

УДК 532.529.5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ В ГАЗОЖИДКОСТНОМ ПОТОКЕ

В. Н. Мамонов, А. Ф. Серов

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия
E-mails: mamonovvn@mail.ru, serov@itp.nsc.ru

Предложен метод определения объемной концентрации газовой фазы в газожидкостном потоке с помощью ультразвукового расходомера. Метод основан на экспериментальном определении коэффициента прозрачности газожидкостного потока для ультразвуковых импульсов, используемых в расходомере для измерения скорости потока. Определен коэффициент прозрачности как отношение количества достоверных принятых ультразвуковых импульсов к количеству излученных импульсов и показано, что вследствие рассеивания зондирующих импульсов наличие фазы в виде пузырьков газа приводит к уменьшению коэффициента прозрачности. Проведена калибровка использованного ультразвукового расходомера в воздушно-водяном потоке в диапазоне значений объемной концентрации воздуха в потоке $0 \div 19$ %. Полученные результаты позволяют утверждать, что предложенный метод можно использовать для измерения объемной концентрации газовой фазы в газожидкостном потоке до значений порядка 30 %.

Ключевые слова: газожидкостный поток, объемная концентрация газовой фазы, ультразвуковой расходомер, коэффициент прозрачности потока для ультразвуковых импульсов.

DOI: 10.15372/PMTF20210107

Введение. В настоящее время существует необходимость быстрой, надежной и недорогой комплексной методики раздельного измерения расхода (массы) компонентов многофазного продукта, извлекаемого из нефтяной или газоконденсатной скважины. Данная проблема активно исследуется в Институте теплофизики (ИТ) СО РАН [1–7]. Настоящая работа посвящена экспериментальному определению объемной концентрации газового компонента в двухфазном газожидкостном потоке в трубе. Полученные результаты можно рассматривать в качестве вклада в решение указанной проблемы.

Постановка задачи. В работе [7] сформулирован подход к разработке метода измерения массовой или объемной концентрации газового компонента в двухфазном газожидкостном потоке. Этот подход основан на том, что в ультразвуковых расходомерах (УР) зондирование потока ультразвуковым импульсом выполняется с некоторой заданной частотой. Например, в разработанном в ИТ СО РАН УР “Тритон-М” [8], использовавшемся в качестве основного измерительного инструмента в настоящей работе, эта частота составляет 200 Гц (за один цикл измерений длительностью 1 с излучается 200 импульсов). При каждом зондировании определяются задержка и уровень принятого сигнала, при этом

достоверным считается сигнал некоторого заданного уровня. По данным о времени прохождения импульса вычисляются скорость потока и его объемный расход.

Введем понятие коэффициента прозрачности зондируемого потока для ультразвуковых импульсов как отношение количества достоверных принятых в течение цикла измерений импульсов N к количеству излученных импульсов (200 импульсов), выраженное в процентах:

$$K_g = \frac{N}{200} \cdot 100 \%. \quad (1)$$

В случае однородного потока жидкости $K_g = 100 \%$.

Вследствие рассеивания газовой составляющей в виде пузырьков газа (или твердая фаза в виде твердых частиц) блокирует прохождение части ультразвуковых импульсов. В этом случае коэффициент прозрачности уменьшается. Полагая, что в случае газожидкостного потока величина K_g зависит только от объемной концентрации газовой фазы C_V , и выполнив калибровку зависимости $K_g(C_V)$ для конкретного УР в газожидкостном потоке с известной объемной концентрацией газовой фазы, можно, используя эту калибровку, определить величину C_V в других газожидкостных потоках.

На основе изложенного выше поставлена задача: разработать метод определения объемной концентрации газовой фазы в газожидкостном потоке с использованием зависимости коэффициента прозрачности потока для ультразвуковых импульсов от объемной концентрации газовой фазы.

Экспериментальное оборудование. Для разработки метода измерения величины C_V и проверки его эффективности проведена серия экспериментов на гидравлическом стенде ИТ СО РАН, дополнительно оснащенном оборудованием, позволяющим создавать в замкнутом контуре диаметром 50 мм воздушно-водяной поток с известной объемной концентрацией воздуха. Схема этого гидравлического стенда приведена на рис. 1.

В качестве рабочей жидкости в гидравлическом стенде использовалась вода. Для работы с газожидкостным (воздушно-водяным) потоком гидравлический стенд дополнительно оснащался системой инъекции воздуха 17, 18 (см. рис. 1) и системой для измерения объема воздуха в водяном потоке, циркулирующем в замкнутом контуре стенда. Эта система состояла из мерного бака высокого давления 6 с внутренним диаметром 130 мм и высотой цилиндрической части 450 мм, мерной стеклянной трубки 7 с ценой деления 1 мм, манометра 8 для измерения избыточного давления в замкнутом контуре стенда и отсекающего шарового крана 11. Согласно объемной калибровке мерного бака часть трубки 7 высотой 1 мм соответствовала объему мерного бака $13,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$, т. е. общий измерительный объем мерного бака составлял приблизительно $0,005 \text{ м}^3$.

В качестве измерительного инструмента для определения коэффициента прозрачности K_g использовался серийный УР “Тритон-М” с диаметром измерительного канала 50 мм, включенный в Государственный реестр средств измерений РФ и имеющий действующее свидетельство о поверке.

Конструкция УР “Тритон-М” позволяет непрерывно проводить запись данных в файл его внутренней памяти с интервалом 5 с. Измеряются и регистрируются прибором следующие текущие параметры: время эксперимента τ , с, температура потока t , °С, средняя скорость потока в трубе диаметром 50 мм U , м/с, количество достоверных выполненных за цикл измерений ультразвуковых импульсов N . Файл с этими данными можно извлечь из внутренней памяти прибора в формате Excel для дальнейшей обработки.

Методика экспериментальных исследований. Объемная концентрация воздуха, инжектированного в циркулирующий по замкнутому контуру водяной поток, определялась следующим образом. С помощью шаровых кранов и насоса 3 обеспечивалась настройка

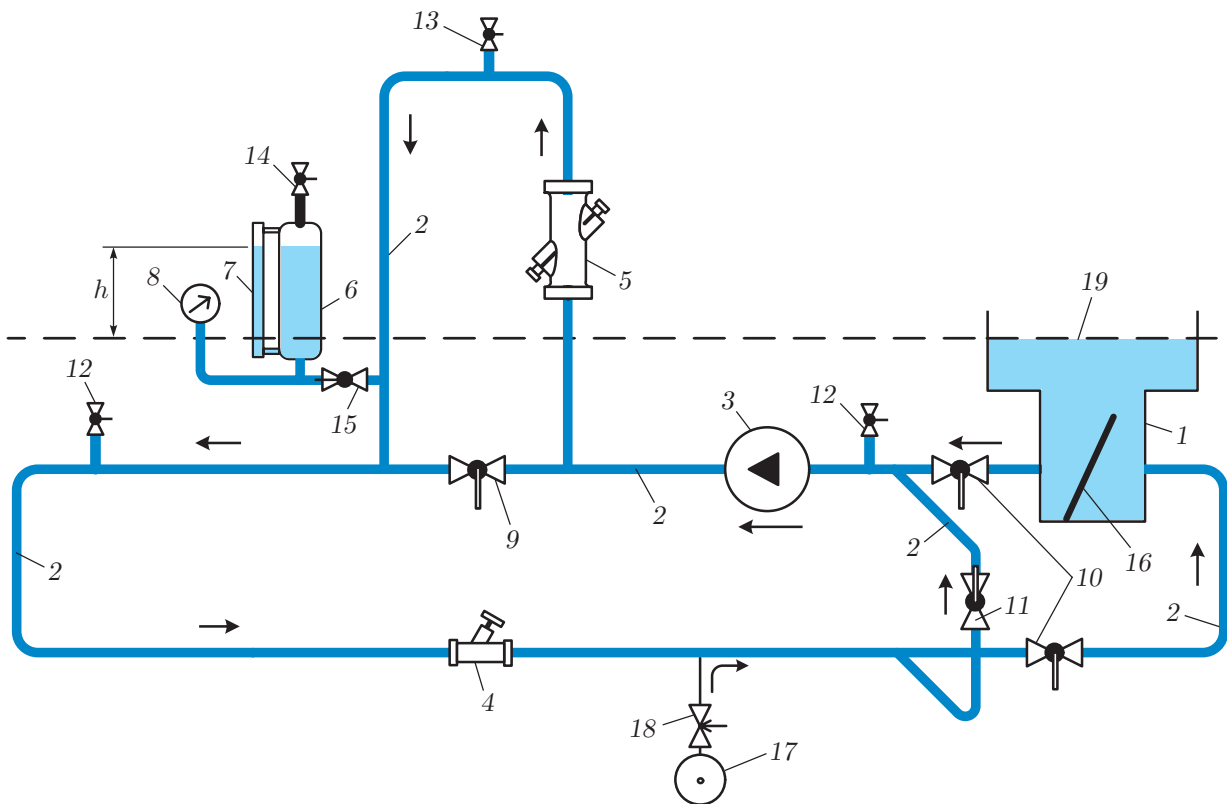


Рис. 1. Схема воздушно-водяного гидравлического стенда:

1 — водяной бак объемом $0,14 \text{ м}^3$ с открытой поверхностью, 2 — трубопровод диаметром 50 мм, 3 — циркуляционный насос, 4 — вентиль для регулирования расхода в контуре стенда, 5 — УР “Тритон-М” с присоединительным диаметром 50 мм, 6 — мерный бак для определения объема воздуха в замкнутом контуре стенда, 7 — водомерная стеклянная трубка мерного бака, 8 — манометр, 9–11 — шаровые краны диаметром 50 мм для настройки режима работы стенда, 12–14 — шаровые краны диаметром 15 мм для сброса воздуха в атмосферу при настройке режима работы стенда, 15 — шаровый кран диаметром 15 мм для перекрытия мерного бака, 16 — наклонная пластина для стабилизации потока в случае стенда с открытой поверхностью, 17 — источник сжатого воздуха (компрессор или стационарная сеть сжатого воздуха ИТ СО РАН), 18 — кран для регулирования расхода сжатого воздуха, 19 — свободная поверхность

стенда на исходный рабочий режим: водяной поток (без инжектированного воздуха) циркулировал по замкнутому контуру стенда (минуя бак 1). При этом мерный бак 6 был заполнен воздухом до уровня, совпадающего с уровнем воды в баке со свободной поверхностью 1. На рис. 1 показано состояние всех шаровых кранов, соответствующее этому исходному рабочему режиму (положение ручек шаровых кранов вдоль направления потока соответствует их открытому состоянию). В таком состоянии стенда, являющемся исходным перед проведением эксперимента, рабочий гидравлический контур заполнен водой (воздух отсутствует). Уровень воды в мерном баке 6 минимален, верхняя часть мерного бака заполнена воздухом.

Если в замкнутый контур стенда, работающего в исходном рабочем режиме, инжектировать некоторый объем воздуха, то, поскольку вода является несжимаемой жидкостью, инжектированный воздух в водяном потоке займет объем, соответствующий температуре и давлению в рабочем контуре стенда, и вытеснит соответствующий объем воды в мерный калиброванный бак 6. Измерив этот объем и зная объем замкнутого контура стенда, можно определить объемную концентрацию воздуха в замкнутом контуре стенда.

Эксперимент по определению объемной концентрации газовой фазы в воздушно-водяном потоке проводился следующим образом:

1. С помощью насоса Z в замкнутом контуре стенда устанавливалась циркуляция потока воды с постоянной средней скоростью $U = 1,0 \div 1,5$ м/с. В дальнейшем в ходе эксперимента режим работы насоса Z не менялся, т. е. средняя скорость потока могла изменяться в зависимости от условий проведения эксперимента (изменение температуры, увеличивающаяся концентрация газовой фазы).

2. УР начинал непрерывно, с интервалом 5 с регистрировать в рабочий файл внутренней памяти текущие параметры τ , t , U , N .

3. В таком исходном состоянии в мерном баке b вручную регистрировались уровень воды ($h = 0$), соответствующий отсутствию газовой фазы в потоке, и с помощью манометра 8 — давление P (в гидравлическом контуре).

4. С помощью регулирующего крана 18 устанавливалась минимально возможная инжекция воздуха в гидравлический контур стенда. Величина расхода воздуха должна позволять вручную регистрировать высоту столба воды h и давление P в мерном баке, зависящие от текущего времени эксперимента τ .

5. Далее с максимально возможной периодичностью вручную измерялись значения величин h и P при различных значениях текущего времени эксперимента τ , которое фиксировалось на мониторе УР.

6. Эксперимент заканчивался, когда высота столба воды в мерном баке b достигала значения $h \approx 400$ мм.

Результаты экспериментальных исследований. Результаты проведенного эксперимента приведены в таблице, в которой значения t , U взяты из рабочего файла УР в моменты времени τ , соответствующие результатам регистрации в ручном режиме параметров h и P . Объем находящегося в потоке инжестированного воздуха V определялся в соответствии с калибровкой мерного бака b по формуле $V = 13,3h \cdot 10^{-6}$ м³. Объем инжестированного воздуха при нормальных условиях ($t = 20$ °С, $P = 98,07$ кПа) вычислялся по формуле $V_n = PV/98,07$, масса инжестированного воздуха — по формуле $M = V_n \rho_n$ (ρ_n — плотность воздуха при нормальных условиях, которая определялась как табличная величина, соответствующая температуре t). Объемная концентрация инжестированного воздуха в воздушно-водяном потоке вычислялась по формуле $C_V = V/V_C \cdot 100$ %, где $V_C = 0,0243$ м³ — объем замкнутого контура гидравлического стенда.

На рис. 2 приведена временная развертка величины N — текущего значения количества достоверных выполненных за цикл измерений ультразвуковых импульсов в ходе проведения эксперимента. Видно, что с увеличением объемной концентрации инжестированного воздуха интенсивность пульсаций мгновенного текущего значения параметра N увеличивается. При обработке полученных экспериментальных данных зависимость $N(\tau)$ аппроксимировалась кубической параболой:

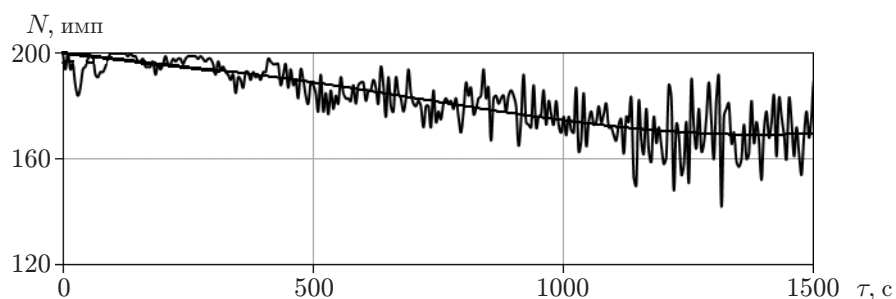
$$N = 2 \cdot 10^{-8} \tau^3 - 5 \cdot 10^{-5} \tau^2 + 0,0022\tau + 200. \quad (2)$$

Каждое значение параметра N в таблице вычислялось по формуле (2) для соответствующего момента времени τ . Коэффициент прозрачности в таблице вычислялся по формуле (1).

На рис. 3 приведена полученная экспериментально зависимость коэффициента прозрачности воздушно-водяного потока K_g от объемной концентрации воздуха C_V . Из анализа полученной зависимости следует, что при увеличении параметра C_V в диапазоне $0 \div 10$ % коэффициент прозрачности постепенно уменьшается. При дальнейшем увеличении C_V до 20 % величина K_g резко уменьшается до 75 %. Опыт работы с расходомерами “Тритон-М” показывает, что значение коэффициента прозрачности $K_g = 50$ % является

Результаты эксперимента по измерению объемной концентрации газовой фазы в газожидкостном потоке

№ п/п	τ , с	t , °С	U , м/с	P , кПа	h , м	V , м ³	V_n , м ³	M , кг	N , имп	K_g , %	C_V , %
1	0	27,2	1,16	167	0	0	0	0	200	100,0	0
2	45	27,4	1,15	169	0,210	0,0028	0,0048	0,0057	197	98,4	11,5
3	185	27,8	1,14	169	0,210	0,0028	0,0048	0,0057	196	97,8	11,5
4	245	27,9	1,13	179	0,225	0,0030	0,0055	0,0064	195	97,3	12,3
5	325	28,1	1,12	184	0,235	0,0031	0,0059	0,0069	193	96,4	12,9
6	380	28,3	1,11	189	0,243	0,0032	0,0062	0,0073	191	95,7	13,3
7	425	28,4	1,10	196	0,255	0,0034	0,0068	0,0080	190	95,1	14,0
8	490	28,5	1,08	203	0,262	0,0035	0,0072	0,0085	188	94,1	14,3
9	515	28,6	1,09	208	0,268	0,0036	0,0076	0,0089	187	93,7	14,7
10	600	28,8	0,96	216	0,280	0,0037	0,0082	0,0096	184	92,2	15,3
11	625	28,9	0,93	221	0,282	0,0038	0,0084	0,0099	183	91,7	15,4
12	675	28,9	0,94	226	0,290	0,0039	0,0089	0,0104	182	90,8	15,9
13	725	29,1	0,94	233	0,295	0,0039	0,0093	0,0109	180	89,8	16,1
14	800	29,2	0,83	226	0,300	0,0040	0,0092	0,0107	177	88,4	16,4
15	875	29,5	0,88	221	0,305	0,0041	0,0091	0,0107	174	86,9	16,7
16	920	29,6	0,86	250	0,310	0,0041	0,0105	0,0123	172	86,0	17,0
17	1000	29,7	0,79	253	0,312	0,0041	0,0107	0,0125	169	84,5	17,1
18	1025	29,8	0,83	257	0,315	0,0042	0,0110	0,0128	168	84,0	17,2
19	1095	30,0	0,81	265	0,320	0,0043	0,0115	0,0134	165	82,7	17,5
20	1160	30,1	0,86	270	0,325	0,0043	0,0119	0,0139	163	81,6	17,8
21	1260	30,3	0,73	277	0,328	0,0044	0,0123	0,0144	160	80,2	18,0
22	1300	30,4	0,73	282	0,335	0,0045	0,0128	0,0149	159	79,5	18,3
23	1375	30,6	0,72	289	0,340	0,0045	0,0133	0,0155	157	78,6	18,6
24	1430	30,5	0,74	294	0,340	0,0045	0,0136	0,0158	156	78,1	18,6
25	1515	30,8	0,83	299	0,345	0,0046	0,0140	0,0163	155	77,4	18,9
26	1550	30,8	0,84	299	0,345	0,0046	0,0140	0,0163	155	77,3	18,9

Рис. 2. Временная развертка текущего значения N

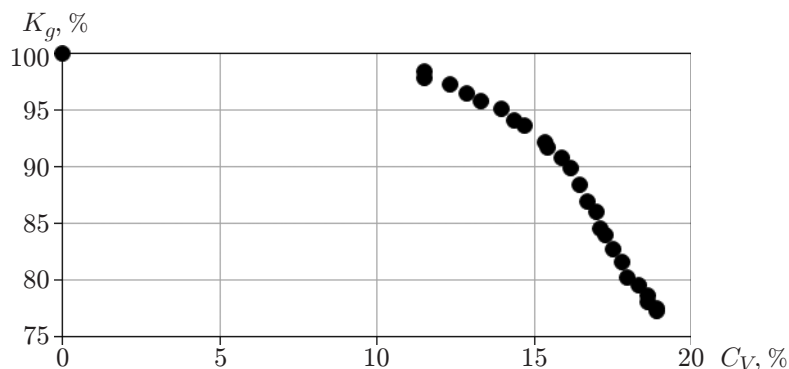


Рис. 3. Зависимость коэффициента прозрачности воздушно-водяного потока от объемной концентрации воздуха

пограничным, ниже которого погрешность измерения скорости потока УР настолько велика, что измерения становятся невозможными (коэффициент прозрачности уменьшается до нуля). По грубым оценкам, это происходит при $C_V \approx 30$ %.

Описанная процедура получения зависимости коэффициента прозрачности воздушно-водяного потока от объемной концентрации воздуха для конкретного УР, по сути, является его калибровкой, предназначенной для использования этого УР при измерении параметра C_V в воздушно-водяных потоках.

Заключение. Предложен и экспериментально апробирован метод определения объемной концентрации газовой фазы в газожидкостном потоке с использованием ультразвукового расходомера “Тритон-М”. Введено понятие коэффициента прозрачности зондируемого потока для ультразвуковых импульсов как отношения количества принятых импульсов к количеству излученных импульсов. Установлено, что при наличии газовой фазы в виде пузырьков газа вследствие рассеивания зондирующих ультразвуковых импульсов коэффициент прозрачности уменьшается, и это позволяет определять объемную концентрацию газовой фазы.

Описаны и реализованы методика и конструкция гидравлического стенда для калибровки измерителя коэффициента прозрачности в воздушно-водяном потоке. Проведена калибровка УР в воздушно-водяном потоке в диапазоне значений объемной концентрации воздуха в потоке $0 \div 19$ %.

Полученные результаты позволяют утверждать, что предложенный метод можно использовать для измерения объемной концентрации газовой фазы в газожидкостном потоке до значений порядка 30 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Серов А. Ф., Назаров А. Д., Бодров М. В. Аппаратура и алгоритм для определения содержания нефти в смеси у скважины // Сб. материалов 3-го Междунар. науч. конгр. “ГЕО-СИБИРЬ-2007”, Новосибирск, 25–27 апр. 2007 г. Новосибирск: Сиб. гос. геодез. акад., 2007. Т. 5. С. 218–224.
2. Пат. 85227 РФ, МКИ G 01 F 1/00, G 01 F 1/66. Измеритель расхода нефти / А. Ф. Серов, В. Н. Мамонов, А. Д. Назаров, С. В. Кротов. Оpubл. 27.07.2009.
3. Серов А. Ф., Назаров А. Д., Мамонов В. Н., Бодров М. В. Принцип построения двухкомпонентного счетчика-расходомера для нефтяной скважины // Науч. вестн. Новосиб. гос. техн. ун-та. 2012. Вып. 4. С. 176–182.

4. **Серов А. Ф., Мамонов В. Н., Назаров А. Д., Кириллов К. М.** Измерительный пункт “Кварта-Н-50” для контроля дебета и параметров нефтяной эмульсии и нефти на скважине // Сб. материалов 9-го Междунар. науч. конгр. “ГЕО-СИБИРЬ-2013”, Новосибирск, 15–26 апр. 2013 г. Новосибирск: Сиб. гос. геодез. акад., 2013. Т. 2. С. 77–82.
5. **Кириллов К. М., Назаров А. Д., Мамонов В. Н., Серов А. Ф.** Ультразвуковой расходомер для вязких жидкостей // Измерит. техника. 2014. № 5. С. 39–40.
6. **Мамонов В. Н., Серов А. Ф.** Диагностика газовой фазы при течении газожидкостного потока в трубе // Сб. материалов Всерос. конф. “31-й Сибирский теплофизический семинар”, Новосибирск, 17–19 нояб. 2014 г. Новосибирск: Ин-т теплофизики СО РАН, 2014. С. 322–324.
7. **Мамонов В. Н., Серов А. Ф., Терехов В. И.** Экспериментальное исследование комплексного метода измерения массового расхода газожидкостных сред // Вестн. Тюм. гос. ун-та. Физ.-мат. моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2017. Т. 3, № 4. С. 65–81.

*Поступила в редакцию 16/III 2020 г.,
после доработки — 25/V 2020 г.
Принята к публикации 29/VI 2020 г.*
