

МОДИФИКАЦИЯ БАРБОТАЖНОГО ОБЪЕМОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ ПЛОТНОСТИ И ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ

Существует большое количество методов, позволяющих с высокой точностью определять плотность и поверхностное натяжение жидкости в различных промышленных условиях, в том числе в условиях потенциально опасных производств. Среди них можно выделить барботажный объемметрический метод совокупного контроля плотности $\rho_{ж}$ и поверхностного натяжения $\sigma_{ж}$ жидкости, который позволяет осуществлять одновременные измерения $\rho_{ж}$ и $\sigma_{ж}$ в малых объемах контролируемой жидкости и благодаря учету их взаимного влияния значительно повышает точность измерений [1]. Сущность метода заключается в определении $\rho_{ж}$ и $\sigma_{ж}$ по измеренным значениям максимального давления P_u в газоподводящей трубке и количества пузырьков n , поступивших в жидкость в результате подачи в трубку газа объемом V_0 . При этом $\rho_{ж}$ и $\sigma_{ж}$ определяются по формулам:

$$\rho_{ж} = \frac{K_1(P_u - P_0)}{1/n + K_2}; \quad (1)$$

$$\sigma_{ж} = (P_u - P_0) \left(K_3 - \frac{K_4}{1/n + K_2} \right), \quad (2)$$

где $K_1 = \frac{\pi d_0^2}{4V_0 g}$, $K_2 = \frac{H \pi d_0^2}{4V_0}$, $K_3 = \frac{d_0}{4}$, $K_4 = \frac{\pi d_0^3 H}{16V_0}$ – коэффициенты;

d_0 – диаметр газоподводящей трубки; P_0 – избыточное давление над поверхностью жидкости; g – ускорение свободного падения; H – глубина погружения трубки.

В ходе экспериментальных исследований влияния конструктивных параметров измерительного устройства, реализующего барботажный объемметрический метод, на точность измерений было установлено, что с увеличением угла наклона газоподводящей трубки α изменяется число поступивших в жидкость пузырьков n и, соответственно, растет дополнительная погрешность измерения. Это обусловлено изменением силы адгезии пузырька $F_{\sigma} = \pi \sigma_{ж} d_0 \sin \theta$ к поверхности среза вследствие возникновения гистерезиса краевого угла смачивания θ [2]. При $\alpha = 0$ краевой угол из-за образования перемычки между срезом трубки и пузырьком равен 90° , а сила адгезии находится по формуле

$$F_{\sigma} = \pi \sigma_{ж} d_0. \quad (3)$$

При наклоне трубки происходит деформация отрывающегося от ее поверхности пузырька и краевой угол по периметру смачивания пузырька приобретает различные значения (рис. 1). Краевой угол верхней части пузырька, соответствующий направлению возможного его перемещения, называют обычно наступающим краевым углом и обозначают через θ_A . Краевой угол нижней части пузырька называют отступающим и обозначают через θ_R .

Различие краевых углов смачивания θ_A и θ_R вносит изменения в величину силы адгезии. С учетом наступающего и отступающего краевых углов выражение для F_{σ} примет вид [2]:

$$F_{\sigma} = \pi \sigma_{ж} d_0 \frac{\sin \theta_A + \sin \theta_R}{2}. \quad (4)$$

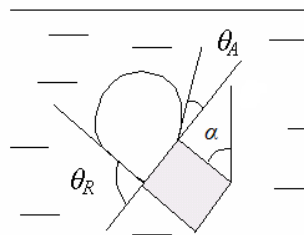


Рис. 1. Гистерезис краевого угла смачивания при наклоне газоподводящей трубки на угол α

Сравнивая (3) и (4), можно сделать вывод, что отклонение угла наклона трубки от 0 приводит к уменьшению силы адгезии в K раз, где $K = \frac{2}{\sin \theta_A + \sin \theta_R}$ – коэффициент пропорциональности, зависящий от угла наклона газоподводящей трубки α .

Так как количество пузырьков n и сила адгезии F_{σ} связаны соотношением [1]

$$\frac{V_0}{n} g (\rho_{ж} - \rho_{г}) = F_{\sigma}, \quad (5)$$

то при $V_0, g, \rho_{ж}, \rho_{г} = \text{const}$ уменьшение F_{σ} в K раз приводит к увеличению n , соответственно, в K раз. Учитывая это, уравнения (1) и (2) для случая с наклонной трубкой можно преобразовать к виду:

$$\rho_{ж} = \frac{K_1(P_u - P_0)}{\frac{\sin \theta_A + \sin \theta_R}{2} \frac{1}{n} + K_2}; \quad (6)$$

$$\sigma_{ж} = (P_u - P_0) \left(K_3 - \frac{K_4}{\frac{\sin \theta_A + \sin \theta_R}{2} \frac{1}{n} + K_2} \right), \quad (7)$$

где $K_1 = \frac{\pi d_0^2}{4V_0 g}$, $K_2 = \frac{H \pi d_0^2}{4V_0}$, $K_3 = \frac{d_0}{4}$, $K_4 = \frac{\pi d_0^3 H}{16V_0}$.

Для определения $\rho_{ж}$ и $\sigma_{ж}$ по формулам (6) и (7) необходимо дополнительное измерение наступающего θ_A и отступающего θ_R краевых углов смачивания. Наиболее простым методом определения θ_A и θ_R является фотографический метод [2], при котором на снимке проекции пузырька проводят касательную в точке пересечения контура пузырька со срезом трубки и измеряют угол наклона этой касательной (рис. 2).

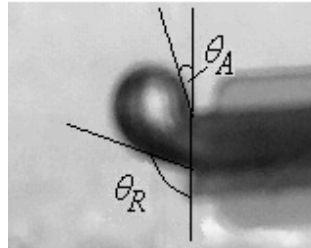


Рис. 2. Определение θ_A и θ_R фотографическим методом при $\alpha = 90^\circ$

Для оценки влияния угла наклона трубки α на коэффициент пропорциональности K , характеризующий силу адгезии, был проведен ряд экспериментов, в ходе которых определялись значения K для нескольких жидкостей при $\alpha = 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180^\circ$. Значения остальных параметров измерительного устройства в ходе эксперимента оставались неизменными. Полученные результаты свидетельствуют о том, что значение коэффициента K , характеризующего угол наклона трубки α , можно считать постоянным для всех маловязких жидкостей ($\eta_{ж} < 2 \cdot 10^{-3}$ Па · с) при условии, что материал газоподводящей трубки, ее диаметр и глубина погружения остаются неизменными. Для измерительной установки, использованной в ходе эксперимента, коэффициент K для углов $\alpha = 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180^\circ$ принимает соответствующие значения 1,00; 1,27; 1,60; 2,00; 1,50; 1,23; 1,00.

Постоянство коэффициента K для различных жидкостей позволяет определять $\rho_{ж}$ и $\sigma_{ж}$ по формулам (6) и (7) при различных углах наклона α без дополнительного измерения наступающего θ_A и отступающего θ_R краевых углов смачивания, принимая, что

$$\frac{\sin \theta_A + \sin \theta_R}{2} = \frac{1}{K}. \quad (8)$$

Увеличение числа пузырьков n при изменении угла наклона трубки α может быть рассмотрено как возможность создания модифицированного барботажного объемметрического метода, позволяющего повысить точность контроля плотности и поверхностного натяжения жидкости за счет уменьшения методической погрешности измерения числа пузырьков, величина которой обратно пропорциональна n .

Как следует из полученных данных, число пузырьков n достигает максимальной величины при $\alpha = 90^\circ$, а коэффициент пропорциональности при $\alpha = 90^\circ$ принимает значение $K = 2$, при котором формулы (6) и (7) с учетом (8) примут вид:

$$\rho_{ж} = \frac{K_1(P_u - P_0)}{0,5 \cdot n^{-1} + K_2}; \quad (9)$$

$$\sigma_{ж} = (P_u - P_0) \left(K_3 - \frac{K_4}{0,5 \cdot n^{-1} + K_2} \right). \quad (10)$$

Уравнения (9) и (10) позволяют рассчитать значения $\rho_{ж}$ и $\sigma_{ж}$ по измеренным P_u и n без дополнительного определения θ_A и θ_R при наклоне трубки $\alpha = 90^\circ$, когда погрешность измерения числа пузырьков n минимальна.

Экспериментальная проверка барботажного объемметрического метода и его модификации показала, что изменение угла наклона α газоподводящей трубки с 0 до 90° позволяет уменьшить относительную погрешность измерения плотности $\rho_{ж}$ с 3,9 до 1,7 %, а погрешность измерения поверхностного натяжения $\sigma_{ж}$ – с 3,0 до 0,9 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баршутина, М.Н. Пневматический метод совокупного контроля плотности и поверхностного натяжения жидкости / М.Н. Баршутина, Д.М. Мордасов М.М. Мордасов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2007. – № 9. – С. 50 – 52.
2. Зимон, А.Д. Адгезия жидкости и смачивание / А.Д. Зимон. – М. : Химия, 1974. – 416 с.