

## МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БАРБОТАЖНОГО МЕТОДА СОЗДАНИЯ СМЕСЕЙ ГАЗОВ

### ВВЕДЕНИЕ

Основные физические процессы при барботировании применительно к созданию смесей газов методом дозированной подачи дискретных порций составляющих газов в смесительную камеру рассмотрены в работе [1]. При изучении возможностей метода барботирования особое внимание уделялось влиянию таких характеристик, как растворимость газов в рабочей жидкости, свойства самой рабочей жидкости, соотношение объемов пузырька и смесительной камеры на точность соотношения компонентов в смеси. Вместе с тем, ряд зависимостей, среди которых изменение объема пузырька при увеличении плотности газа, разбросе диаметров барботажных трубок и др., определяющие метрологические характеристики барботажного метода, исследован не был. Поскольку создание газовых смесей с точностью соотношения компонент 0,1 – 0,01% (поверочные газовые смеси) является актуальной задачей, в настоящей работе продолжены исследования по влиянию основных параметров и их погрешностей на метрологические характеристики барботажного метода создания смесей газов.

### 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Схема устройства для создания смеси газов барботажным методом с обозначением основных параметров, которые определяют точность получения заданного процентного соотношения газовых компонент, представлена на рис.1.

При работе устройства в объеме смесительной камеры  $V_{см}$  с каждым поднявшимся пузырьком будет происходить рост давления  $p_{см}$ . Суммарное давление в самом пузырьке  $p_n$ , определяемое равенством  $p_n = p_г = p_{см} + p_{гидр} + p_L$ , где  $p_г$  – входное давление газа;  $p_{гидр} = \rho_{ж} g h$  – гидравлическое давление на глубине погружения среза трубок  $h$ ;  $p_L = \alpha / (2 \cdot R_n)$  – давление Лапласа, с каждым последующим пузырьком также повышается.

Условием отрыва пузырька от среза трубки является равенство подъемной силы Архимеда  $F_n$  и поверхностного натяжения по контуру отверстия в трубке  $V_n g (\rho_{ж} + \rho_{г}) = 2\pi a \sigma_{тр}$ , где  $V_n$  – объем пузырька;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\rho_{ж}$  – плотность рабочей жидкости;  $\rho_{г}$  –

плотность газа;  $\alpha$  – поверхностное натяжение рабочей жидкости;  $r_{тр}$  – внутренний радиус барботажной трубки.

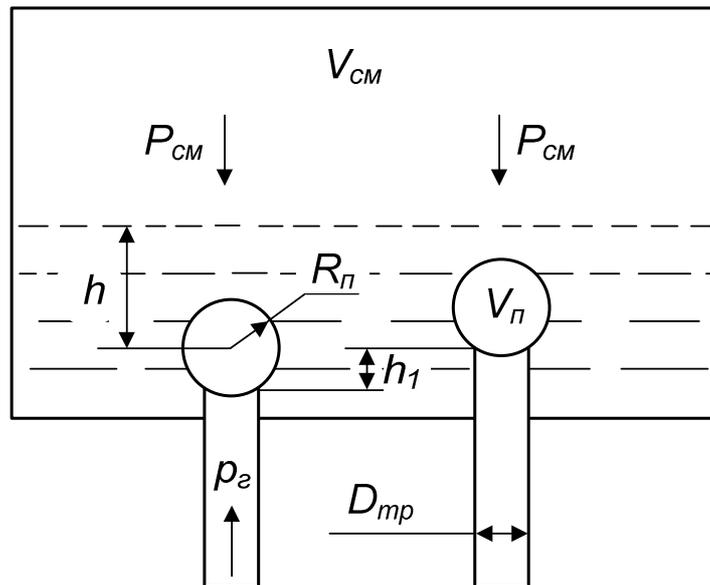


Рисунок 1 – Схема устройства для создания смеси газов барботажным методом

После отрыва пузырька от трубки под действием подъемной силы он начинает всплывать, испытывая сопротивление со стороны рабочей жидкости  $F_c = 6\pi\eta R_n \vartheta$ , где  $\eta$  – динамическая вязкость рабочей жидкости,  $\vartheta$  – скорость подъема пузырька.

Из равенства  $F_n = F_c$  можно определить скорость установившегося подъема пузырька  $\vartheta = g((\rho_{жс} - \rho_г)/\eta) \cdot (2R_n^2/9)$ . Время подъема пузырька определится как  $t = h/\vartheta$ . В действительности время подъема пузырька будет немного больше, поскольку в начальный момент его скорость равна  $\vartheta = 0$ . Учитывая малость массы пузырька, это приращение во времени будет весьма незначительным.

В качестве рабочих жидкостей при исследованиях использовались вакуумное масло ВМ-1 и дистиллированная вода. В качестве газа был взят азот. Основные физические характеристики рабочих жидкостей и газа приведены в таблице.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для выполнения условия  $V_{см}/V_п > 10^4$  [1], необходимо знать объем пузырька газа, который зависит от радиуса барботажной трубки. При использовании приведенных выше зависимостей, были построены графики  $R_п = f(r_{тр})$  и  $V_п = f(r_{тр})$ , приведенные на (рис. 2 и 3).

При использовании в качестве рабочей жидкости вакуумного масла ВМ-1 при диаметре барботажных трубок 3 – 4 мм, как следует из

зависимости на рис.3, объем пузырька будет составлять  $\sim 35 - 47 \text{ мм}^3$ . Отсюда объем смесительной камеры в этом случае должен быть не менее  $500 \text{ см}^3$ .

Таблица  
Физические характеристики рабочих жидкостей и газа

Параметр	Вода	ВМ-1	Азот
Плотность $\rho$ , $\text{кг/м}^3$	998,23 при $t = 20^\circ \text{C}$ [4]	887 [3]	1,2505 при $t = 0^\circ \text{C}$ , $p = 760 \text{ мм рт. ст.}$ [2]
Коэффициент поверхностного натяжения $\alpha$ , $10^{-3} \text{ Н/м}$	72,58 при $t = 20^\circ \text{C}$ [2]	32 [5]	-
Коэффициент внут- реннего трения (дина- мическая вязкость) $\eta$ , $10^{-3} \text{ кг}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$	1,005 при $t = 20^\circ \text{C}$ [6]	61 при $t = 50^\circ \text{C}$ [3]	-

При всплытии пузырька газа вследствие уменьшения гидростатического давления его объем будет увеличиваться. Происходящее постепенное увеличение давления в смесительной камере в ходе работы устройства будет приводить к увеличению плотности газа в самом пузырьке, что тоже будет сказываться на его объеме. Зависимости, характеризующие эти процессы, приведены на рис. 4 и 5.

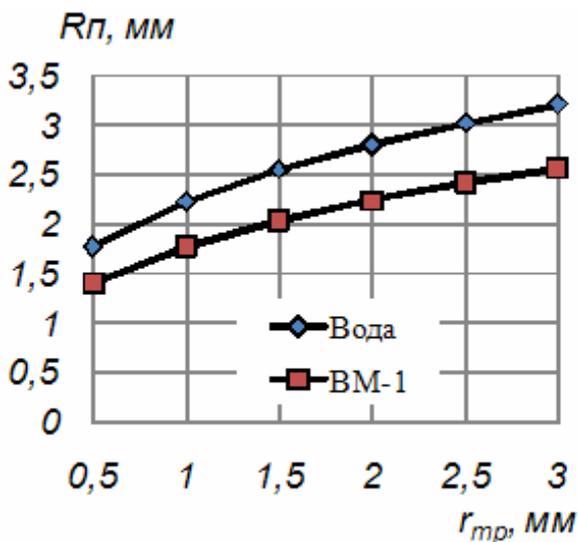


Рисунок 2 – Зависимость радиуса пузырька от радиуса трубки

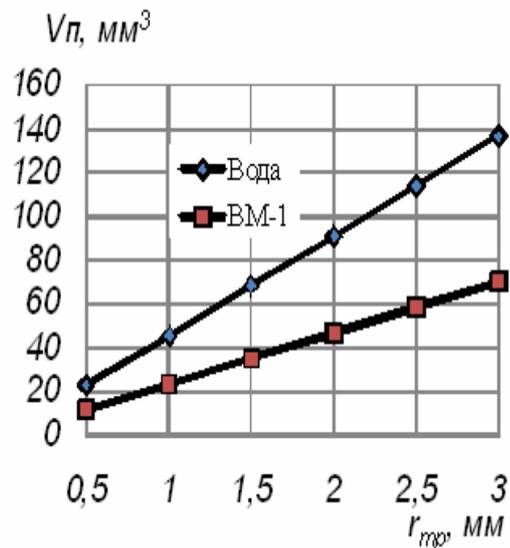


Рисунок 3 – Зависимость объема пузырька от радиуса трубки

При разработке устройства смешения газов барботажного типа возникает вопрос о наиболее оптимальной глубине погружения барботажных трубок в рабочую жидкость (расстояние  $h$ , рис.1). С одной стороны, с увеличением этого расстояния увеличивается время всплытия пузырька, с другой – оно не может быть меньше диаметра

газового пузырька. При изготовлении экспериментального устройства нами было выбрано  $h = 50$  мм. Время всплывания с этой глубины пузырьков различного диаметра, определяемого радиусом барботажной трубки, представлено на рис. 6.

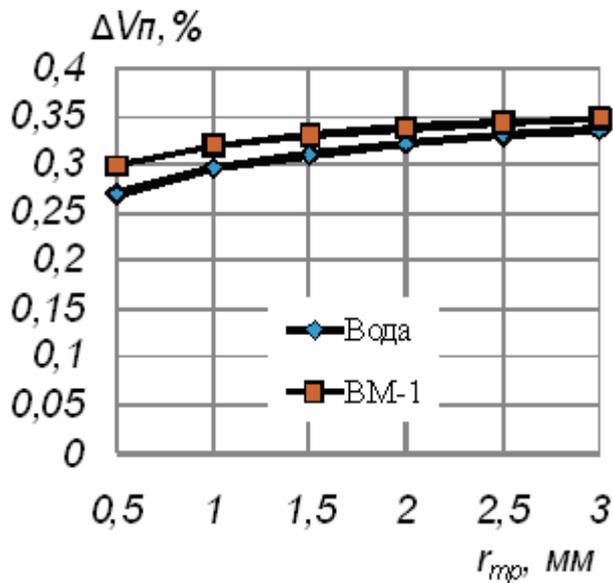


Рисунок 4 – Увеличение объема пузырька при всплывании,  $h = 50$  мм

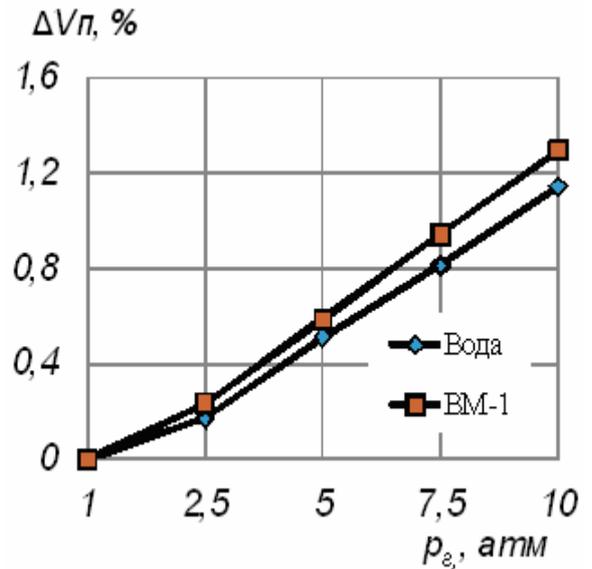


Рисунок 5 – Увеличение объема пузырька в момент отрыва при увеличении давления газа

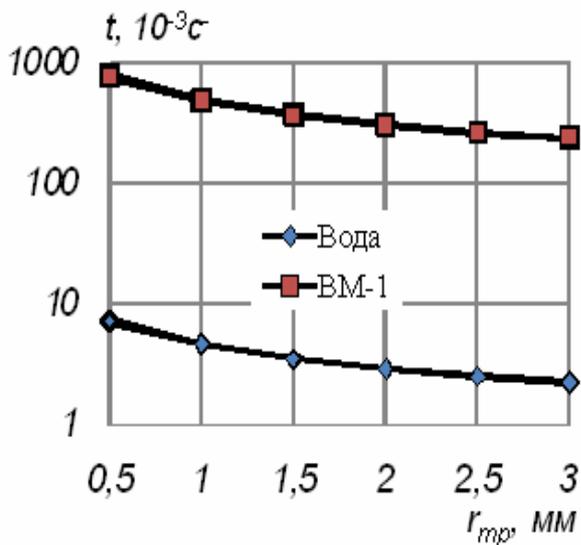


Рисунок 6 – Время всплывания пузырьков при различном радиусе барботажной трубки

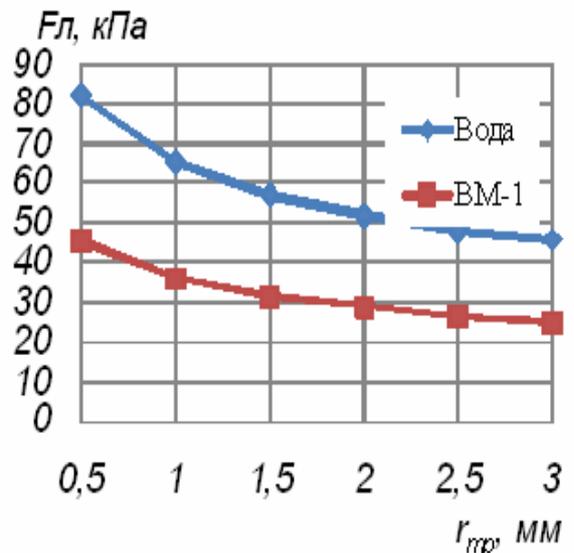


Рисунок 7 – Сила Лапласа в зависимости от радиуса барботажной трубки

Составляющие суммарного давления на пузырек имеют разную величину, к тому же постоянно меняющуюся в процессе работы устройства. Так, гидродинамическая составляющая (для воды на глубине 50 мм равная 489,13 Па) при всплывании пузырька постоянно уменьшается. Сила Лапласа оказывает наибольшее влияние в начальный момент работы,

когда давление в смесительной камере минимально. Величина этой силы в зависимости от радиуса трубки приведена на рис.7.

Погрешность соотношения газовых компонент, связанная с разбросом размера  $h$  при установке нескольких трубок (по количеству газов) будет весьма незначительной. Действительно, при разнице  $h$  в 0,1 мм перепад давлений составляет величину порядка 1 Па, что очень слабо скажется на плотности газа.

Намного большая погрешность связана с разницей в диаметрах барботажных трубок. На рис.8 приведена зависимость максимальной относительной погрешности объемов газовых пузырьков от величины разброса радиусов барботажных трубок. Эта погрешность особенно значительна для трубок небольшого размера.

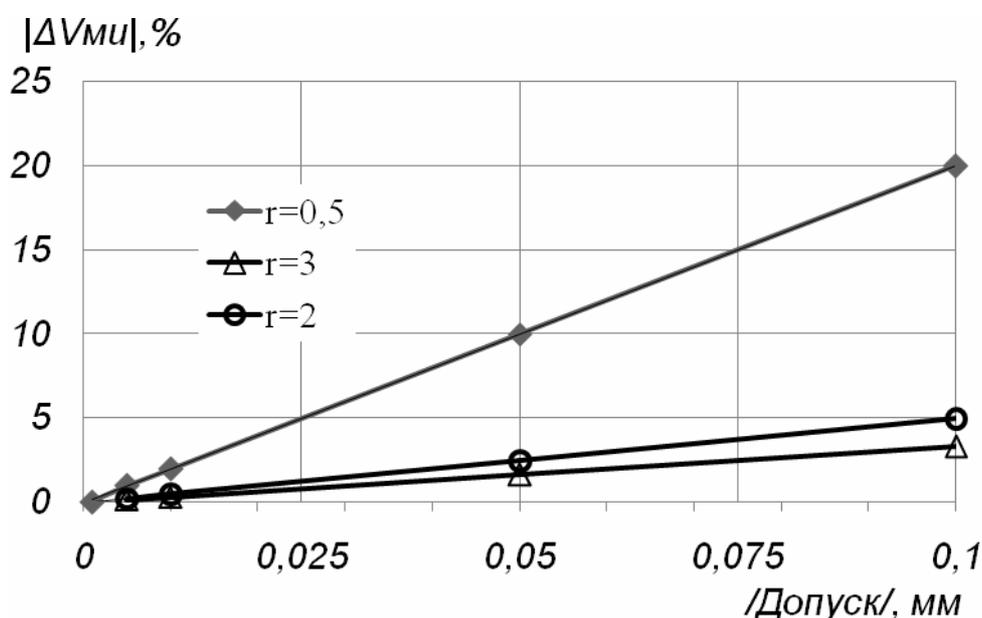


Рисунок 8 – Максимальная относительная погрешность объемов газовых пузырьков в зависимости от разброса значений радиусов трубок

## ВЫВОДЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1. Выполнены исследования, позволяющие определить влияние на объем газового пузырька при барботировании таких параметров, как характеристики рабочей жидкости, радиус барботажной трубки, глубина погружения трубок и давление газа в смесительной камере.

2. Определено время всплытия пузырька в различных рабочих жидкостях. Оценено влияние составляющих суммарного давления на газовый пузырек. Найдены погрешности, определяемые разбросом радиусов барботажных трубок.

3. Полученные данные позволяют определить наиболее рациональные значения основных параметров устройства для получения смесей газов заданного процентного состава барботажного типа.

4. Перспективы дальнейшего развития в данном направлении можно определить следующим образом:

- с учетом полученных наиболее рациональных значений основных параметров устройства для смешивания газов необходимо разработать его экспериментальный макет;

- на экспериментальном макете провести уточнения ряда параметров, характеризующих процесс барботирования в условиях смешивания газов;

- разработать микропроцессорную систему управления устройством смешения газов барботажного типа с программным управлением, позволяющим за счет введения определенных поправочных коэффициентов (например, коэффициента, корректирующего различие в объемах пузырьков различных газов, связанное с разной плотностью смешиваемых газов) максимально приблизиться к задаваемому процентному соотношению газовых компонент в смеси.

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Сысоев Ю.А. Исследование возможности использования барботажного метода для создания смесей газов / Ю.А. Сысоев, Г.И. Костюк, А.Ю. Сысоев // Вісті Академії інженерних наук України: наук.-техн. та громадський часопис Президії Академії інженерних наук України. – Вип.3 (33). – К., 2009. – С. 245 – 252.

2. Таблицы физических величин: справ. / под ред. акад. И.К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.

3. Машиностроительные материалы: Краткий справочник / В.М. Раскатов, В.С. Чуенков, Н.Ф. Бессонова, Д.А. Вейс – М.: Машиностроение, 1980. – 511с.

4. Справочник по элементарной физике / Н.И. Кошкин, М.Г. Ширкевич. – М.: Наука, 1972. – 256 с.

5. Садковская И.В. Разработка и исследование лазерного интерференционного жидкостного манометра высшей точности с целью повышения уровня обеспечения единства измерений низкого абсолютного давления: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.11.15 / Садковская Ирина Владимировна; С.-Петербур. гос. ун-т. – СПб., 2006. – 21 с.

6. Физическая энциклопедия / Гл. ред. А.М. Прохоров. – М.: Сов. энциклопедия: в 5 т. – 1988. – Т.1. – 704 с.