepetro.org/journal-paper/SPE-74689-JPT> (accessed 13 February 2016).
- [12] Bobrovnikov G.N., Novozhilov B.M., Sarafanov V.G. *Beskon-taktnyye raskhodometry* [Contactless flowmeters]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1985. 128 p.
- [13] Drury J.C. *Ultrasonic Flaw Detection for Technicians*. UK, Silver wing Ltd., 2004, pp. 125–213.

- [14] GOST 8.611–2013 *Gosudarstvennaia sistema obespecheniia edin-stva izmerenii. Raskhod i kolichestvo gaza. Metodika (metod) izmerenii s pomoshch'iu ul'trazvukovykh preobrazovatelei raskhoda* [State Standard 8.611–2013 State system for ensuring the uniformity of measurements. Flow rate and quantity of gas. Technique (method) measurements by ultrasonic meters]. Moscow, Standartinform publ., 2014. 54 p. Available at: <http://www.rags.ru/gosts/gost/54912/> (accessed 27 January 2016).
- [15] Yeung H. Editorial to: multiphase flow measurement. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2003, vol. 14, p. 137. Doi: 10.1016/S0955-5986(03)00043-8.
- [16] Whalley P.B. *Boiling, Condensation, and Gas—Liquid Flow*. New York, Oxford University Press, 1987. 291 p.

Статья поступила в редакцию 11.05.2016

Информация об авторе

ХЛЕБНОВА Виолетта Игоревна (Санкт-Петербург) — аспирант кафедры «Приборостроение». Санкт-Петербургский горный университет; инженер ООО «Константа» (198095, Санкт-Петербург, а/я 42, e-mail: hlebnova-violetta@yandex.ru).

Information about the author

ХЛЕБНОВА Violetta Igorevna (Saint Petersburg) — Postgraduate, Instrument Engineering Department. Saint Petersburg Mining University; Engineer. ООО Constanta (198095, Saint Petersburg, P.O. Box 42, e-mail: hlebnova-violetta@yandex.ru).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышло в свет учебное пособие
В.С. Зарубина, Г.Н. Кувыркина, И.В. Станкевича
**«Математические модели
прикладной механики»**

Изложены основы построения и анализа математических моделей механических систем, идейное ядро которых составляют математические модели стержней, пластинок и оболочек, что позволяет строить адекватные математические модели в виде совокупности соотношений, достаточно полно и точно отражающих свойства и поведение сложных конструктивных элементов современного технологического оборудования и машиностроения. Содержание учебного пособия соответствует курсам лекций, читаемых в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Для студентов старших курсов, изучающих такие дисциплины, как «Механика деформируемого твердого тела», «Теория упругости и пластичности», «Динамика и прочность машин», «Сопротивление материалов», «Теория оболочек», «Строительная механика конструкций», и аспирантов математических, физических, естественнонаучных кафедр университетов и технических вузов. Может быть полезно научным сотрудникам и инженерам, занятым в области математического моделирования сложных процессов механического деформирования.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru