

## ОБЪЕМОМЕТРИЧЕСКИЙ БАРБОТАЖНЫЙ ПРИНЦИП ИЗМЕРЕНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖИДКОСТИ

М.Н. Баршутина, М.М. Козадаева, М.М. Мордасов

*ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет». г. Тамбов*

*Рецензент В.Ф. Першин*

**Ключевые слова и фразы:** вязкость; жидкость; плотность; поверхностное натяжение; принцип измерения.

**Аннотация:** Проведены теоретические и экспериментальные исследования влияния вязкости, плотности и поверхностного натяжения на объем пузырька, образующегося на срезе газоподводящей трубки. Рассмотрены метод совокупного измерения плотности и поверхностного натяжения, а также метод измерения вязкости при малой глубине погружения газоподводящей трубки. Осуществлены оценки точности предлагаемых объемометрических барботажных методов.

В настоящее время существует большое количество различных методов контроля физико-химических свойств жидкости, среди которых особое место занимают пневматические методы [1, 2] из-за их простоты, пожаро- и взрывобезопасности, невысокой стоимости и надежности. Одна из групп таких методов базируется на объемометрическом барботажном принципе измерения, заключающемся в определении основных параметров жидкости по измеренному значению объема пузырьков, образующихся на срезе газоподводящей трубки.

Объемометрические барботажные методы, основанные на указанном принципе, могут быть использованы для контроля таких параметров, как плотность  $\rho_{ж}$ , поверхностное натяжение  $\sigma_{ж}$  и вязкость  $\eta_{ж}$  жидкости. Преимуществом объемометрических барботажных методов является возможность измерений при малой глубине погружения измерительного элемента в контролируемую жидкость, тогда как при использовании классических барботажных методов для достижения высокой точности результата требуется глубина погружения более 1 м.

---

Баршутина М.Н. – аспирант кафедры «Автоматизированные системы и приборы» ТамбГТУ; Козадаева М.М. – магистрант кафедры «Автоматизированные системы и приборы» ТамбГТУ; Мордасов М.М. – доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизированные системы и приборы» ТамбГТУ, г. Тамбов.

В основе барботажных объемметрических методов лежат зависимости, связывающие отрывной объем пузырька  $V_{от}$  с физико-химическими свойствами жидкости (плотностью, поверхностным натяжением и вязкостью), которые были получены в результате экспериментальных и теоретических исследований процессов, протекающих в газожидкостной системе при образовании пузырька.

В процессе формирования газового пузырька можно выделить несколько этапов. На начальном этапе при подаче газа в трубку на ее срезе образуется пузырек, форма которого изменяется от сферического сегмента до сферы объемом  $V$ . При дальнейшей подаче газа объем пузырька растет вплоть до достижения им равновесного значения  $V_0$ , при котором подъемная сила становится равной силам, препятствующим отрыву пузырька, и начинается его подъем над срезом трубки. В этот момент между пузырьком и трубкой образуется газовая перемычка, через которую газ продолжает поступать в пузырек, что приводит к дальнейшему его росту. При достижении пузырьком отрывного объема  $V_{от}$ , перемычка рвется, и пузырек начинает свободно подниматься в жидкости.

В описанном выше процессе образования пузырька проявляются два характерных объема  $V_0$  и  $V_{от}$ . Первый – это объем, при котором пузырек начинает приподниматься над срезом трубки и при котором подъемная сила находится в равновесии с другими силами. Второй характерный объем – объем отрыва, который идентичен окончательному объему пузырька. Разница между  $V_0$  и  $V_{от}$  определяется количеством газа  $\Delta V$ , поступившим в пузырек во время существования перемычки, следовательно, для отрывного объема справедливо следующее равенство

$$V_{от} = V_0 + \Delta V. \quad (1)$$

Для маловязких жидкостей ( $\eta_{ж} < 2 \cdot 10^{-3}$  Па·с) можно считать, что  $V_{от} = V_0$ , так как время существования газовой перемычки очень мало и объемом газа  $\Delta V$ , поступившим через нее в пузырек, можно пренебречь.

В момент достижения отрывного объема на пузырек действуют следующие силы [3]:

– подъемная сила  $F_a = V_{от}(\rho_{ж} - \rho_{г})g$  ;

– сила трения  $F_{\eta} = \frac{c\pi\vartheta_0^2\rho_{ж}r_0^2}{2}$  ;

– сила поверхностного натяжения  $F_{\sigma} = \pi d_0\sigma_{ж}$  ;

– сила инерции  $F_i = (d/dt)(M_0\vartheta_0)$  ,

где  $\rho_{г}$  – плотность газа;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $d_0$  – диаметр выходного отверстия трубки;  $\vartheta_0$  – скорость центра пузырька радиусом  $r_0$  и объемом  $V_{от}$ ;  $M_0$  – ускоренная масса к моменту объема  $V_{от}$ ;  $t$  – время;

$c = \frac{24}{Re} + \frac{4}{\sqrt{Re}} + 0,4$  – коэффициент пропорциональности [3];  $Re = \frac{2r_0\vartheta_0\rho_{ж}}{\eta_{ж}}$  – число Рейнольдса.

Величина  $V_{от}$  как функция контролируемых параметров ( $\rho_{ж}$ ,  $\sigma_{ж}$ ,  $\eta_{ж}$ ) может быть найдена на основании уравнения, описывающего состояние равновесия всех указанных сил

$$F_a = F_{\sigma} + F_{\eta} + F_{и}. \quad (2)$$

Подставляя в (2) значения соответствующих сил, с учетом того, что при малом расходе газа  $Q$ , влияние силы инерции на формирование пузырька газа пренебрежимо мало, получим

$$V_{от} g (\rho_{ж} - \rho_{г}) = \pi \sigma_{ж} d_0 + \frac{c \pi \vartheta_0^2 \rho_{ж} r_0^2}{2}. \quad (3)$$

При использовании маловязких жидкостей ( $\eta_{ж} < 2 \cdot 10^{-3}$  Па·с) сила трения  $F_{\eta}$  настолько мала, что ее влиянием на процесс образования пузырька можно пренебречь, зависимость  $V_{от}$  от  $\rho_{ж}$  и  $\sigma_{ж}$  примет вид

$$V_{от} g (\rho_{ж} - \rho_{г}) = \pi \sigma_{ж} d_0. \quad (4)$$

При подаче газа в трубку с постоянным расходом  $Q$  мерой отрывного объема  $V_{от}$  может служить частота следования пузырьков  $f$ , тогда величина  $V_{от}$  находится по формуле

$$V_{от} = \frac{Q}{f}. \quad (5)$$

Учитывая, что избыточное давление внутри пузырька в процессе его роста изменяется по закону [4]

$$P_{и}(r_0) = \rho_{ж} g H + \frac{2\sigma_{ж}}{r_0} + P_0 \quad (6)$$

и принимает максимальное значение при  $r_0 = d_0 / 2$ , выражение для нахождения максимального давления в пузырьке  $P_{и}$  можно записать в следующем виде

$$P_{и} = \rho_{ж} g H + \frac{4\sigma_{ж}}{d_0} + P_0. \quad (7)$$

Уравнения (4) и (7) образуют систему, решая которую относительно  $\rho_{ж}$  и  $\sigma_{ж}$ , получим выражения для определения плотности и поверхностного натяжения по измеренным значениям  $P_{и}$  и  $f$ :

$$\rho_{ж} = \frac{K_1 (P_{и} - P_0)}{1/f + K_2}, \quad (8)$$

$$\sigma_{ж} = (P_{и} - P_0) \left( K_3 - \frac{K_4}{1/f + K_2} \right), \quad (9)$$

где  $K_1 = \frac{\pi d_0^2}{4Qg}$ ,  $K_2 = \frac{H \pi d_0^2}{4Q}$ ,  $K_3 = \frac{d_0}{4}$ ,  $K_4 = \frac{\pi d_0^3 H}{16Q}$  – коэффициенты пропорциональности при  $d_0, Q, H = \text{const}$ .

Уравнения (8) и (9) положены в основу барботажного объемметрического метода совокупного контроля плотности и поверхностного натяжения маловязких жидкостей. Этот метод позволяет повысить точность измерения плотности при малой глубине погружения измерительного элемента в контролируемую жидкость и учесть влияние  $\rho_{\text{ж}}$  на результат измерения  $\sigma_{\text{ж}}$  [5].

Экспериментальная проверка метода доказала его эффективность при измерении плотности маловязких жидкостей. При этом относительная погрешность измерения не превысила 2,2 %.

Экспериментальные исследования показали, что с увеличением вязкости погрешность измерения  $\rho_{\text{ж}}$  и  $\sigma_{\text{ж}}$  резко возрастает. Так, например, для оливкового масла ( $\eta_{\text{ж}} = 90 \cdot 10^{-3}$  Па·с) относительная погрешность измерения плотности и поверхностного натяжения составляет 8 %, а для глицерина ( $\eta_{\text{ж}} = 1393 \cdot 10^{-3}$  Па·с) – 60 %. Это обусловлено ростом влияния сил вязкого трения  $F_{\eta}$  на равновесный объем пузырька, а также отклонением отрывного объема от равновесного вследствие дополнительного притока воздуха в пузырек через газовую перемычку, образующуюся между срезом трубки и пузырьком в момент его отрыва.

При больших значениях  $\eta_{\text{ж}}$ , когда силами вязкого трения  $F_{\eta}$  нельзя пренебречь, для определения отрывного объема  $V_{\text{от}}$  как функции  $\rho_{\text{ж}}$ ,  $\sigma_{\text{ж}}$ ,  $\eta_{\text{ж}}$  используется уравнение (3). Принимая, что центр пузырька движется равномерно и пузырек газа отрывается от газоподводящей трубки, когда расстояние между центром пузырька и концом трубки становится равным  $2r_0$  [3], скорость перемещения центра пузырька определяется уравнением

$$v_0 = \frac{2r_0}{T_n}, \quad (10)$$

где  $T_n$  – период формирования пузырька газа, с.

Подставляя (10) в (3), при условии,  $\rho_{\text{ж}} \gg \rho_{\text{г}}$ ,  $r_0 = \sqrt[3]{\frac{3V_{\text{от}}}{4\pi}}$ , после элементарных преобразований, получим

$$14,508V_{\text{от}}^{\frac{2}{3}}T_n^{-1}v_{\text{ж}} + 3V_{\text{от}}T_n^{-\frac{3}{2}}v_{\text{ж}}^2 + 0,372V_{\text{от}}^{\frac{4}{3}}T_n^{-2} - gV_{\text{от}} + \pi d_0 \sigma_{\text{ж}} \rho_{\text{ж}}^{-1} = 0, \quad (11)$$

где  $v_{\text{ж}} = \frac{\eta_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}}}$  – кинематическая вязкость жидкости, м<sup>2</sup>/с.

С учетом того, что отрывной объем пузырька определяется по формуле

$$V = QT_n, \quad (12)$$

уравнение (11) можно представить в виде

$$k_1 T_n^{-\frac{1}{3}} v_{\text{ж}} + k_2 T_n^{-\frac{1}{2}} v_{\text{ж}}^2 + k_3 T_n^{-\frac{2}{3}} - k_4 T_n + k_5 = 0, \quad (13)$$

где  $k_1 = 14,508Q^{\frac{2}{3}}$ ,  $k_2 = 3Q$ ,  $k_3 = 0,372Q^{\frac{4}{3}}$ ,  $k_4 = gQ$ ,  $k_5 = \pi d_0 \sigma_{\text{ж}} \rho_{\text{ж}}^{-1}$  – коэффициенты пропорциональности.

Уравнение (13) положено в основу барботажного объемметрического метода контроля кинематической вязкости при малой глубине погружения газоподводящей трубки. Экспериментальная проверка метода доказала его эффективность при измерении кинематической вязкости жидкости в диапазоне  $(4,68...23,86) \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>/с. При этом относительная погрешность измерения не превысила 2,5 %.

#### *Список литературы*

1. Пневматические методы измерения вязкости жидких сред / М.М. Мордасов, Ю.Ф. Мартемьянов, В.И. Гализдра, А.А. Тышкевич. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2001.– 19 с. – Деп. в ВИНТИ г. Москва 24.04.2001, №1079.
2. Контроль плотности жидких веществ пневмометрическими методами / М.М. Мордасов, С.В. Мищенко, Д.М. Мордасов, А.А. Тышкевич // Заводская лаборатория. – 1998. – Т. 64, № 7. – С. 31–37.
3. Klaus Ruff, Bildung von Gasblasen an Dusen bei konstantem Volumendurchsatz / Klaus Ruff // Chemie Ing. Techn. – 1972. – No. 24. – S. 1360–1366.
4. Лаптев, В.И. Барботажно-пьезометрические методы контроля физико-химических свойств жидкостей / В.И. Лаптев. – М. : Энергоиздат, 1984. – 79 с.
5. Баршутина, М.Н. Пневматический метод совокупного контроля плотности и поверхностного натяжения жидкости / М.Н. Баршутина, Д.М. Мордасов, М.М. Мордасов // Заводская лаборатория. – 2007. – № 9. – С. 50–52.

---

### **Volume Metric Barbotage Principle of Measuring Physical and Chemical Properties of Liquid**

**M.N. Barshutina, M.M. Kozodaeva, M.M. Mordasov**

*Tambov State Technical University, Tambov*

**Key words and phrases:** viscosity; liquid; density; surface tension; measuring principle.

**Abstract:** Theoretical and experimental research into the effect of viscosity, density and surface tension on the volume of bubble formed at the edge of gas-feeding tube is carried out. The method of combined measurement of density and surface tension as well as the method of measurement of viscosity under shallow depth of gas-feeding tube immersion are studied. The evaluation of the accuracy of the proposed volume-metric barbotage methods is completed.

---

© М.Н. Баршутина, М.М. Козадаева, М.М. Мордасов, 2008