

# Ультразвуковые методы измерения параметров многофазных нефтегазовых потоков

УДК 681.121.89.082.4:681.5.08

*Р. И. СОЛОМИЧЕВ – к.т.н., ООО НПО «Турбулентность-ДОН», sktb\_solomichev@turbo-don.ru*

*А. Н. СЛОНЬКО – ООО НПО «Турбулентность-ДОН», sktb\_std2@turbo-don.ru*

В статье рассмотрены и описаны существующие ультразвуковые методы измерения расхода и свойств потока, применительно к многофазным потокам (время-разностный, кросс-корреляционный, эхо-импульсный) и методы, основанные на эффекте Доплера. Описаны и классифицированы наиболее распространенные методы обработки измеренной информации в многофазных расходомерах: методы спектрального анализа сигналов (с использованием преобразований Фурье и вейвлет преобразований); методы оценки во временной области (корреляционные вычисления); методы на основе нейронных сетей; смешанные методы, применяемые в гибридных расходомерах. Предложена и обоснована идея комбинации ультразвуковых методов измерения многофазных потоков с последующей обработкой полученных данных в одном расходомере, имеющая ряд преимуществ: возможность определения скорости потока, концентрацию компонентов многофазной среды, скорость звука в каждой из двух фаз, и, следовательно, оценить плотность веществ. Применение на практике описанных в работе методов обработки измеренной информации в многофазных расходомерах дает возможность распознавать и контролировать режимы истечения многофазной среды в трубопроводе.

**Ключевые слова:** ультразвуковой расходомер, многофазный поток, нефтепродукты, природный газ, концентрация компонентов, цифровая фильтрация.

## Постановка проблемы

В последние годы наблюдается все большее распространение ультразвуковых измерителей потока в нефтяной и газовой промышленности, что было продемонстрировано на недавней международной конференции FLOMEKO-2019 (семинар по измерению расхода энергоресурсов в Северном море). На данной конференции практически половина докладов была связана с применением ультразвуковой технологии измерения скорости потока и ее метрологическим обеспечением.

Ультразвуковые (УЗ) методы имеют значительные преимущества по сравнению с механическими методами измерения расхода: более высокую надежность, большой динамический диапазон, меньшие затраты на техническое обслуживание, требования и возможность оперативного обслуживания, – это достигается за счет того, что сам принцип предполагает отсутствие механических движущихся частей в составе расходомера. Данные преимущества ультразвуковой технологии побудили многих исследователей и разработчиков проводить дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования

для реализации методик измерения многофазных нефтегазовых потоков.

Все чаще на конференциях подобного рода затрагивается тема измерения многофазных потоков в контексте применения ультразвуковых расходомеров и это не случайно. Традиционно для измерения каждой составляющей многофазной смеси прибегают к ее сепарированию, далее измеряют отдельные компоненты привычными расходомерами для воды, нефти и газа. Способ разделения многофазной смеси может занимать не малое количество времени, быть дорогостоящим и требует большого пространства для размещения громоздкого оборудования.

Способ сепарирования в некоторых случаях делает экономически нецелесообразным разведку глубоководных запасов нефти при значительном удалении от суши, особенно когда две различные добычные компании используют общий трубопровод и до смешивания им требуется знать расход и состав нефтепродуктов.

Таким образом, возникает потребность в многофазном расходомере, предназначенном для динамического измерения расхода многофазного потока и его отдельных компонентов без предварительной сепарации. Проблематика измерения многофазного потока, поступающего из скважины, связана с тем, что он может иметь любую структуру, изменяющуюся случайным образом, но при этом необходимо своевременно определить расходы каждого из компонентов: нефти, воды и газа, что оказывает определяющее влияние на их метрологические характеристики [1].

## Цель и задачи исследования

Цель данного исследования – рассмотреть и проанализировать существующие ультразвуковые методы измерения расхода компонентов многофазных потоков в нефтегазовой промышленности.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- рассмотреть существующие ультразвуковые методы измерения;
- провести анализ, выбор и обоснование методов цифровой обработки измеренных сигналов, что позволит интерпретировать полученный массив данных в функциональную зависимость расходов компонентов многофазной смеси.

## Решение задач и результаты исследования

Существующие на сегодняшний момент ультразвуковые расходомеры газа или жидкости производятся для широкого ряда диаметров трубопроводов, имеют различные исполнения (накладные и врезные датчики) и методы измерения акустических эффектов, возникающих при движении вещества, расход которого необходимо измерить. Среди наиболее распространенных можно выделить методы, основанные на перемещении акустических колебаний движущейся средой (время-разностный, кросс-корреляционный, эхо-импульсный) и методы, основанные на эффекте Доплера. Рассмотрим перечисленные методы более детально, применительно к измерению компонентов многофазных потоков.

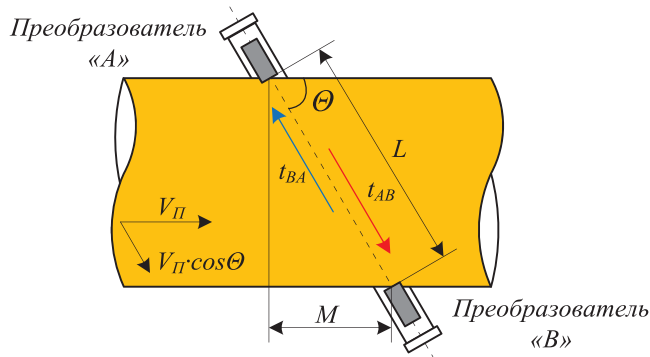


Рис. 1. Принцип измерения разности времен прохождения УЗ волны

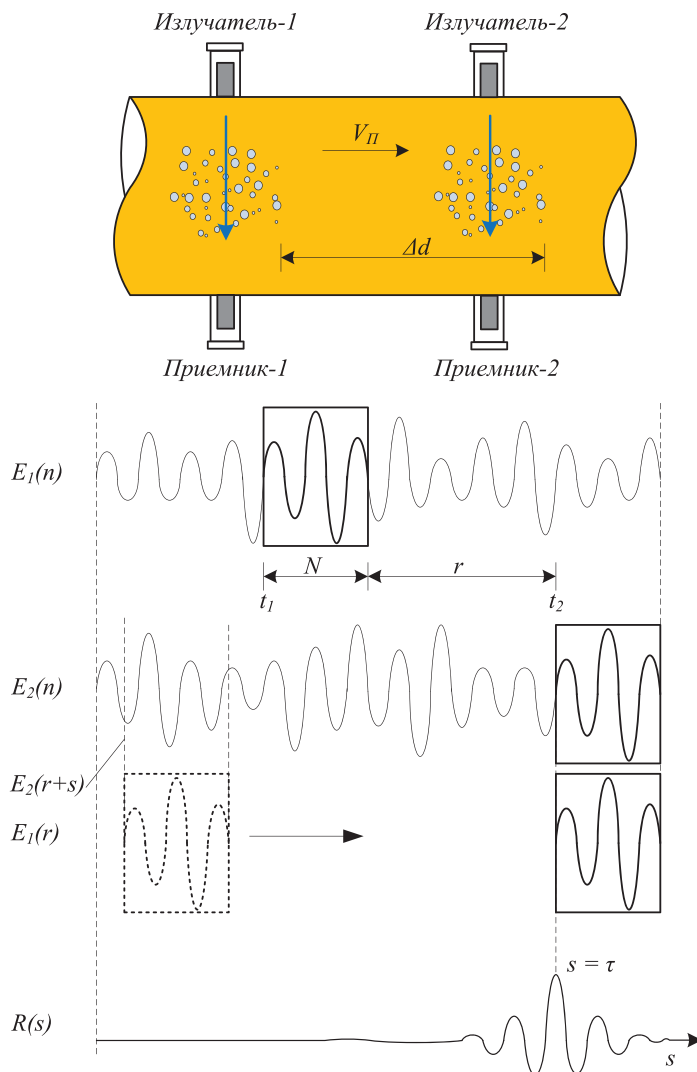


Рис. 2. Схематическое изображение корреляционного УЗ расходомера с поясняющими временными диаграммами

**Ультразвуковой метод времени прохождения движущейся среды** основан на определении времен прохождения ультразвуковой волны между двумя датчиками (расположенными под углом к трубопроводу, рис. 1) попутно ( $t_{AB}$ ) и встречно ( $t_{BA}$ ) потоку. Зная величины времен задержек распространения звуковой волны  $t_{AB}$  и  $t_{BA}$ , среднюю скорость потока  $V_{\Pi}$  можно определить по формуле:

$$V_{\Pi} = \frac{L^2}{2M} \left( \frac{\Delta t}{t_{AB} \cdot t_{BA}} \right), \quad (1)$$

где:  $\Delta t = t_{BA} - t_{AB}$ ;  $L$  – длина пробега УЗ волны;  $M$  – осевое смещение УЗ волны вдоль трубы.

Данный метод измерения получил наибольшее распространение в ультразвуковых расходомерах, измеряющих потоки однородных сред. Для получения информации о количестве взвешенных частиц в измеряемом объеме применяют модификацию метода времени прохождения: анализируют коэффициент затухания УЗ волны в среде, который пропорционален объемному содержанию включений от 4% до 6% [2]. При обильном содержании взвешенных частиц или пузырьков газа в жидкости или водяного пара в газе используется метод измерения доплеровского сдвига.

**Ультразвуковой корреляционный метод измерения скорости потока** основывается на определении времени прохождения группы «рассеивателей» УЗ волны между двумя точками измерения при установлении максимального значения функции взаимной корреляции в измеренных отсчетах (рис. 2).

В момент времени  $t = t_1$  излучается УЗ пучок, далее высокочастотное эхо этого сигнала  $E_1$  подвергается аналого-цифровому преобразованию и регистрируется. Группа рассеивателей длиной  $N$ -точек проходит расстояние  $r$  до второй точки замера. Второй УЗ пучок излучается в момент времени  $t = t_2$ , к этому времени группа рассеивателей сместится на неизвестную дистанцию  $\Delta d$ . УЗ это также сместится на новую позицию в цифровой записи это сигнала  $E_2$ . Дистанция (выраженное через время), на которую сместились рассеиватели может быть определена через корреляцию начального эхо-отклика в  $E_1$  с различными участками отклика  $E_2$  равной длины.



Математически, эта процедура заключается в сдвиге временного окна отклика  $E_1$  на величину  $s$  и дальнейшем варьировании этой величины до нахождения совпадающего отклика в  $E_2$ . Коэффициент корреляции  $R(s)$  рассчитывается для каждого значения  $s$  и значение аргумента, при котором достигается максимум  $R(s)$  соответствует моменту времени  $s = \tau$  – новому положению рассеивателей.

После того, как значение величины  $\tau$  было определено, дистанция, на которую сместились рассеиватели вдоль направления распространения пучка, выражается как:

$$d_a = \frac{c \cdot \tau}{2}, \quad (2)$$

где:  $c$  – скорость звука.

Отсюда может быть найдена осевая проекция скорости перемещения рассеивателей:

$$V_a = \frac{c \cdot \tau}{2T}, \quad (3)$$

где:  $T$  – период повторения импульсов,  $V_a$  – осевая компонента скорости. Для измерения касательной компоненты необходима некоторая априорная информация об угле, под которым производится облучение рассеивателей.

Корреляционные приборы перспективны для измерения расхода двухфазных веществ [3]. Метод обладает рядом преимуществ: он нечувствителен к частотным искажениям [4], обладает большим быстродействием и точностью.

### Ультразвуковой доплеровский метод измерения скорости потока

основан на эффекте Доплера, суть которого состоит в изменении частоты УЗ волн при рассеянии на движущимся относительно приемника объектах:

$$f_R = f_E + \Delta f, \quad (4)$$

где:  $f_R, f_E$  – частоты принятого и излученного сигналов соответственно.

Разность частот  $\Delta f$  положительна, если объект приближается к источнику излучения и отрицательна в противном случае. Величина  $\Delta f$  называется доплеровским сдвигом частоты, который пропорционален осевой компоненте скорости перемещения объекта. Если угол между осью УЗ пучка и направлением движения объекта равен  $\Theta$  (рис. 3а), то доплеровский сдвиг определяется соотношением:

$$\Delta f = \frac{2V_{\Pi} \cdot f_E \cdot \cos \Theta}{c}. \quad (5)$$

Доплеровские измерительные системы подразделяются на два основных вида в зависимости от режима их функционирования: непрерывно-волнового или импульсного. Прием и излучение ультразвука для первого из них разнесены в пространстве, для второго – во времени. Таким образом, первый состоит из двух активных элементов, расположенных вплотную и под некоторым углом друг к другу, а второй имеет в своем составе только один преобразователь, поочередно работающий то на прием, то на передачу (рис. 3б).

Расходомеры, работающие в непрерывно-волновом режиме, представляют собой относительно простые приборы, одним из недостатков которых является, так называемое, уширение доплеровского спектра, наблюдаемое при увеличении скорости движения рассеивателей и обусловленное влиянием остаточных поперечных компонент векторов их скоростей. Ширина спектра  $B_d$  определяется соотношением [5]:

$$B_d = \frac{K \cdot V_{\Pi} \cdot \sin \Theta}{\lambda}, \quad (6)$$

где: величина  $K$  является константой, определяемой отношением апертуры преобразователя  $D$  к его фокусному расстоянию  $F$ . Этот эффект приводит к увеличению погрешности измерения

до 2–4% при повышении скорости потока. Также на погрешность измерения оказывает уменьшение угла установки преобразователей менее  $75^\circ$  относительно направления потока. Большая часть исследований и разработок, связанных с многофазными расходомерами основывается на моделях с применением эффекта Доплера [6, 7].

**Ультразвуковой эхо-импульсный (радарный) метод** основывается на явлении отражения УЗ волны от границы раздела двух сред (рис. 4), используется для измерения толщины слоя веществ в различных фазовых состояниях. В многофазных расходомерах определение границы раздела газ-жидкость является одним из фундаментальных аспектов при измерении как скорости потока жидкости, так и доли пустот в потоке [8].

В данном методе используется явление различия между характеристическими импедансами ультразвука на границе раздела двух сред. Значение амплитуды, отраженной УЗ волны определяется выражением:

$$\frac{A_{\text{отп}}}{A_{\text{изл}}} = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1}, \quad (7)$$

где:  $A_{\text{изл}}, A_{\text{отп}}$  – амплитуда излученной и отраженной УЗ волны;  $\rho_1 c_1 = z_1, \rho_2 c_2 = z_2$  – акустические импедансы двух различных сред.

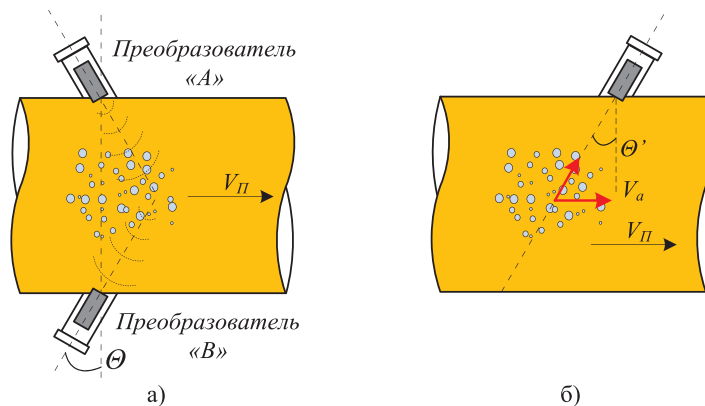


Рис. 3. Доплеровское измерение скорости потока

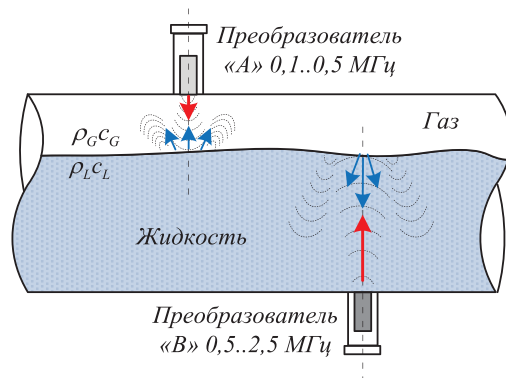


Рис. 4. Эхо-импульсный принцип измерения толщины слоя двухфазного потока

Проведенные исследования [9] показывают, что на характеристики отраженной волны в значительной мере влияют форма и размер границы раздела относительно длины УЗ волны, а также режимы движения многофазного потока. Так, для ламинарных расслоенных потоков без образования существенных волн на поверхности обнаружение границы раздела двух сред (жидкость-газ) не вызывает труда, – почти 99,9% падающей волны отражается обратно. При возникновении слоистых волнообразных потоков, излученная УЗ волна зачастую рассеивается и обратно на преобразователь попадает ее меньшая часть. Данную проблему решают с помощью многократных периодических замеров и цифровых фильтров, предполагающих, в том числе и статистическую обработку сигналов, что также позволяет идентифицировать режим течения многофазного потока.

Среди наиболее распространенных методов обработки измеренной информации в многофазных расходомерах выделяют следующие:

- методы спектрального анализа сигналов (с использованием преобразований Фурье и вейвлет преобразований);
- методы оценки во временной области (корреляционные вычисления);
- методы на основе нейронных сетей;
- смешанные методы, применяемые в гибридных расходомерах.

Основной целью обработки измеренных данных с помощью **методов спектрального анализа** является определение формы и скорости потока. При интерпретации измеренных сигналов в доплеровском расходомере зачастую сложно разделить поток на режимы, используя только значения стандартных индексов формы сигнала, поскольку в полученных отсчетах наблюдаются заметные совпадения. Наиболее часто для оценки спектра мощности сигнала в частотной области применяют быстрое преобразование Фурье (БПФ), за счет которого появляется возможность визуализировать весь спектр в реальном времени. Недостатком БПФ является то, что оно дает информацию только про частоту, присутствующую в сигнале, но не дает информации в каком именно промежутке времени.



**Рис. 5. Расходомер газа Turbo Flow UFG производства ООО НПО «Турбулентность-Дон»**

Оконное преобразование Фурье, в отличие от БПФ, является функцией от времени, частоты и амплитуды и позволяет получать характеристику распределения частоты сигнала с амплитудой во времени. При увеличении ширины окна (уменьшении его разрешающей способности) увеличивается точность относительно частоты и уменьшается точность относительно времени. Для оптимального соотношения точностей при подборе ширины окна используют **вейвлет преобразование**, по сути, являющимся инструментом, который решает проблему неопределенности Гейзенберга для построения частотно-временных характеристик сигнала. Применительно к доплеровскому расходомеру, оконное преобразование Фурье в чистом виде не совсем подходит для анализа УЗ сигналов, так как они являются весьма нестационарными.

**Корреляционная обработка** сигналов во временной области является основным методом оценки распределения и смещения рассеивателей в измерительном участке трубопровода в процессе измерения многофазного расхода. Данный метод применяют в двух случаях: для анализа временных задержек (цель – определение скорости потока), либо для анализа временных рядов, что является ценным инструментом для идентификации структуры и режимов истечения потока. Основные принципы корреляционного анализа и фильтрации [10], позволяющие обрабатывать самые зашумленные измерительные сигналы, уже применяются в уникальном алгоритме программного обеспечения расходомеров Turbo Flow UFG (расходомер газа, рис. 5) и Turbo Flow UFL (расходомер жидкости, рис. 6) производства ООО НПО «Турбулентность-ДОН».



**Рис. 6. Расходомер жидкости Turbo Flow UFL производства ООО НПО «Турбулентность-Дон»**

Принципы исследований на основе **нейронных сетей** (НС) все чаще находят применение в различных областях науки и техники, и многофазные расходомеры не являются исключением. В [11] автор применил многослойную модель перцептрона для оценки погрешности измерения массового расхода в кориолисовых расходомерах при течении двухфазного потока. Преимущество использования НС обусловлено способностью моделировать нелинейные отношения между входными переменными и требуемыми выходными сигналами с помощью методов приближения функций, а также определять сложные отношения с использованием алгоритмов распознавания образов.

При измерении многофазного потока распознавание образов используется для идентификации (классификации) режима потока, при котором входные переменные классифицируются как элемент predetermined режима потока. Чтобы получить объективную идентификацию режимов потока, НС часто предпочитают статистическим методам из-за их быстрого отклика и упрощения, эффективности и доступности алгоритмов обучения.

На сегодняшний день универсального метода измерения расхода фаз не существует, что обусловлено сложностью измерения многофазного потока, который сложно понять, предсказать и тем более моделировать. Поэтому многофазный расходомер является гибридным прибором, объединяющий в себе сразу несколько методов измерения, что позволяет получить больше информации о среде измерения, тем самым повысить точность измерений посредством вычисления расхода каждого из компонентов согласно полученной информации.





Идея комбинации приведенных выше ультразвуковых методов в одном расходомере многофазного потока имеет ряд преимуществ. При использовании совместно временимпульсного и доплеровского способов и двух комплектов первичных преобразователей для жидкой и газовой фазы соответственно, появляется возможность определить не только скорость потока многофазной среды, но и концентрацию газа в жидкости или жидкости в газе, скорость звука в каждой из двух фаз, и, следовательно, оценить плотность веществ. Комбинация способов также дает информацию о процентном соотношении и уровнях жидкой и газообразной фазы в сечении трубопровода.

Применение на практике перечисленных методов обработки измеренной информации в многофазных расходомерах дает возможность распознавать и контролировать режимы истечения многофазной среды в трубопроводе.

**Ультразвуковые преобразователи расхода производства ООО «Турбулентность-Дон» обладают уникальными функциями автоматической самодиагностики, которая решает следующие задачи:**

- обеспечение контроля уровня усиления и качества сигнала, контроля отношения скорости газа по акустическим каналам к средней скорости газа в преобразователе расхода, скорости распространения звука [10];
- реализация функции отображения свойств потока (профиль, симметрия, оценка завихрения);
- реализация функции контроля над состоянием блока электроники с ведением архива событий, нештатных ситуаций и несанкционированного доступа;
- интуитивно-понятный человеко-машинный интерфейс, информативный и удобный для любого из пользователей вне зависимости от предоставленного уровня доступа;
- реализована уникальная функция оценки плотности измеряемой углеводородной среды с возможностью приближенного вычисления ее компонентного состава, что значительно расширяет диагностические возможности и область применения УЗ преобразователя расхода.

## Выводы

1. Рассмотрены и описаны существующие ультразвуковые методы измерения расхода и свойств потока, применительно к многофазным потокам. Среди наиболее распространенных можно выделить методы, основанные на перемещении акустических колебаний движущейся средой (время-разностный, кросс-корреляционный, эхо-импульсный) и методы, основанные на эффекте Доплера.
2. Описаны и классифицированы наиболее распространенные методы обработки измеренной информации в многофазных расходомерах: методы спектрального анализа сигналов (с использованием преобразований Фурье и вейвлет преобразований); методы оценки во временной области (корреляционные вычисления); методы на основе нейронных сетей; смешанные методы, применяемые в гибридных расходомерах.
3. Предложена и обоснована идея комбинации ультразвуковых методов измерения многофазных потоков с последующей обработкой полученных данных в одном расходомере, имеющая ряд преимуществ: возможность определения скорости потока, концентрацию компонентов многофазной среды, скорость звука в каждой из двух фаз, и, следовательно, оценить плотность веществ. Применение на практике описанных в работе методов обработки измеренной информации в многофазных расходомерах дает возможность распознавать и контролировать режимы истечения многофазной среды в трубопроводе.

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Handbook of Multiphase Flow Metering, Norwegian Society for Oil and Gas Measurement. March 2005.
2. Carvalho, R.D.M. Application of the ultrasonic technique and high-speed filming for the study of the structure of air–water bubbly flows / R.D.M. Carvalho, E.I. Tanahashi, T.A. Paiva and other // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2009. №33(7), pp. 1065–1086.
3. Чухарева Н. В. Определение количественных характеристик нефти и газа в системе магистральных трубопроводов / Н.В. Чухарева, А. В. Рудаченко, В. А. Поляков. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 311 с.
4. Ferrara K. The effect of frequency dependent scattering and attenuation on the estimation of blood velocity using ultrasound / K. Ferrara, V.R. Algazi, J. Liu.// IEEE Trans. Ultrason., Ferroelec, Freq. Contr. – 1992. – Vol. 22, №3, pp.754–767.
5. Sensor D., Newhouse V.L., Vontz T. and Ortega H.V. Theory of Ultrasound Doppler Spectra Velocimetry for Arbitrary Beam and Flow Configurations // IEEE Trans. On Biomed. Eng. – 1988. – BME-35, №9. pp. 740–751.
6. Weiling Liu. Oil-water two-phase flow velocity measurement with Continuous wave ultrasonic Doppler / Weiling Liu, Chao Tan, Feng Dong // XXII World Congress of the International Measurement Confederation (IMEKO 2018), Journal of Physics: Conference Series 1065(9):092019, 2018, pp. 1–4.
7. Fan, S. Velocity characteristics of slug body and film for two-phase gas-liquid slug flow using ultrasonic techniques. 8th International Conference on Multiphase Flow ICMF 2013, Jeju, Korea, 2013, pp. 1–5.
8. Chang, J.S. Determination of two-phase interfacial areas by an ultrasonic technique/ J.S. Chang, E.C. Morala// Nuclear Engineering and Design. – 1990. № 122(1–3), pp. 143–156.
9. Schmitt P. Ultrasonic wave interaction with air-water boundary layer / P. Schmitt // In 8th International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering. – 2012. Dresden, Germany.
10. Соломичев Р. И. Решения, обеспечивающие метрологическую и эксплуатационную надежность ультразвуковых расходомеров Turbo Flow UFG / Р. И. Соломичев, А. Н. Слоныко // СФЕРА. Нефть и Газ. – 2019. №2/2019 (72). С. 120–125.
11. Liu R.P. A neural network to correct mass flow errors caused by two-phase flow in a digital coriolis mass flowmeter // Flow Measurement and Instrumentation. – 2001. № 12(1), pp.53–63.



**Группа компаний «Турбулентность-ДОН»**  
 346815, г. Ростов-на-Дону, 1-й км шоссе  
 Ростов-Новошахтинск, стр. 6/7, 6/8  
 тел. (863) 203-77-80, 203-77-85, 203-77-86  
 e-mail: info@turbo-don.ru  
 www.turbo-don.ru