

# УПРАВЛЕНИЕ, МОДЕЛИРОВАНИЕ, АВТОМАТИЗАЦИЯ

УДК 681.5.08

*А. Г. Кокуев, А. В. Сорин*

## УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА МНОГОФАЗНОГО ПОТОКА

В настоящее время основным способом определения расхода нефтегазовой смеси является процесс сепарации. Однако инерционность процесса обуславливает необходимость создания надежных и точных устройств для контроля добычи дебита скважины с помощью измерения расхода многофазного потока прямо на скважине. Предложена конструктивная схема устройства для измерения расхода многофазного потока, использующего акустомагнетозэлектрический эффект и включающего в себя два пьезоэлемента, два электрода с измерительной системой и постоянный магнит (либо электромагнит). Устройство представляет собой отрезок стандартной нефтяной трубы с закрепленным на его поверхности магнитом (постоянным или переменным), пьезоэлементы расположены в трубе по обе стороны от магнита, электроды стоят на небольшом расстоянии от магнита. При работе устройства в трубе протекает многофазный поток нефтяной смеси. Пьезоэлемент, колеблясь, вырабатывает ультразвуковые акустические волны. Ультразвуковые колебания вызывают рост числа свободных электронов, а магнитное поле, генерируемое магнитом, отклоняет их в стороны электродов, где регистрируется изменение величины тока либо электродвижущей силы. Результаты будут характеризовать свойства среды, а также их количественную характеристику в виде относительного состава. Отмечаются, кроме измерения на единичной скважине, другие возможные случаи использования устройства: при измерении в трубопроводе; измерении с разным типом разделения (полное двухфазное газовое/жидкое разделение; частичное разделение); отборе пробы из трубопровода; влажном измерении потока газа и др.

**Ключевые слова:** многофазные потоки, многофазные измерения, расход, трубопровод, автоматизация, устройство, акустомагнетозэлектрический эффект.

### **Введение**

В настоящее время на нефтяных и газовых месторождениях, а также на нефтегазоперерабатывающих заводах основным способом определения расхода нефтегазовой смеси является процесс сепарации. Но в силу его чрезмерной инерционности и внушительных размеров необходима разработка компактного и достаточно быстродействующего устройства, которым можно было бы заменить сепаратор. Такие приборы для измерения расхода многофазного потока уже существуют, но в силу ряда причин, например таких, как опасность, которую могут представлять устройства с денситометром, они не нашли достаточно широкого применения. При использовании подобных устройств существует также некоторая неопределенность измерений, связанная с неточностью либо несовершенством приборов. В связи с этим возникает задача создания надежных и точных устройств для контроля добычи дебита скважины с помощью измерения расхода многофазного потока прямо на стволе скважины.

Одна из современных технологий измерения потока нефти, газа и воды без предварительного разделения фаз – многофазные исследования скважин. Во многих случаях они дают более точное представление о расходных параметрах потока в динамических режимах и особенно эффективны для газоконденсатов и тяжелых нефтей, где традиционные способы измерений непригодны из-за трудностей при сепарации фаз [1].

### Состояние проблемы

Для измерения дебита, добытого из нефтяной или газовой скважины, проводят его сепарацию, т. е. разделение многокомпонентной смеси на три фазы: нефть, газ и вода. Процесс сепарации протекает длительно и проходит как минимум две стадии – это процессы в отсеке отстаивания сепаратора, где происходит разделение жидкостей в зависимости от их плотности, и в отсеке отбора нефтяной фазы. Следует отметить также процесс газообразования, который протекает в двух отсеках одновременно, что говорит о значительной задержке информации на выходе аппарата при добыче полезных ископаемых. Само измерение расхода осуществляется однофазным устройством, называемым расходомером. На рынке представлено множество таких датчиков, основанных на различных эффектах.

Необходимость внедрения многофазных расходомеров в нефтяной и газодобывающей промышленности существует уже на протяжении многих лет. Ряд таких приборов был разработан в начале 80-х гг. XX в. научными организациями, производителями счетчиков, нефте- и газодобывающими компаниями и пр. Были использованы различные технологии и разные комбинации технологий, причем прототипы приборов всегда отличались по своей конструкции и назначению. Несмотря на то, что некоторые разработки были прекращены, количество приборов в нефтегазовом секторе стало коммерчески доступным, а число прикладных задач, для решения которых они использовались, стремительно выросло [1]. Однако новые виды многофазных расходомеров появились не сразу – был пройден длинный путь от простой замены обычного тестового сепаратора, разделяющего компоненты потока, до экономически более целесообразных компактных приборов с низкой стоимостью, которые используются по принципу «один датчик на скважину», а также устанавливаются как в воздушной, так и в водной среде [2].

В некоторых устройствах для измерения расхода многофазных потоков наряду с радиоактивным методом используются и другие: электромагнитные, оптические, ультразвуковые, кросскорреляционные, метод перепада давлений с помощью трубки/сопла Вентури и т. п.

Анализ всех существующих методов и построенных на их принципах устройств позволяет сделать вывод, что все приборы сконструированы с применением более чем двух эффектов. Это позволяет говорить о значительной сложности приборов с технической точки зрения, что сильно повышает их стоимость. Учитывая, что для контроля дебита от начала скважины до поступления на разделительный блок требуется достаточно много таких датчиков, предприятия вынуждены расходовать значительные средства на их приобретение. Вследствие этого возникает необходимость создания прибора относительно дешевого и не уступающего по всем характеристикам и надежности существующим аналогам.

Техническая цель нашего исследования заключалась в создании надежного и точного устройства для контроля расхода многофазного потока от скважины до разделительного блока (блока сепарации).

### Описание физического эффекта

Известно, что распространение акустической волны через проводник сопровождается передачей энергии и импульса проводящих электронов. Это явление называется *акустоэлектрическим* эффектом. Этот эффект исследовали в сверхрешетке [3] и в мезоскопических структурах [4–6]. Однако, при наличии магнитного поля, акустические волны, распространяющиеся в проводнике, могут производить другой эффект, который называется *акустомагнетоэлектрическим* (АМЭ). Акустомагнетоэлектрический эффект создает АМЭ-ток, если образец коротко замкнут в продольном направлении, или АМЭ-поле, когда образец помещен в магнитное поле напряженности  $H$  несущей акустической волны, распространяющейся в направлении, перпендикулярном напряженности  $H$ .

Если поперек направления распространения звука в проводящей среде наложить магнитное поле, то электроны, которые увлекаются звуком, будут отклоняться в этом поле, что приведет к возникновению поперечного тока или, если образец «разомкнуть» в поперечном направлении, – электродвижущей силы (ЭДС) [7]. Но магнитное поле, в соответствии с законом Лоренца, отклоняет электроны, значения скорости движения которых различны, по-разному, поэтому величина и даже знак ЭДС показывают, какие электроны увлекаются звуком, т. е. каковы свойства электронного газа в данной среде. В каждом веществе звук увлекает за собой группу

электронов, характерных именно для данного вещества. Если звук проходит через границу двух веществ, то одни электроны должны смениться другими, например более «холодные» более «горячими» [7].

Акустомагнетоэлектрический эффект был впервые теоретически описан А. А. Гринбергом и Н. И. Крамером [8] для биполярных полупроводников и наблюдался экспериментально на примере висмута Т. Ямадой [9]. В 60–70-е гг. XX в. этот эффект изучался в монополярных полупроводниках и в кейн-полупроводниках. Было замечено, что АМЭ возникает в основном потому, что время релаксации электронов  $\tau$  зависит от энергии электрона и при  $\tau = \text{const}$  эффект исчезает. Эффект наблюдается как в классическом магнитном поле, так и в случае квантованного электромагнитного поля. Д. Маргулис и А. Маргулис изучали квантованный акустомагнетоэлектрический эффект (КАМЭ) с помощью звуковых волн Рэлея [10].

### Описание предлагаемого устройства

Устройство для измерения расхода многофазного потока в трубе, идущей от скважины, включает в себя два пьезоэлемента, два электрода с измерительной системой и постоянный магнит (либо электромагнит). Все компоненты устройства для измерения расхода многофазного потока в трубе изображены на рис. 1.

Устройство представляет собой отрезок стандартной нефтяной трубы  $D = 100$  мм, с закрепленным на ее поверхности магнитом (постоянным или переменным), по обе стороны от магнита в трубе расположены два пьезоэлемента, электроды стоят на небольшом расстоянии от магнита.

Прибор изображен схематически, т. к. определенные расстояния и конкретное положение элементов экспериментально пока не установлены.

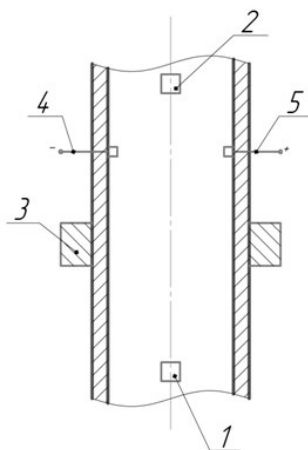


Рис. 1. Устройство для измерения расхода многофазного потока в трубе

Устройство работает следующим образом.

В трубе протекает многофазный поток нефтяной смеси: нефти, газа и воды. Пьезоэлемент 1, колеблясь, вырабатывает продольные акустические волны ультразвукового диапазона, которые принимаются пьезоэлементом 2. Ультразвуковые (акустические) колебания, протекающие вдоль линии потока, вызывают рост числа свободных электронов, а магнитное поле, генерируемое магнитом 3, отклоняет их в стороны электродов 4 и 5, где регистрируется изменение величины тока либо ЭДС. Данные значения и будут характеризовать качественные свойства среды, а также их количественную характеристику в виде относительного состава.

Учитывая почти полное отсутствие информации по АМЭ, потребуется провести довольно много различных экспериментов для уточнения параметров прибора и его настройки. Перечислим дальнейшие направления исследований.

1. Исследования различных вариантов расположения пьезоэлементов с целью установить оптимальный.

Так как попытка установить пьезоэлементы в середине трубопровода оказалась неудачной из-за отсутствия требуемой конструкции, то было решено установить пьезоэлементы, как один из возможных вариантов, на противоположные стенки трубопровода (рис. 2).

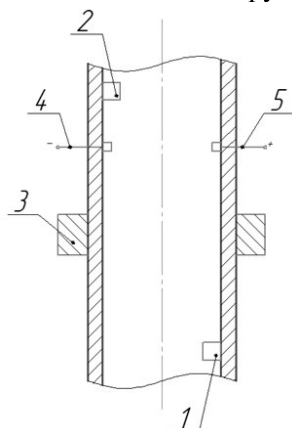


Рис. 2. Предположительное расположение пьезоэлементов

2. Определение расстояния от пьезоэлемента, излучающего ультразвуковые волны, до электродов.

Так как предполагается, что разность потенциалов (ЭДС) на концах электродов будет сравнительно небольшой, необходимо провести эксперименты, позволяющие установить оптимальное расстояние от излучателя ультразвуковых волн до измерительной схемы.

3. Исследование влияния магнитного поля на результаты измерений с учетом расстояния от излучающего пьезоэлемента до источника магнитного поля.

4. Исследования влияния электрического поля на электропроводность нефти.

На рис. 3 позициями 6–7 обозначены пластины конденсатора.

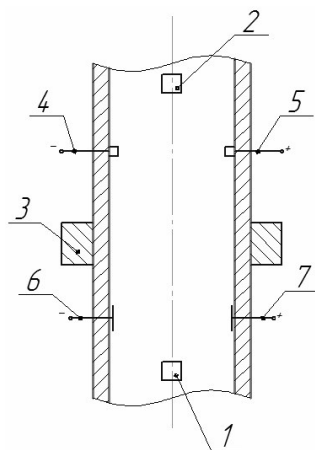


Рис. 3. Устройство с дополнительным конденсатором – источником электрического поля

Электропроводность нефтяных эмульсий увеличивается в несколько раз при нахождении их в переменном электрическом поле. Это объясняется различной диэлектрической проницаемостью воды и нефти и ориентацией капель воды в нефти вдоль силовых линий электрического поля.

Для создания переменного электрического поля будем использовать конденсатор.

5. Определение необходимой частоты ультразвукового излучения пьезоэлементами.

Так как нефтяная смесь слабо проводит ток, необходимо найти частоту ультразвуковых колебаний пьезоэлементов, достаточную для возникновения небольшого количества электронов для их регистрации измерительными приборами.

6. Совершенствование конструкции всех элементов на стандартном трубопроводе.

Предполагаются установка и сборка всех элементов и их настройка на требуемый режим работы устройства, а также разработка алгоритмов измерения выходной величины (в нашем случае это выходное напряжение и преобразование этой величины в требуемую характеристику потока, т. е. в расход).

Направлений в работе над данным устройством достаточно много ввиду чрезмерно малого количества информации по АМЭ. Решение большинства задач требует экспериментальных данных. Наличие таких данных обеспечит доступность другой информации, которая позволит работать в этом направлении дальше.

Примером эксплуатации прибора может стать его применение на буровых платформах, а также использование датчика для контроля расхода по всей длине трубопровода от буровой к нефтеперерабатывающему заводу (рис. 4).

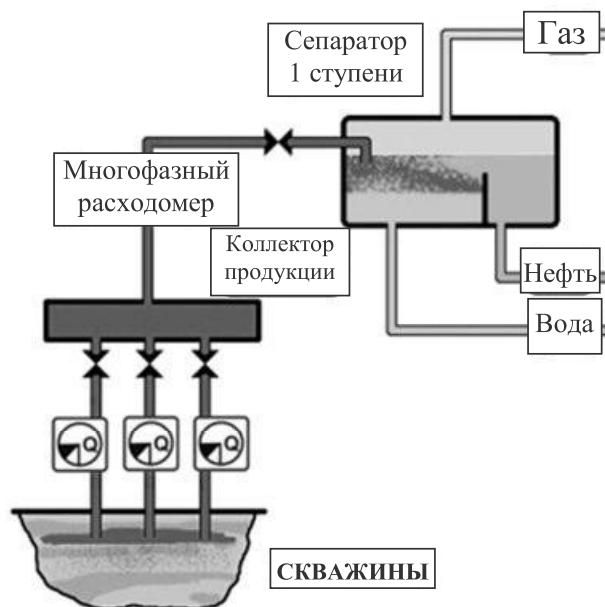


Рис. 4. Многофазный расходомер на линии потока в каждой скважине с заменой тестового сепаратора и его аппаратуры [7]

#### Контроль расхода многофазного потока на одной скважине

При непрерывном мониторинге с помощью многофазного расходомера для измерений и получения информации затраты времени гораздо меньше по сравнению с затратами времени при случайных испытаниях скважины с помощью тестового сепаратора. С помощью многофазного расходомера вместо разделения фаз можно снизить общую неопределенность в данных по скважинам, даже если мгновенный расход фазы измеряют с повышенной неопределенностью, в то время как изменения в работе между испытаниями не регистрируются сепараторами.

Доступ к непрерывной подаче информации высокой разрешающей способности с многофазных расходомеров может стать ценным ресурсом в различных процессах принятия решений, например в связи с реконструкцией скважины.

Установка нового многофазного расходомера позволит сэкономить пространство, уменьшить вес и стоимость измерений по сравнению с установкой нового тестового сепаратора, что поможет сократить время окупаемости уже установленных тестовых сепараторов.

Нестабильность скважины – это хорошо известная проблема во время снижения объемов производства, и во многих случаях это неприемлемо, т. к. скважина должна быть подключена к производственной установке с определенной степенью контроля расхода сырья. При использовании обычных сепараторов на нестабильных скважинах очень трудно обнаружить колебания расхода (например, газа), и в таких ситуациях применение многофазных расходомеров становится решением для инженера по производству.

Многофазные расходомеры могут оказаться полезными или даже неотъемлемыми частями подводных установок. В случаях подводной скважины, откуда поступает смешанный поток продукции, и (или) длинных линий потока (несколько километров) многофазные расходомеры можно использовать для контроля дебита отдельных скважин или поточных линий. Следует отметить, однако, что демонтаж многофазного расходомера для технического обслуживания или ремонта может быть достаточно сложным, дорогим или невозможным. Калибровка по месту работы, как правило, недоступна, а менее прямые методы контроля для подводных измерений пока отсутствуют. Надежность и стабильность подводных приборов имеют первостепенное значение и должны обеспечиваться производителем многофазного расходомера, интегратором подводной системы и оператором.

Кроме измерения расхода на одной скважине, многофазный расходомер можно использовать и в следующих случаях:

1. Измерения в трубопроводе.
2. Измерения с разным типом разделения:
  - полное двухфазное газовое/жидкое разделение;
  - частичное разделение;
  - отбор пробы из трубопровода.
3. Влажное измерение потока газа.

### Заключение

В ходе исследований была получена конструктивная схема устройства для измерения расхода многофазного потока, в котором используется акустомагнетоэлектрический эффект.

Описаны преимущества использования предлагаемого устройства при контроле расхода многофазного потока на одной скважине.

Учитывая почти полное отсутствие информации по данному эффекту, необходимо провести довольно много различных экспериментов для уточнения параметров прибора и его настройки, а также предпринять попытку его внедрения на промышленный объект для проверки результатов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тоски Э. Эволюция измерений многофазных потоков и их влияние на управление эксплуатацией / Э. Тоски, Э. Окугбайе, Б. Тювени, Б. В. Хансен, Д. Смит // Нефтегазовое обозрение. 2003. Т. 8, № 1. С. 68–77.
2. Dahl E. Handbook of multiphase flow metering / E. Dahl, C. Michelsen. The Norwegian Society for Oil and Gas Measurement, Revision 2, March 2005.
3. Mensah S. Y. Acoustoelectric effect in a semiconductor superlattice / S. Y. Mensah, F. K. A. Allotey, S. K. Adjepong. J. Phys. 1994. Vol. 6, no. 34. P. 6783–6787.
4. Shilton J. M. High-frequency single-electron transport in a quasi-one-dimensional GaAs channel induced by surface acoustic-waves / J. M. Shilton, V. I. Talyanskii, M. Pepper, D. A. Ritchie, J. E. F. Frost, C. J. B. Ford, C. G. Smith, G. A. C. Jones // Journal of physics. Condensed matter. 1996. No. 8 (38). P. 531–539.
5. Maa F. A. Acoustoelectric effects in quantum constrictions / F. A. Maa, Y. Galperin. Phys. Rev. B. 1997. Vol. 56. P. 4028–4036.
6. Hoskins M. J., Morko J., Hunsinger B. J. // Appl. Phys. Lett. 1982. Vol. 41, 332.
7. Денисов С. Список физических явлений и эффектов: Справочник / С. Денисов. Горький: ГНУНТТ, 1979. 166 с.
8. Grinberg A. A. Acoustomagnetic effect in piezoelectric semiconductors / A. A. Grinberg, N. I. Kramer // Sov. Phys. Dokl. 1965. Vol. 9, no. 7, 552.
9. Yamada T. Acoustomagnetolectric effect in bismuth / T. Yamada. J. Phys. Soc. Japan. 1965. Vol. 20. P. 1424–1437.
10. Margulis A. D. The quantum acoustomagnetolectric effect due to Rayleigh sound waves / A. D. Margulis, V. I. A. Margulis // J. Phys. 1994. Vol. 6, no. 31. P. 6139–6150.

Статья поступила в редакцию 7.10.2014,  
в окончательном варианте – 3.12.2014

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Кокуев Андрей Геннадьевич** – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; канд. техн. наук, доцент; зав. кафедрой «Автоматизация и управление»; kokuevag@gmail.com.

**Сорин Александр Владимирович** – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; магистрант кафедры «Автоматизация и управление»; sorin91@mail.ru.



A. G. Kokuev, A. V. Sorin

## A DEVICE FOR MEASUREMENT OF THE DISCHARGE OF THE MULTIPHASE FLOW

**Abstract.** Currently, the main method of determining the discharge of oil and gas mixture is the separation process. However, the process response causes the problem of creating reliable and accurate devices for monitoring production of well flow rate by measuring of the discharge of the multiphase flow at the well site. The structural scheme of the device to control multiphase flow, using acoustic-electric effect and consisting of two piezoelectric elements, two electrodes with the measurement system and the permanent magnet (or electric magnet) is presented. The apparatus comprises a part of standard oil pipe with the magnet fixed on its surface (fixed or variable), there are two piezoelectric elements on both sides of the magnet in the tube, electrodes are at a small distance from the magnet. The multiphase flow of oil mixture goes through during the operation in the pipe. Piezoelectric element while hesitating generates ultrasonic acoustic waves. Ultrasonic vibrations cause the increase in the number of free electrons but the magnetic field, generating by the magnet, rejects them apart to the electrodes, where the change in the current or electromotive force is recorded. The results will characterize the medium properties, as well as their quantitative characteristics as a relative structure. During the research, it was stated that the device can be used in other possible cases such as while measuring in the pipeline; using different types of separation (complete two-phased gas/liquid separation; partial separation); while sampling from the pipeline; humid measuring the gas flow etc.

**Key words:** multiphase flows, multiphase measurements, discharge, pipeline, automation, device, acoustic-magnet-electric effect.

## REFERENCES

1. Toski E., Okugbaie E. B., Tiuveni B., Khanssen B. V., Smit D. Evoliutsiia izmerenii mnogofaznykh potokov i ikh vliianie na upravlenie ekspluatatsiei [Evolution of the measurement of multiphase flows and their influence on the operation control]. *Neftegazovoe obozrenie*, 2003, vol. 8, no. 1, pp. 68–77.
2. Dahl E., Michelsen C. *Handbook of multiphase flow metering*. The Norwegian Society for Oil and Gas Measurement, Revision 2, March 2005.
3. Mensah S. Y., Allotey F. K. A., Adjepong S. K. Acoustoelectric effect in a semiconductor superlattice. *J. Phys.*, 1994, vol. 6, no. 34, pp. 6783–6787.
4. Shilton J. M., Talyanskii V. I., Pepper M., Ritchie D. A., Frost J. E. F., Ford C. J. B., Smith C. G., Jones G. A. C. High-frequency single-electron transport in a quasi-one-dimensional GaAs channel induced by surface acoustic-waves. *Journal of physics. Condensed matter*, 1996, vol. 8 (38), pp. 531–539.
5. Maa F. A., Galperin Y. Acoustoelectric effects in quantum constrictions. *Phys. Rev. B.*, vol. 56, pp. 4028–4036.
6. Hoskins M. J., Morko J., Hunsinger B. J. *Appl. Phys. Lett.*, 1982, vol. 41, 332.
7. Denisov S. *Spisok fizicheskikh iavlenii i effektov* [List of physical phenomena and effects]. Spravochnik. Gorky, GNUNTT, 1979. 166 p.
8. Grinberg A. A., Kramer N. I. Acoustomagnetic effect in piezoelectric semiconductors. *Sov. Phys. Dokl.*, 1965, vol. 9, no. 7, 552.
9. Yamada T. Acoustomagnetolectric effect in bismuht. *J. Phys. Soc. Japan*, 1965, vol. 20, pp. 1424–1437.

10. Margulis A. D., Margulis V. I. A. The quantum acoustomagnetolectric effect due to Rayleigh sound waves. *J. Phys.*, 1994, vol. 6, no. 31, pp. 6139–6150.

The article submitted to the editors 7.10.2014,  
in the final version – 3.12.2014

### ***INFORMATION ABOUT THE AUTHORS***

***Kokuev Andrey Gennadievich*** – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Head of the Department "Automation and Control"; kokuevag@gmail.com.

***Sorin Alexander Vladimirovich*** – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Master's Student of the Department "Automation and Control"; sorin91@mail.ru.

