

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 ΔV , 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 ΔV , 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; ϑ_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_{η} 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 $\rho_{ж}$ на результат измерения $\sigma_{ж}$ [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 $\rho_{ж}$ и $\sigma_{ж}$ резко возрастает. Так, например, для оливкового масла ($\eta_{ж} = 90 \cdot 10^{-3}$ Па·с) относительная погрешность измерения плотности и поверхностного натяжения составляет 8 %, а для глицерина ($\eta_{ж} = 1393 \cdot 10^{-3}$ Па·с) – 60 %. Это обусловлено ростом влияния сил вязкого трения F_{η} 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 $\eta_{ж}$, когда силами вязкого трения F_{η} нельзя пренебречь, для определения отрывного объема $V_{от}$ как функции $\rho_{ж}$, $\sigma_{ж}$, $\eta_{ж}$ 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, $\rho_{ж} \gg \rho_{г}$, $r_0 = \sqrt[3]{\frac{3V_{от}}{4\pi}}$, после элементарных преобразований, получим

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

где $v_{ж} = \frac{\eta_{ж}}{\rho_{ж}}$ – кинематическая вязкость жидкости, м²/с.

С учетом того, что отрывной объем пузырька определяется по формуле

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

уравнение (11) можно представить в виде

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

где $k_1 = 14,508Q^{\frac{2}{3}}$, $k_2 = 3Q$, $k_3 = 0,372Q^{\frac{4}{3}}$, $k_4 = gQ$, $k_5 = \pi d_0 \sigma_{ж} \rho_{ж}^{-1}$ – 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 $(4,68...23,86) \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$. 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