

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА ПУЗЫРЬКОВОЙ СТРУКТУРЫ

В работе предложен, разработан и опробован метод измерения локального истинного свободного газосодержания газожидкостных потоков пузырьковой структуры, влияющего на параметры технологических процессов.

*Ключевые слова:* истинное свободное газосодержание, двухфазный трехкомпонентный поток, технологические жидкости.

Истинное объемное газосодержание двухфазного потока пузырьковой структуры – один из основных параметров, характеризующих газожидкостные потоки. Измерение истинного объемного газосодержания потоков достаточно сложная проблема.

Задача измерения газосодержания пузырьковой жидкости поставлена еще в работах (Meyer, Tamm, 1939; Caustensen, Foldy, 1947; Meyer, Skudzyk, 1953). В указанных работах, ставших уже классическими, изучалось распространение звуковых волн в пузырьковых жидкостях, обладающих ярко выраженным резонансным характером затухания. Было установлено, что в пузырьковых жидкостях скорость звука может уменьшаться до 100 м/с. Это обусловило целое направление исследований динамики волн малой амплитуды в пузырьковых жидкостях. К настоящему времени создано множество методик, основанных на акустике пузырьковых смесей. Но на практике до сих пор не используется достаточно удобный прибор.

Для измерения истинного объемного газосодержания потока пузырьковой жидкости нами были проведены исследования по возможности использования особенностей динамики волн малой, но конечной амплитуды давления. Из ранее выполненных работ можно отметить работы П.И. Семенова и С.И. Костерина (Семенов, Костерин, 1964). В ней авторы пытались выяснить, в частности, зависимость скорости распространения волны давления от газа и паросодержания двухфазного потока. Но использованная аппаратура (мембранные датчики, шлейфовые осциллографы) не позволила зафиксировать тонкую структуру волн и провести достаточно глубокий анализ экспериментов. Последующие многочисленные эксперименты, проведенные на установках типа «ударная труба», показали, что ударные волны умеренной и малой амплитуды позволяют проводить надежную диагностику газожидкостной смеси в барботажной колонне камеры низкого давления (Накоряков, Покусаев, Шрейбер, 1983). Ситуация усложняется при проведении измерений на двухфазных потоках, более характерных для технологических ситуаций. В работе (Ripken, Killen, 1962) изучалась концентрация свободного газа в потоке воздуховодяной смеси пузырьковой структуры, заполняющей кавитационную трубу замкнутого типа. Измерения показали, что при неизменном объеме количества воздуха в потоке его объемное газосодержание, тем не менее, может изменяться в сотни раз.

Изучение возможностей применения волновых методов для диагностики газожидкостных потоков волнами

малой, но конечной амплитуды позволило выделить несколько различных способов (Мирзаджанзаде, Нигматулин, Азаматов, 1983; 1985). В работе (Азаматов, 1990.) систематизированы имеющиеся данные по диагностике потока пузырьковой жидкости ударно-волновым методом. Аналогичным способом позднее осуществлена диагностика газожидкостной смеси пенной структуры (Оренбах, Шушков, 1991). Позднее был получен патент на способ измерения истинного объемного газосодержания двухфазного потока (Нигматулин и др. 1994).

Как известно, пузырьковая жидкость при небольшом объемном газосодержании характеризуется высокой средней плотностью. Кроме того такой смеси свойственна высокая сжимаемость. Учет основных свойств пузырьковой смеси жидкости и газа позволяет математически описать характерные особенности и получить основные соотношения для их диагностики (Нигматулин, 1987).

Измерение газосодержания пузырьковой жидкости основывается на величине равновесной скорости звука в смеси. С учетом сжимаемости жидкости имеем:

$$C_e = \left( \frac{\alpha_{10} \alpha_{20} P_0^0}{\chi P_0} + \frac{\alpha_{10}}{C_1^2} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

где  $P_0$  – начальное давление смеси,  $\alpha_{10}$  – начальное объем-

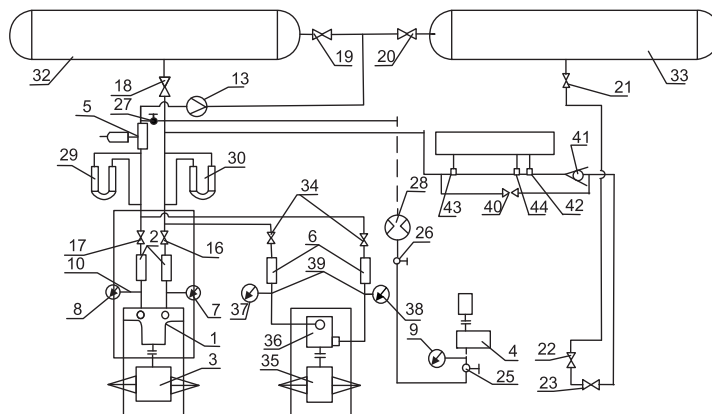


Рис. 1. Принципиальная технологическая схема замкнутого гидродинамического контура. 1 – насос НК 65/35, 2 – прозрачная вставка, 3 – мотор-весы, 4 – компрессор, 5 – диспергатор, 6 – прозрачная вставка, 7, 8, 9, 37, 38 – манометры, 10-11 – термометры, 12, 13 – замерные устройства, 14-24, 34, 40 – задвижки, 25-27 – вентили, 28 – ротаметр, 29-30 – дифманометры, 32, 33 – емкости, 36 – насос ЦНС-38-220, 39 – термометр, 41 – быстродействующий клапан, 42 – запускной датчик, 43, 44 – измерительные датчики.

ное содержание жидкости,  $\alpha_{20}$  – начальное объемное газосодержание смеси,  $\rho_1^0$  – начальная плотность жидкости,  $C_1$  – скорость звука в жидкости,  $\chi$  – показатель политропы газа.

Для упрощенных оценок применимо соотношение Мэллока при  $a \cong 1\%$ :

$$C_0 = \left( \frac{\gamma P_0}{\rho_1^0 \alpha_{20}} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

где  $\gamma$  – показатель адиабаты газа.

Учет сжимаемости жидкости при описании динамики волн конечной амплитуды  $P_e$  распространяющихся со скоростью  $D_0$  позволяет получить соотношение:

$$\alpha_{20} = \frac{P_e - P_0}{\rho_1^0} \left( \frac{1}{D_0^2} - \frac{1}{C_1^2} \right) \frac{1}{1 - \left( \frac{P_0}{P_e} \right)^{\frac{1}{\chi}}}. \quad (3)$$

Анализ соотношения (2) показывает, что относительная погрешность измерения составляет 0,2, а по соотношению (3) достигает 0,3. Из-за громоздкости выражений (1) – (2) погрешности представляются достаточно большими, хотя измерения давлений и скоростей ведутся относительно простыми методами.

В ходе работы были проведены эксперименты, позволившие разработать методику измерения мгновенного объемного газосодержания двухфазного потока пузырьковой структуры ударно-волновым способом. Эксперименты проводились на стенде общей длиной 40 м с гидродинамическим двухфазным контуром, замкнутым через емкость. Для диагностики потока использовались волновые возмущения давления, создаваемые за счет перекрытия потока быстродействующим механическим клапаном типа ПОУН-1. Измерения проводились на нисходящем участке контура длиной 2 м. Измерительный участок (Рис. 1) выполнен из трубы диаметром 100 мм, толщина стенок которой составляет 10 мм.

Жидкость по контуру перекачивалась центробежным насосом ЦНС-38-220 через герметичные емкости. Тарировка осуществлялась с помощью расходомера «Норд-100». Для визуальных наблюдений за потоком были установлены прозрачные вставки. Воздух в контур подавался компрессором типа К-75 через диспергатор. Расход воздуха контролировался ротаметром типа РС-28 или расходомером-редуктором типа МТП-280Р.

На измерительном участке (Рис. 2) вниз по потоку от клапана на расстоянии 0,8 м установлен запускающий датчик. Ниже по потоку от него на расстоянии 0,1 м расположен первый измерительный датчик, еще ниже на расстоянии 0,25 м – второй датчик. Все датчики – тип ЛХ-610 – импульсные, пьезокерамические. Электрические сигналы с них через согласующие истоковые повторители подаются на цифровой осциллограф.

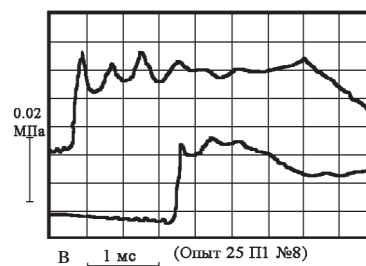
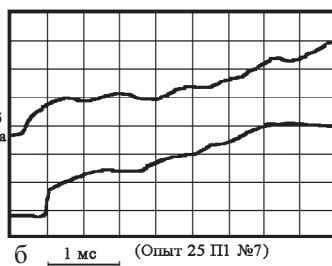
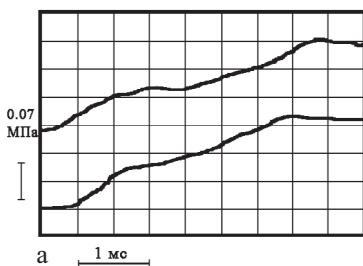


Рис. 3.



Рис. 2. Блок-схема измерительного участка с системой регистрации. 1 – нисходящий участок двухфазного контура; 2 – быстродействующий клапан; 3 – байпасная линия; 4 – задвижка; 5 – запускающий датчик; 6 – измерительный датчик; 7 – истоковые повторители; 8 – блок питания; 9 – цифровой осциллограф.

Система регистрации работала в ждущем режиме и приводилась в действие сигналом от запускающего датчика 5. Осциллограмма с экрана осциллографа фиксировалась и обрабатывалась. В ходе экспериментов газосодержание потока изменялось от минимальных значений, близких к нулю, до максимальных, ограниченных мощностью компрессора.

Эксперименты состояли из трех этапов: 1) проверка работоспособности системы измерения, ее тарировка на ударной трубе; 2) анализ сигналов, образованных в потоке безпузырьковой жидкости; 3) вычисление скорости волны и объемной концентрации воздуха в пузырьковой суспензии трансформаторного масла.

До и после проведения экспериментов система регистрации тарируется на специально созданной установке типа «ударная труба» (Азаматов, 1990) при начальных давлениях, равных рабочему давлению в двухфазном потоке. Ударная труба высокого давления предназначена для исследований динамики волн давления в многофазных средах. Установка изготовлена на основе тубы из нержавеющей стали внутренним диаметром 53 мм, внешним 69 мм. Общая высота установки составляет 6 м. Установка состоит из двух отсеков – камеры высокого давления (КВД) и камеры низкого давления (КНД), отделенных диафрагмой.

При проведении измерений выявилась характерная особенность динамики пузырькового потока. Пузырьки газа под действием перепада давления в потоке постоянно перераспределяются за счет разброса по размерам. Это явление отмечалось и в работе (Ripken, Killen, 196). Данное обстоятельство усложняет проведение и традиционных исследований динамики волновых возмущений в гидродинамических ударных трубах. А в двухфазных газожидкостных потоках пузырьковой структуры отмеченное перераспределение газосодержания не позволяет вообще выйти на «стационарные» условия опытов. Поэтому предлагается ввести термин «локально-временное истинное объемное газосодержание потока».

На рисунке 3 представлены осциллограммы, полученные при перекрытии двухфазного потока пузырьковой структуры. Начальное давление на измерительном участ-

ке для первого опыта (Рис. 3а)  $P_0 = 0,12$  МПа, давление на первой волне  $P_e = 0,29$  МПа.

Скорость распространения волны сжатия  $D_0 = 1000$  м/с. Ударная волна имеет монотонный характер с постепенным ростом давления в волне. Равновесная скорость звука  $C_e$  по (1) составляет 880 м/с. Оценка газосодержания потока по Мэллоку (2) дает значение  $\alpha_{20}^M \cong 0,04\%$ . Малая величина газосодержания побудила воспользоваться зависимостью (3), в которой учитывается сжимаемость жидкости. При  $\rho_{10}^0 = 0,9 \cdot 10^3$  кг/м,  $\chi = 1,4$ ;  $C_1 = 1445$  м/с получим  $\alpha \cong 0,02\%$ . Рабочей средой в контуре было трансформаторное масло.

На рисунке 3б представлены осциллограммы профилей волн давления, полученные при последующем увеличении доли воздуха в потоке.

Из осциллограмм видно, что волны сформировавшиеся при внезапном перекрытии потока, схожи по своей внутренней структуре. Характерно появление на переднем фронте волны резкого скачка давления, позволяющего точнее измерять интервал времени. А знание расстояния между датчиками с хорошей точностью позволяет определять скорость волны. В данном опыте  $D_0 = 833$  м/с, а  $C_e = 760$  м/с. Газосодержание по Мэллоку составляет  $\alpha_{20}^M \cong 0,06\%$ , а с учетом сжимаемости жидкости  $\alpha_{20} \cong 0,04\%$ . Кроме того на волне появились характерные регулярные колебания, свидетельствующие о возрастании влияния пузырьков на динамику волны. Заметно снизилась скорость движения переднего фронта волны, что и сказалось на результатах вычислений.

На рисунке 3в, показана характерная осциллограмма, полученная при резком перекрытии двухфазного потока пузырьковой жидкости. В данном случае количество газа, подаваемого в поток жидкости увеличено и увеличена чувствительность измерительных трактов.  $P_0 = 0,22$  МПа. Амплитуда волны, достигшей датчика давления составляет 0,24 МПа. Амплитуда волны по сравнению с предыдущим опытом уменьшилась, что объясняется увеличением концентрации газа в потоке. Волна имеет крутой передний фронт. Причем скачок давления происходит менее чем за 0,1 с. В данном опыте  $D_0 = 200$  м/с, а  $C_e = 197$  м/с и  $\alpha_{20} \cong 0,86\%$ . В этом случае значение  $\alpha_{20}$  практически совпадает со значением газосодержания, вычисленным по соотношению Мэллока.

Профиль волны, сформировавшейся в последнем опыте, представляет собой осцилляционную волну «П» образной формы. Осцилляции на волне объясняются наличием пузырьков. Частота осцилляции составляет  $\cong 2,5$  КГц. По соотношению Миннаерта, связывающего период колебаний пузырьков с параметрами среды  $T = 2\pi p_0 \sqrt{\rho_1^0 / 3 \gamma}$  можно оценить начальный средний размер пузырьков жидкости  $\alpha_0$ . Из осциллограммы видно, что давление в ударной волне со временем падает: за ударной волной движется пологая волна разгрузки с несколько меньшей скоростью, происхождение которой можно объяснить наличием байпасной линии на измерительном участке.

## Выводы

1. Предложен, разработан и опробован метод измерения локального истинного свободного газосодержания газожидкостного потока пузырьковой структуры.

2. Показано, что относительная точность метода составляет 20 – 30 %.

К настоящему времени получен патент на способ измерения истинного объемного газосодержания двухфазного потока.

## Литература

- Азаматов А.Ш. Экспериментальное исследование динамики ударных волн в двух- и трехфазных жидкостях. *Автореф. Дис. канд. физ.-мат. наук.* Тюмень. 1990. 157.
- Мирзаджанзаде А. Х., Нигматулин Р. И., Азаматов А. Ш. и др. Способ определения свойств жидкостей. *Авт. свид.* 996931 СССР, МКИ G 01 № 29/02. Бюл. N 6. 1983.
- Мирзаджанзаде А.Х., Нигматулин Р.М., Азаматов А.Ш. и др. Способ определения свободного газопаросодержания в жидкости. *А.с.* 1147970 СССР, МКИ G 01 N 29/00. Бюл. N 12. 1985.
- Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г., Шрейбер И.Р. Распространение волн в газо-и парожидкостных средах. Новосибирск: ИТФ. 1983. 238.
- Нигматулин Р.И., Нигматулин Б.И., Азаматов А.Ш. и др. *Пат.* 2011191 С1 G 01 № 29/02. RU. 1994.
- Нигматулин Р.И. *Динамика многофазных сред.* М.: Наука. Ч.1. 1987. 464.
- Оренбах З.М., Шушков Г.А. Акустика неоднородных сред ИГД. Новосибирск. Вып.100. 1991.
- Семенов П.М., Костерин С.И. Результаты исследования скоростей звука в движущихся газожидкостных смесях. *Теплоэнергетика.* N 6. 1964. 46-51.
- Caustensen E.J., Foldy L.L. Propagation of sound through a liquid containing bubbles. *J.Acoust. Soc. Amer.* V.19. N 3. 1947. 481-501.
- Meyer E., Tamm K. Eigenschwingung und Dampfung von Gasblasen in Flussigkeiten. *Akust. Zs.* N 4. 1939. 145-147.
- Meyer E., Skudzyk E. The acoustic properties of gaz bubble mists in water. *Acustika.* N 3. 1953. 434-440.
- Ripken J.E., Killen J.M. Gas bubbies, occurrence, measurement and influence in cavitation testing. *Proc. Symposium on cavitation and hydraulic machinery.* Japan. V.3. 1962. 37-54.

## М.А. Azamatov, A.Sh. Azamatov. Two-phase bubble flow characterization.

The article describes the process of local gas content measurement technology development and approbation because of great influence on technological processes.

*Keywords:* local gas content, two phase three component streams, technological liquids.

### Азаматов Марат Альбертович

Зам. начальника управления проектирования мониторинга геолого-технических мероприятий и сводного планирования добычи филиала «Муравленковскнефть» ОАО «Газпромнефть-ННГ». Научные интересы: геология и разработка нефтяных и газовых месторождений, автоматизация производственных процессов, транспортировка энергоресурсов.

629603, РФ, Тюмен. обл., ЯНАО, г.Муравленко, ул. Ленина, 82/19. Тел.: +7 9220-60-11-07.



### Азаматов Альберт Шамилович

Кан. физ.-мат. наук, ученый секретарь отделения нефти и газа Академии наук Республики Башкортостан. Научные интересы: физика нефтяного пласта, изучение характеристик двухфазных потоков, фильтрация нефтяных эмульсий.

450000, г.Уфа, ул. Кирова, 15. Тел.: (3472)72-79-30.

