

## ЭКСПРЕСС-КОНТРОЛЬ ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТЕЙ

М.М. Голосницкая, М.М. Мордасов

*Кафедра «Управление качеством и сертификация», ГОУ ВПО «ТГТУ»;  
lvlasha@yandex.ru*

*Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым*

**Ключевые слова и фразы:** вязкость; жидкость; измерительная трубка; пузырьковый метод; экспресс-контроль.

**Аннотация:** Проведены теоретические и экспериментальные исследования влияния вязкости на время формирования пузырька, образующегося в измерительной трубке после ее поворота на 180°. Рассмотрен экспресс-метод измерения вязкости жидкостей по времени формирования пузырька газа в измерительной трубке. Предложено устройство, реализующее разработанный пузырьковый экспресс-метод. Осуществлена оценка точности предлагаемого устройства.

---

Качество выпускаемой продукции и технологических процессов часто определяется вязкостью используемых и производимых веществ. Использование оперативных методов контроля вязкости жидкостей, обеспечивающих необходимую точность измерения, является одним из эффективных путей обеспечения качества. При проведении технологических операций окраски, пропитки, проклейки и других целесообразно проводить экспресс-контроль вязкости с использованием минимального объема пробы контролируемой жидкости простыми, надежными и дешевыми средствами. Этим требованиям отвечают пневматические пузырьковые методы [1–5].

Традиционно в пузырьковых методах о вязкости судят по времени подъема пузырька газа в контролируемой жидкости [1–5]. Использование в качестве информативного параметра времени формирования пузырька позволяет существенно сократить объем пробы и повысить оперативность контроля. Применение такого подхода в методах с подачей газа в пузырек (барботажные методы) рассмотрено в работах [3, 6]. Аналогично возможно модифицировать и пузырьковые методы без подачи газа, основанные на измерении времени подъема газового пузырька в измерительной трубке, например, метод Гарднера–Хольта [1, 5].

Далее рассмотрены физические особенности процессов, положенных в основу разработанного авторами пузырькового метода контроля вязкости без подачи газа, приведены результаты экспериментальных исследований, описаны конструкция и принцип действия устройства для реализации метода.

Сущность метода измерения вязкости заключается в том, что вертикально расположенную трубку, заполненную контролируемой жидкостью до заданного уровня, переворачивают в вертикальной плоскости на 180° и измеряют интервал времени с момента поворота трубки до момента формирования в ней пузырька газа, который определяется заполнением жидкостью основания трубки. По измененному значению интервала времени судят о вязкости.

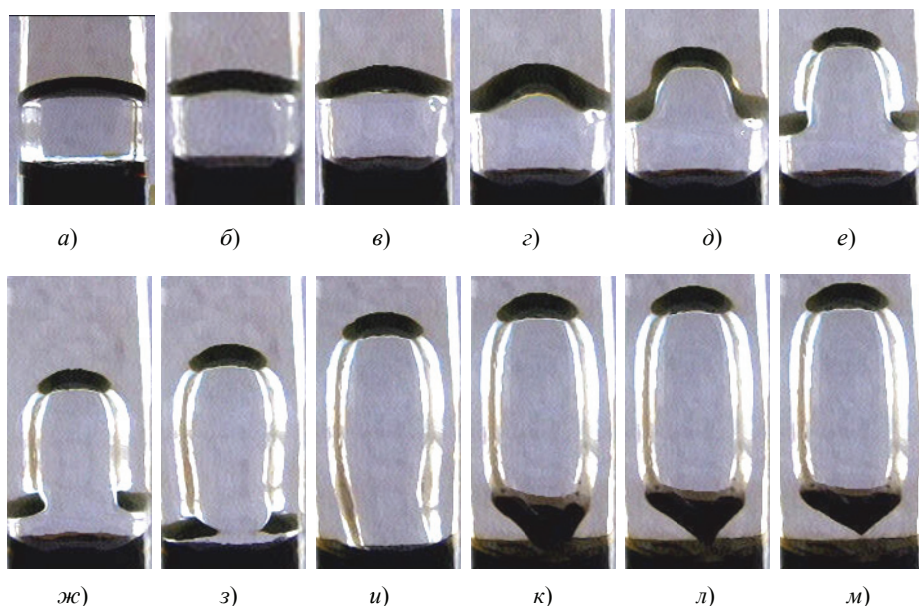
На рис. 1 представлены фотографии процесса формирования пузырька газа в стеклянной трубке в различные моменты времени  $t$  после поворота.

Под действием сил поверхностного натяжения жидкость перемещается к стенке трубки. Форма поверхности раздела газовой и жидкой фаз непосредственно после поворота трубки показана на рис. 1, *а*. Гидростатическое давление на поверхность раздела фаз у стенки трубки больше, чем по центру на величину

$$\Delta P = \rho g \Delta h,$$

где  $\rho$  – плотность жидкости,  $\text{кг/м}^3$ ;  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ ;  $\Delta h$  – разность уровней жидкости у стенки и по центру трубки, м. Разность давлений  $\Delta P$  усиливает приток жидкости к стенке трубки (рис. 1, *б*, *в*). Происходит процесс замещения жидкости газом, сопровождаемый стеканием жидкости по стенке трубки и ростом  $\Delta h$  (рис. 1, *г-и*). После достижения жидкостью основания трубки (рис. 1, *и*), она устремляется к центру (рис. 1, *и-л*). Площадь контакта газа с основанием трубки уменьшается и в некоторый момент времени контакт газовой фазы с твердым основанием исчезает (рис. 1, *л*). Начинается подъем сформированного пузырька в трубке. Действие силы вязкого трения заключается в создании сопротивления течению жидкости между стенкой (дном) трубки и поверхностью раздела фаз.

Теоретическое описание процессов, возникающих в системе «пузырек газа–жидкость» после поворота измерительной трубки, представляет собой трудную задачу. Поэтому, с целью выбора конструктивных и режимных параметров измерительного устройства были проведены экспериментальные исследования, в ходе которых использованы: термокамера ТВТ-1, эпоксидная смола ЭД-20 при температуре 12...28 °С, стеклянные измерительные трубки диаметрами  $d$  равными 0,0065; 0,0080; 0,0085; 0,01025 м. Плотность жидкости определялась пикнометрическим методом [7], вязкость – при помощи ротационного вискозиметра типа «Реотест-2».



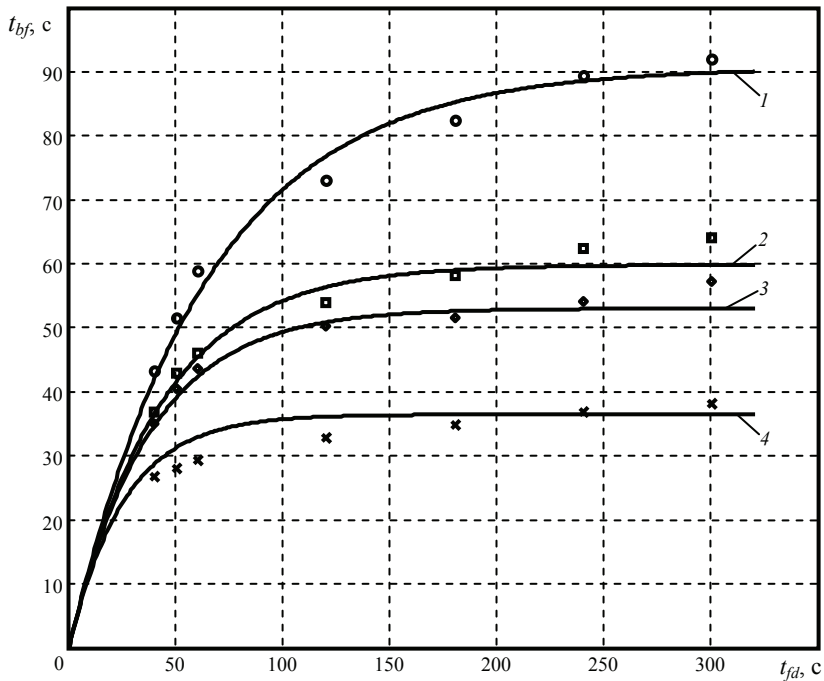
**Рис. 1. Процесс формирования пузырька газа в измерительной трубке при  $t$ , с:**  
*а* – 0; *б* – 1; *в* – 2; *г* – 5; *д* – 10; *е* – 15; *ж* – 20; *з* – 25; *и* – 30; *к* – 34; *л* – 35; *м* – 35,1

В результате исследований было установлено, что время формирования пузырька газа зависит от диаметра измерительной трубки и объема воздуха в ней. Большое влияние на процесс формирования пузырька оказывает состояние стенок измерительной трубки. Целесообразно проводить измерения в трубке с предварительно смоченными стенками. Смачивание осуществляется путем поворота измерительной трубки на  $180^\circ$ , приводящего к формированию, отрыву и подъему пузырька газа. Как только пузырек газа достигает верхнего основания трубки, начинается процесс стекания жидкости, оставшейся на стенках. Толщина слоя жидкости на стенках измерительной трубки зависит от выдержки по времени величиной  $t_{fd}$ . От толщины слоя, в свою очередь, зависит время  $t_{bf}$  формирования пузырька газа.

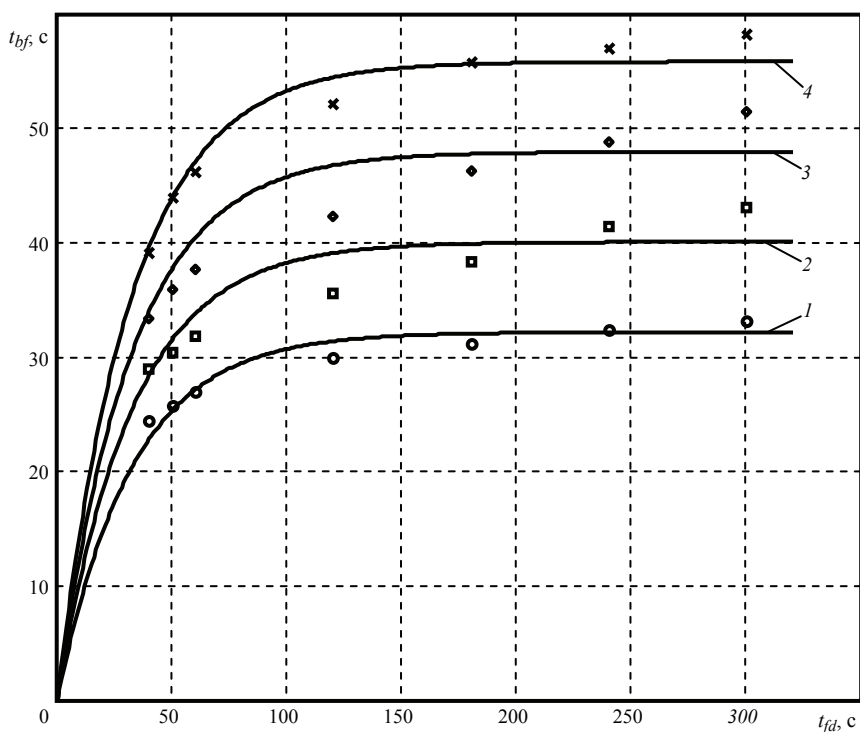
На рис. 2 и 3 представлены зависимости времени  $t_{bf}$  формирования пузырька газа от времени  $t_{fd}$  стекания жидкости для эпоксидной смолы ЭД-20 с вязкостью  $\eta = 28,3$  Па·с при различных диаметрах  $d$  измерительной трубки и высотах  $H$  столба воздуха. Линии на графиках являются результатом аппроксимации экспериментальных данных функцией

$$t_{bf}(t_{fd}, H, d) = a_1 \frac{(H + H_0)}{d^2} \left( 1 - e^{-\frac{t_{fd} d^2}{a_2}} \right), \quad (1)$$

где  $a_1 = 0,212$  м·с;  $a_2 = 0,0027$  м<sup>2</sup>·с и  $H_0 = 0,011$  м – коэффициенты. Графики, представленные на рис. 3, построены при значении  $a_2 = 0,0034$  м<sup>2</sup>·с.



**Рис. 2.** Зависимость времени  $t_{bf}$  формирования пузырька газа от времени  $t_{fd}$  стекания жидкости при  $H = 0,007$  м:  
1–4 – диаметр измерительной трубки  $d$  равен 0,0065; 0,0080; 0,0085; 0,01025 м соответственно



**Рис. 3. Зависимость времени  $t_{bf}$  формирования пузырька газа от времени  $t_{fa}$  стекания жидкости при  $d = 0,01025$  м:**

1–4 – высота  $H$  столба воздуха равна 0,005; 0,009; 0,013; 0,017 м соответственно

Из графиков, представленных на рис. 2 и 3 видно, что при времени  $t_{fa}$  стекания большем 200 с время  $t_{bf}$  формирования пузырька газа изменяется незначительно. Исходя из этого, для вязкости  $\eta$  не более 30 Па·с время стекания целесообразно выбирать равным 300 с.

Диаметр  $d$  измерительной трубки следует выбирать наибольшим из возможных, так как это способствует уменьшению погрешности, обусловленной влиянием поверхностного натяжения  $\sigma$  контролируемой жидкости на результат измерения. Коррекция такого влияния осуществляется введением поправки, которая определяется экспериментально.

Во время заполнения измерительной трубки контролируемой жидкостью до заданного уровня нетрудно допустить значительные погрешности. Тем не менее, влияние высоты  $H$  столба воздуха на результат измерения значительно более слабое, чем влияние других величин. При малых значениях  $H$  даже большие относительные погрешности в заполнении измерительной трубки не приводят к существенному возрастанию погрешности измерения вязкости благодаря константе  $H_0$  (см. формулу (1)). Поэтому, учитывая зависимость объема пробы и габаритов устройства контроля вязкости от высоты  $H$ , целесообразно выбирать заданное значение этой величины минимальным. Авторами выбрано заданное значение высоты  $H$ , равным 0,007 м. Высота  $l$  измерительной трубки выбрана равной 0,025 м, так как при  $H = 0,007$  м максимальная высота пузырька в процессе измерения не превышает 0,021 м.

Методика измерения кинематической вязкости  $\nu$  по времени формирования пузырька газа постоянной массы включает в себя следующие этапы:

- заполнение измерительной трубки диаметром  $d$  и высотой  $l$  контролируемой жидкостью до заданного уровня  $l - H$  (рис. 4, а);
- первый поворот трубки на  $180^\circ$  и ее фиксация в вертикальном положении (рис. 4, б);
- второй поворот трубки на  $180^\circ$  в момент отрыва пузырька газа от дна трубки, начало счета времени  $t_{fd}$  стекания жидкости (рис. 4, в, з);
- третий поворот трубки на  $180^\circ$  после истечения заданного времени  $t_{fd}$ , начало счета времени  $t_{bf}$  формирования пузырька газа (рис. 4, з, д);
- окончание счета времени  $t_{bf}$  после формирования пузырька газа (рис. 4, д);
- определение кинематической вязкости  $\nu$  по измеренному значению времени  $t_{bf}$ .

На рис. 5 изображена схема устройства, реализующего пузырьковый метод контроля вязкости жидкостей. На валу исполнительного механизма 12, выполненного на базе шагового электродвигателя и установленного на основании 6, закреплена скоба 1. Стеклопая трубка 3 с контролируемой жидкостью закрыта

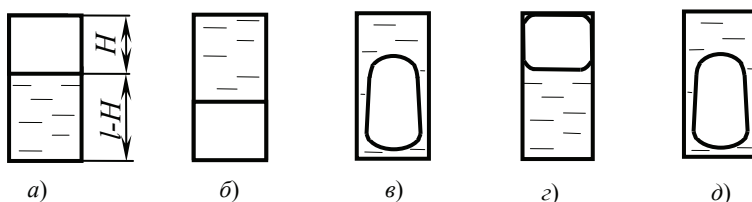


Рис. 4. Реализация метода измерения вязкости

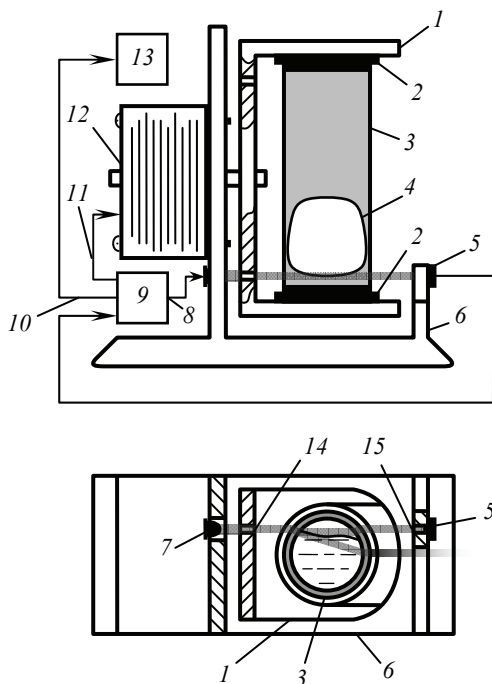


Рис. 5. Схема устройства для реализации экспресс-метода контроля вязкости жидкостей

пробками 2 и зажата в скобе 1, где имеются два отверстия 14, расположенные симметрично оси исполнительного механизма 12, а в основании 6 – отверстие 15. Через отверстия 14 и 15 излучение лазерного диода 7 типа DL-3148-235 проходит к поверхности фотоприемника 5 типа PIC-12043S.

После заполнения трубки 3 контролируемой жидкостью до заданного уровня и ее установки в скобу 1 запускают устройство контроля вязкости подачи на его вход питания. В исходный момент времени жидкостью заполнена нижняя часть трубки 3, а воздухом – верхняя (см. рис. 4, а). Управляющий вычислительный блок 9, выполненный на базе микроконтроллера типа PIC16F84A, формирует на выходе 11 сигналы, под действием которых исполнительный механизм 12 переворачивает скобу 1 с трубкой 3 (см. рис. 4, б). Для точной установки трубки 3 в вертикальное положение используется излучение лазерного диода 7, питание которого осуществляется от генератора высокой частоты (38 кГц), реализованного программно в блоке 9 на его выходе 8. При достижении вертикального положения излучение диода 7 проходит через отверстия 14, 15, трубку 3 и поступает на поверхность фотоприемника 5, в результате чего на его выходе формируется сигнал логического нуля  $U_5 = 0$ , под действием которого блок 9 останавливает исполнительный механизм 12.

Под действием силы тяжести жидкость стекает в нижнюю часть трубки 3, после заполнения которой излучение диода 7 отклоняется от отверстия 15 вследствие различия показателей преломления жидкости и воздуха (см. рис. 4, в; рис. 5). На выходе фотоприемника 5 формируется сигнал  $U_5 = 1$ , под действием которого управляющий вычислительный блок 9 посредством механизма 12 переворачивает скобу 1 с трубкой 3 на  $180^\circ$ . Угол поворота определяется числом импульсов, поданных на обмотки электродвигателя механизма 12. После поворота скобы 1 блок 9 выдерживает заданный интервал времени  $t_{fd}$  для стекания жидкости со стенок трубки 3 (см. рис. 4, з). Время  $t_{fd}$  выбирается пропорциональным времени смачивания стенок трубки (см. рис. 4, б, в). Это позволяет сократить выдержку при контроле жидкостей с малой вязкостью. Выдержкой заканчивается подготовка устройства к проведению измерений.

Под действием сигнала, поступающего с выхода 11 блока 9, исполнительный механизм 12 вновь переворачивает скобу 1 на  $180^\circ$ . Жидкость находится вверху трубки 3, воздух – внизу. На выходе фотоприемника 5 формируется сигнал  $U_5 = 0$ , так как наличие тонкой пленки жидкости на стенке трубки 3 не приводит к существенному отклонению лазерного луча. Жидкость стекает по смоченной стенке трубки 3 и формирует газовый пузырек 4 (см. рис. 4, д). После отрыва пузырька 4 от основания трубки 3 излучение диода 7 перестает поступать на поверхность фотоприемника 5, на его выходе формируется сигнал  $U_5 = 1$ , скоба 1 переворачивается на  $180^\circ$ . О вязкости жидкости судят по интервалу времени  $t_{bf}$  с момента установки трубки 3 в вертикальное положение до момента отрыва пузырька 4 от ее основания.

После поворота трубки 3 управляющий вычислительный блок 9 вновь выдерживает интервал времени  $t_{fd}$  для стекания жидкости со стенок трубки 3 (см. рис. 4, з). По завершении выдержки устройство готово к проведению повторных измерений.

Среднее арифметическое результатов многократных измерений, рассчитанное блоком 9, выводится на цифровую шкалу 13 путем формирования соответствующих сигналов на выходе 10.

Изменение диапазона измерения и чувствительности устройства возможно путем варьирования диаметра  $d$  измерительной трубки 3 и высоты  $H$  столба газа.

Результаты опробования и оценка погрешности устройства для контроля вязкости жидкостей по времени формирования пузырька газа постоянной массы приведены в таблице.

## Результаты опробования метода контроля вязкости

Действительные значения			Измеренные значения	Вычисленные значения		
плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	вязкость $\eta$ , Па·с	кинематическая вязкость $\nu$ , 10 <sup>-3</sup> м <sup>2</sup> /с	время $t_{bf}$ , с	кинематическая вязкость $\hat{\nu}$ , 10 <sup>-3</sup> м <sup>2</sup> /с	абсолютная погрешность $\Delta\nu$ , 10 <sup>-3</sup> м <sup>2</sup> /с	относительная погрешность, $\delta\nu$ , %
1134	120,3	106,1	177,1	110,9	4,8	4,5
1132	91,1	80,5	127,3	79,7	0,8	0,9
1130	66,2	58,6	91,7	57,4	1,1	2,0
1127	45,8	40,6	64,3	40,3	0,4	0,9
1124	28,3	25,2	38,2	23,9	1,3	5,0
1120	18,6	16,6	27,7	17,3	0,7	4,4
1116	10,7	9,59	16,0	10,0	0,4	4,5
1113	7,7	6,92	11,6	7,26	0,3	5,0

Примечания: – эксперименты проведены при  $H = 0,007$  м и  $d = 0,01025$  м;  
 – в каждом эксперименте выдержка по времени  $t_{fd}$  составляла 300 с;  
 – значения  $t_{bf}$  получены в ходе статистической обработки результатов десяти наблюдений, относительная погрешность не превышает 1 % при доверительной вероятности 0,95.

Значения кинематической вязкости вычислены по формуле

$$\hat{\nu} = k \frac{t_{bf} d^2}{H + H_0},$$

где  $k = 107,3$  м/с<sup>2</sup> – коэффициент пропорциональности.

Рассмотренный метод по сравнению с традиционными пузырьковыми методами измерения вязкости жидкостей без подачи газа [5] позволяет использовать меньший объем пробы контролируемой жидкости и повысить оперативность контроля. В результате экспериментальной проверки метода установлено, что относительная погрешность измерения кинематической вязкости в диапазоне  $(7...110) \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>/с не превышает 5 %.

### Список литературы

1. Барр, Г. Вискозиметрия / Г. Барр : под. ред. М.И. Усановича : пер. с англ. И.Л. Орестова, Б.Н. Усанович. – М.–Л. : Главредхимлит, 1938. – 280 с.
2. А.с. 525006 СССР, G01N 11/00. Барботажный вискозиметр / В.И. Лаптев. – № 2107954/25 ; заявл. 25.02.1975 ; опубл. 15.08.1976, Бюл. № 30. – 3 с.
3. Лаптев В.И. Барботажно-пьезометрические методы контроля физико-химических свойств жидкостей / В.И. Лаптев. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 79 с.
4. А.с. 1518723 СССР, G01N 11/00. Барботажный вискозиметр / М.М. Мордасов, В.И. Гализдра, Д.А. Дмитриев. – № 4375865/24-25 ; заявл. 08.02.1988 ; опубл. 30.10.1989, Бюл. № 40. – 3 с.
5. Gardner, H.A. Paint Testing Manuals: Physical and Chemical Examination of Paints, Varnishes, Lacquers, and Colors / H.A. Gardner, G.G. Sward. – 13<sup>th</sup> ed. – Luterville-Timonium : American Society for Testing and Materials, 1972. – 614 p.
6. Мордасов, М.М. Барботажный объемметрический метод контроля вязкости жидкостей / М.М. Мордасов, М.М. Козадаева, М.Н. Баршутина // Завод. лаборатория. Диагностика материалов. – 2008. – Т. 74, № 12. – С. 35–37.



7. ГОСТ 28513–90. Материалы лакокрасочные. Метод определения плотности. – Введ. 1992–01–01. – М. : Изд-во стандартов, 1990. – 8 с.

---

## Express Control of Liquids Viscosity

M.M. Golosnitskaya, M.M. Mordasov

*Department "Quality Control and Certification", TSTU;  
lvlasha@yandex.ru*

**Key words and phrases:** bubble method; express control; liquid; measuring tube; viscosity.

**Abstract:** The paper presents theoretical and experimental study of the effect of viscosity on the time of bubble formation in the measuring tube after its rotation by 180°. Express method of measuring viscosity of liquids at the time of gas bubbles formation in the measuring tube is considered. The paper proposes the device that implements the developed bubble express method. The accuracy of the proposed device is estimated.

---

## Express-Kontrolle der Flüssigkeitsviskosität

**Zusammenfassung:** Es sind die theoretischen und experimentellen Untersuchungen der Einwirkung der Viskosität auf die Zeit der Formierung der Blasé, die im Meßrohr nach seiner Umdrehung auf 180° gebildet wird, durchgeführt. Es ist die Express-Methode der Messung der Flüssigkeitsviskosität nach der Zeit der Formierung der Gasblasé im Meßrohr betrachtet. Es ist die Anlage, die die erarbeitete Blasenexpress-Methode realisiert, vorgeschlagen. Es ist die Einschätzung der Genauigkeit der vorschlagenden Anlage realisiert.

---

## Express-contrôle de la viscosité des liquides

**Résumé:** Sont citées les études théoriques et expérimentales de l'influence de la viscosité sur le temps de la formation de la bulle créée dans une tube de mesure après son revirement à 180°. Est examinée l'express-méthode de la mesure de la viscosité des liquides d'après le temps de la formation de la bulle créée dans une tube de mesure. Est proposé un dispositif réalisant l'express-méthode de bulle proposée. Est effectuée l'estimation de la précision du dispositif proposé.

---

**Авторы:** *Голосницкая Мария Михайловна* – аспирант кафедры «Управление качеством и сертификация»; *Мордасов Михаил Михайлович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Управление качеством и сертификация», ГОУ ВПО «ТГТУ».

**Рецензент:** *Чуриков Александр Алексеевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Управление качеством и сертификация», ГОУ ВПО «ТГТУ».

---