

УДК 667.63:532.137:303.723

*В.Ю. Крамаренко, А.В. Сергеева, Г.Д. Нескороженная*

## КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСЛОВНОЙ ВЯЗКОСТИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВОРОНОК С РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ СОПЛА

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

Работа посвящена определению простого способа пересчета времен истечения лакокрасочных материалов при использовании воронок с разными характеристиками выходных отверстий. С этой целью осуществлен анализ зависимостей кинематического коэффициента вязкости от значений времени истечения жидкостей для вискозиметра ВЗ-246 и воронок, которые используются в соответствии с международным стандартом ISO 2431. Показаны причины существенных различий в значениях времени истечения для воронок с различной геометрией сопел, даже в случае одинаковых значений объема вискозиметров и диаметра их капиллярной части. Для вискозиметра ВЗ-246, широко применяемого в отечественной практике, определены коэффициенты базового уравнения, которое используется согласно ISO 2431. Установлено, что это уравнение также может быть использовано для описания зависимостей времен истечения при использовании воронок с различной геометрией сопел. Построены номограммы и определены коэффициенты корреляционных зависимостей для различных типов вискозиметров. Анализ погрешностей, связанных с использованием предложенного подхода, свидетельствует об его пригодности в рамках значений повторяемости и воспроизводимости, установленных стандартом ISO 2431.

**Ключевые слова:** лакокрасочные материалы, вискозиметрия, условная вязкость, время истечения, корреляционный анализ.

**DOI:** 10.32434/0321-4095-2019-122-1-86-91

### *Введение*

Современное развитие лакокрасочной технологии Украины предусматривает переориентацию на использование международных стандартов при определении технических характеристик и свойств лакокрасочных материалов (ЛКМ) и покрытий на их основе. Несмотря на идентичность базовых принципов большинства методов анализа и технического контроля, приспособления и оборудование, которые используются в повседневной лабораторной практике, имеют определенные особенности. Вследствие этого, корректное сравнение данных, полученных при помощи различного оборудования, имеет большое значение во время переходного периода, поскольку переоборудование лабораторий требует определенных расходов и времени.

Для оценки реологических свойств ЛКМ,

относящихся к ньютоновским жидкостям, наиболее распространенным и простым лабораторным методом является определение так называемой «условной вязкости» или времени истечения материала из воронки с определенной геометрией основной части и выпускного отверстия (сопла). В мировой практике используется большое число воронок различного конструктивного исполнения. Обычно перерасчет времен истечения для различных воронок осуществляется при помощи соответствующих таблиц [1] или из зависимостей в координатах «время истечения» – «кинематический коэффициент вязкости», представленных в стандартах ГОСТ 8420-74 и ISO 2431:2011. Примечательно, что в международной практике подобные зависимости одновременно соответствуют универсальному уравнению [1–3], тогда как для распространенного в Украине вискозиметра ВЗ-246 значе-

ния констант этого уравнения не были определены. Решению этой задачи, а также нахождению простейшей корреляционной зависимости для пересчета времен истечения при использовании вискозиметров различного типа, посвящена предлагаемая работа.

**Теоретическая часть**

Теоретические подходы для пересчета времен истечения жидкостей из воронок в значении кинематического коэффициента вязкости основываются на известных законах и уравнениях гидродинамики. В общем случае рассматривается задача определения объема жидкости V, который проходит за время τ через трубопровод (капилляр) с известным радиусом R. В случае постоянного значения разности давлений, решение этой задачи соответствует известному уравнению Гагена-Пуазейля:

$$V = \frac{\pi \cdot \Delta P \cdot R^4}{8\eta \cdot l} \cdot \tau, \tag{1}$$

где ΔP – разность давлений в трубопроводе (капилляре) на длине l; η – динамический коэффициент вязкости.

При самопроизвольном истечении жидкости под действием силы гравитации, вследствие уменьшения высоты столба жидкости, эффективное значение параметра ΔP зависит от времени истечения. Этот эффект учитывается в задаче Бернулли введением параметра «динамического напора», или «динамического давления» в форме поправки Гагенбаха [2]:

$$V = \frac{\pi \cdot \left( \rho g \bar{h} - \frac{\rho w^2}{2} \right) \cdot R^4}{8\eta \cdot l} \cdot \tau, \tag{2}$$

где g – ускорение свободного падения; ρ – плотность жидкости;  $\bar{h}$  и w – усредненные значения высоты столба жидкости и ее скорости, соот-

ветственно.

С учетом простого соотношения между кинематическим (ν) и динамическим (η) коэффициентами вязкости:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}, \tag{3}$$

после математических преобразований уравнение зависимости η от времени истечения τ приобретает вид:

$$\nu = \frac{\pi \cdot g \bar{h} \cdot R^4}{8V \cdot l} \cdot \tau - \frac{V}{16\pi \cdot l \cdot \tau}. \tag{4}$$

Поскольку большинство параметров уравнения (4) являются постоянными величинами, связанными с геометрическими характеристиками воронок, конечное уравнение используют в форме:

$$\nu = A\tau - \frac{B}{\tau}, \tag{5}$$

где параметры A и B являются характеристическим константами для конкретного типа воронки [1–3] или капиллярного вискозиметра [4].

Во время калибровки или проверки воронок используются эталонные жидкости с известным значением кинематического коэффициента вязкости. Ожидаемое значение времени истечения для решения таких задач рассчитывается по уравнению:

$$\tau = \frac{\nu + \sqrt{\nu^2 - 4AB}}{2A}. \tag{6}$$

**Результаты и обсуждение**

*Конструкционные особенности воронок и регламентированные требования*

Вискозиметр ВЗ-246 и воронки, которые

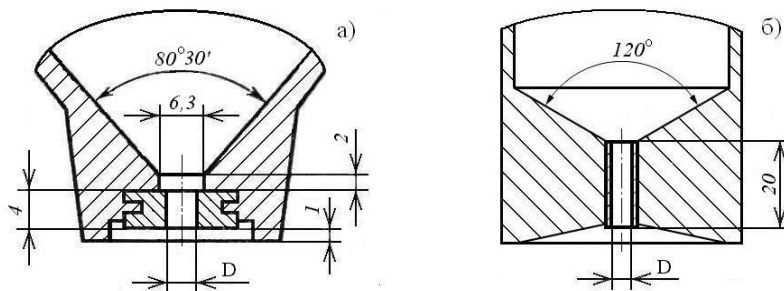


Рис. 1. Конструкционные особенности вискозиметра ВЗ-246 (а) и воронок, использующихся в соответствии со стандартом ISO 2431 (б)

используются в соответствии со стандартом ISO 2431, имеют одинаковые значения диаметра цилиндрической части (50 мм) и объема (100 см<sup>3</sup>), а также диаметров выходных отверстий в интервале 2–6 мм. Несколько различаются значения углов конусной части воронок, а также характеристики выходных отверстий (рис. 1).

Основные отличия связаны с тем обстоятельством, что стандарт ISO 2431 предполагает использование четырех отдельных воронок № 3, № 4, № 5 и № 6 с встроенными соплами высотой 20 мм, которые отличаются только диаметром, соответствующим номеру воронки. В конструкции ВЗ-246 предусмотрена возможность использования съемных сопел с диаметрами 2, 4, 6 мм и значением высоты 4 мм. Однако, вследствие необходимости крепления сопел, выходное отверстие имеет более сложную «Т»-образную конфигурацию, поскольку включает дополнительную стационарную шайбу с диаметром 6,3 мм и высотой 2 мм (рис. 1,а). Таким образом, суммарная высота выходного отверстия для ВЗ-246 составляет 6 мм, что приблизительно в три раза меньше по сравнению с аналогичным параметром воронок стандарта ISO 2431. Это обстоятельство является ключевым моментом, вследствие которого времена истечения при равном значении диаметров выходных отверстий будут существенно различаться для двух типов вискозиметров.

Согласно ISO 2431, выбор воронки с соответствующим диаметром  $D$ , осуществляется таким образом, чтобы время истечения в стандартных условиях определения находилось в интервале 30–100 с. Для ВЗ-246 этот регламентированный интервал зависит от диаметра сопла и составляет 20–300 с для  $D=2$  мм, 12–200 с для  $D=4$  мм и 20–200 с для  $D=6$  мм.

#### Корреляционный анализ

Значения параметров уравнения (5) для воронок, использующихся в соответствии со стандартом ISO 2431, представлены в табл. 1, а расчетные зависимости коэффициента кинематической вязкости от времени истечения изображены на рис. 2.

На рис. 3 представлены зависимости времени истечения от кинематического коэффициента вязкости для вискозиметра ВЗ-246.

В отличие от данных рис. 2, представление зависимостей для ВЗ-246 в логарифмических координатах приводит к неудобному и неточному определению значения  $\nu$  через определяемое время истечения или при решении обрат-

ной задачи.

Таблица 1

Параметры уравнения (5) для воронок стандарта ISO 2431

№ воронки	$D$ , мм	$A$ , мм <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>	$B$ , мм <sup>2</sup>
3	3	0,443	200
4	4	1,370	200
5	5	3,280	220
6	6	6,900	570

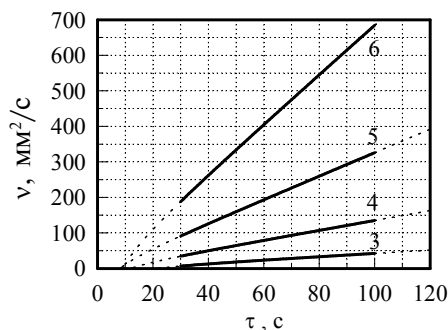


Рис. 2. Зависимость кинематического коэффициента вязкости от времени истечения при использовании воронок стандарта ISO 2431. Диаметры сопел указаны возле кривых

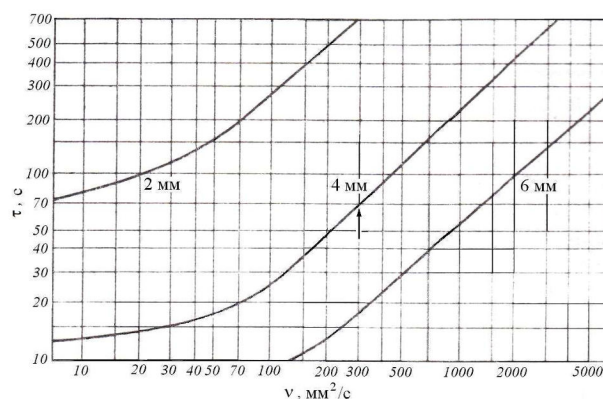


Рис. 3. Зависимость времени истечения от кинематического коэффициента вязкости для вискозиметра ВЗ-246. Диаметры сопел указаны возле кривых

Поэтому, для моделирования зависимостей в прямых координатах и нахождения констант уравнения (5), данные рис. 3 были переведены в числовую форму путем трех независимых определений (показано символами на рис. 4). Далее был осуществлен регрессионный анализ с определением параметров уравнения (5), значения которых представлены в табл. 2.

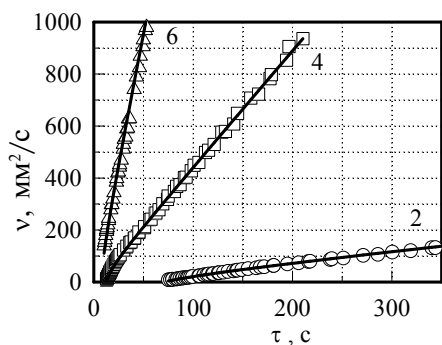


Рис. 4. Зависимость кинематического коэффициента вязкости от времени истечения при использовании ВЗ-246. Диаметры сопел (мм) указаны возле кривых

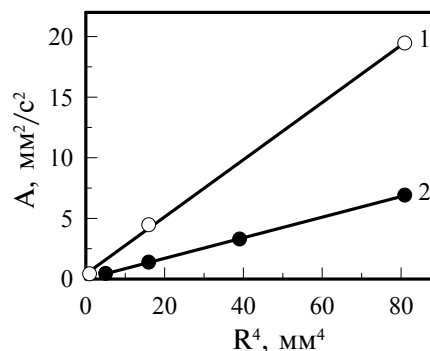


Рис. 5. Зависимость коэффициента А от радиуса сопла для различных типов вискозиметров: 1 – ВЗ-246; 2 – ISO 2431

Таблица 2

Параметры уравнения (5) для вискозиметра ВЗ-246

D, мм	A, мм <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>	B, мм <sup>2</sup>
2	0,410±0,001	2013±42
4	4,460±0,010	581±16
6	19,450±0,090	978±104

Сравнение данных рис. 2 и рис. 4, а также значений параметров уравнения (5) (табл. 1, 2), позволяет сделать следующие предварительные выводы. В рамках регламентированных условий воронки ISO 2431 предполагают их использование для жидкостей со значением кинематического коэффициента вязкости до 700 мм<sup>2</sup>/с. Для ВЗ-246 этот интервал несколько выше, однако, в соответствии с требованиями международного стандарта, становится очевидным, что использование сопла с диаметром 6 мм в ВЗ-246 является нецелесообразным, поскольку время вытекания наиболее вязких жидкостей ( $v \approx 700$  мм<sup>2</sup>/с) соответствует значению менее 40 с.

Сравнение и анализ зависимостей параметров А и В уравнения (5) от диаметра сопла для двух типов вискозиметров свидетельствует, что их абсолютные значения можно рассматривать как характеристики крутизны и кривизны зависимостей рис. 2 и 4, причем отклонение от линейности проявляется, только при небольших значениях  $\tau$ , что следует из уравнения (5).

Крутизна зависимости  $v(\tau)$  должна сильно зависеть от значения радиуса сопел вследствие пропорциональности  $A \sim R^4$  по уравнению (4). Как свидетельствуют данные на рис. 5, в таком представлении действительно наблюдается отличное спрямление со значениями угловых коэффициентов 0,236 для ВЗ-246 и 0,085 для ISO 2431.

Отличия в абсолютных значениях параметра А для сопел с одинаковым диаметром, а также значений угловых коэффициентов зависимостей рис. 5, являются следствием различной длины капиллярной части вискозиметров, поскольку в более точном представлении  $A \sim R^4/l$  (уравнение (4)). Действительно, несмотря на более сложную конфигурацию выходного отверстия ВЗ-246 (рис. 1,а), значения отношения длин сопел  $l(\text{ISO})/l(\text{ВЗ-246})=3,08$  является достаточно близким к значению соотношения угловых коэффициентов 2,77 зависимостей на рис. 5. Именно по этой причине воронки с одинаковым диаметром сопел не являются взаимозаменяемыми при интерпретации значений условной вязкости.

Для прогнозирования времени истечения при известном значении  $\tau$  одного из типов вискозиметра, было осуществлено решение этой задачи в координатах уравнений (5) и (6). Для этого на интервале значений  $\tau \sim 12-250$  и шагом 1 с при помощи уравнения (5) и параметров табл. 2 для вискозиметра ВЗ-246 с диаметром сопла 4 мм (обозначение  $\tau(246/4)$ ) были рассчитаны значения кинематического коэффициента вязкости. Для полученных значений  $v$  при помощи уравнения (6) с параметрами табл. 1 была решена обратная задача определения  $\tau$  для воронок стандарта ISO (обозначение  $\tau(\text{ISO})$ ). Расчетные результаты в форме символов представлены на рис. 6.

Определение времен истечения для различных диаметров воронок можно осуществить из представленных зависимостей. Тем не менее, представлялось целесообразным найти аналитический вид функции этих зависимостей с использованием наименьшего числа подгоночных параметров. Было установлено, что уравнение

(5) является пригодным для решения этой задачи. Поэтому парная корреляция времен истечения воронок с различной геометрией сопла может быть представлена в рамках эмпирического уравнения (7):

$$\tau(\text{ISO}) = A\tau(246/4) - \frac{B}{\tau(246/4)}, \quad (7)$$

с параметрами А и В, определенными методом нелинейной регрессии (показано в форме сплошных линий на рис. 6), представленными в табл. 3.

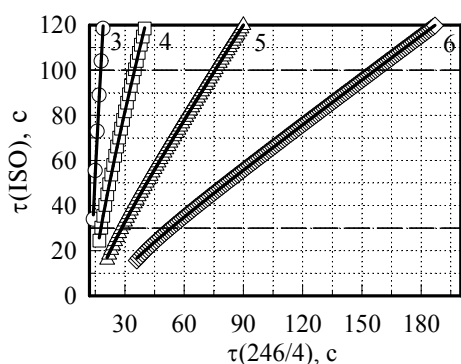


Рис. 6. Парная корреляция времен истечения ВЗ-246/4 и воронок ISO с диаметрами сопел (мм), указанных возле кривых. Пунктирами показан интервал измерений согласно ISO 2431

Таблица 3

Значения констант уравнения (7) для различных воронок ISO 2431

№ воронки	A, мм <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>	B, мм <sup>2</sup>
3	10,7272	1600,32
4	3,2905	514,20
5	1,3639	247,00
6	0,6479	246,45

#### Проверка решения

С целью проверки адекватности предложенного подхода и принимая во внимание осуществления нескольких процедур регрессионного анализа в процессе определения параметров корреляционных зависимостей, были рассчитаны времена истечения для воронок ISO № 5 и № 6 для точки, показанной стрелкой на рис. 3. Визуально координаты этой точки соответствуют значениям  $v=300$  мм<sup>2</sup>/с и  $\tau(246/4)=70$  с при использовании ВЗ-246.

По первому способу значения  $\tau$  (ISO) были определены по уравнению (6) с параметрами табл. 1 для  $v=300$  мм<sup>2</sup>/с.

По второму способу эти же значения были рассчитаны непосредственно по уравнению (7) с параметрами табл. 3 для  $\tau(246/4)=70$  с.

Полученные значения  $\tau$  (ISO) для воронки № 5 равны 90,7 и 91,9 с, а для воронки № 6 – 41,5 и 41,8 с, соответственно. Учитывая, что наименьшие допустимые значения параметров повторяемости и воспроизводимости согласно стандарту ISO 2431 составляют 1,7 и 2,2 с, можно рекомендовать предложенный подход для пересчета значений условной вязкости, определенных при использовании вискозиметров различных типов.

#### Выводы

1. Для вискозиметра ВЗ-246, используемого в отечественной практике определения условной вязкости лакокрасочных материалов, определены параметры уравнения, применяемого международным стандартом ISO 2431.

2. Осуществлен анализ конструктивных особенностей вискозиметров и показаны причины существенных отличий при определении времени истечения для одинаковых значений объема и диаметра выходных отверстий двух типов воронок.

3. Установлено, что базовое уравнение стандарта ISO 2431 может быть использовано для решения задач перерасчета времени истечения при использовании воронок различного типа.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Koleske J.V. Paint and coating testing manual: 15-th edition of the Gardner-Sward handbook. – Bridgeport: ASTM International, 2012. – 1007 p.
2. Goldschmidt A., Streitberger H.-J. BASF handbook on basics of coating technology. – Munster: Vincentz Network, 2007. – 792 p.
3. Mezger T.G. The rheology handbook: for users of rotational and oscillatory rheometers. – Munster: Vincentz Network, 2006. – 299 p.
4. Gupta S.V. Viscometry for liquids: calibration of viscometers. – Heidelberg: Springer, 2014. – 256 p.

Поступила в редакцию 13.10.2018

**КОРЕЛЯЦІЙНИЙ АНАЛІЗ ДАНИХ ВИЗНАЧЕННЯ  
УМОВНОЇ В'ЯЗКОСТІ ПІД ЧАС ВИКОРИСТАННЯ  
ЛІЙОК ІЗ РІЗНОЮ ГЕОМЕТРІЄЮ СОПЛА****В.Ю. Крамаренко, А.В. Сергєєва, Г.Д. Нескорожєна**

Роботу присвячено встановленню простого способу перерахунку часу витікання лакофарбових матеріалів при використанні лійок із різними характеристиками вихідних отворів. З цією метою здійснено аналіз залежностей кінематичного коефіцієнта в'язкості від значень часів витікання, що визначаються за допомогою віскозиметра ВЗ-246 та лійок, які застосовуються згідно з міжнародним стандартом ISO 2431. Показані причини суттєвих відмінностей у значеннях часів витікання для лійок із різною геометрією сопел, навіть за умови однакових значень об'єму віскозиметрів і діаметра їх капілярної частини. Для віскозиметра ВЗ-246, що широко застосовується у вітчизняній практиці, визначені коефіцієнти базового рівняння, що використовується згідно зі стандартом ISO 2431. Встановлено, що це рівняння також може бути використане для опису кореляційних залежностей часу витікання рідин у разі застосування лійок з різною геометрією сопел. Побудовано номограми та визначені коефіцієнти кореляційних залежностей для різних типів віскозиметрів. Аналіз помилок, пов'язаних із використанням запропонованого підходу, свідчить про його прийнятність у рамках значень повторюваності та відтворюваності, регламентованих стандартом ISO 2431.

**Ключові слова:** лакофарбові матеріали; віскозиметрія; умовна в'язкість; час витікання; кореляційний аналіз.

**CORRELATION ANALYSIS OF THE DATA OF APPARENT  
VISCOSITY DETERMINATION WHEN USING FUNNELS  
WITH DIFFERENT NOZZLE GEOMETRY****V.Yu. Kramarenko \*, A.V. Serhieieva, H.D. Neskorozhena**  
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,  
Kharkiv, Ukraine

\* e-mail: kram.cap@gmail.com

The study is dedicated to determination of a simple method for recalculation of discharge time of paint-and-lacquer materials when using funnels with different parameters of outlet holes. To this end, the analysis of the dependences of kinematic coefficient of viscosity on the values of discharge time has been performed for the viscometer VZ-246 and the funnels that are used in compliance with the international standard ISO 2431. The causes of significant differences in the values of discharge time for the funnels with different nozzle geometry have been established, the differences being observed for viscometers even when the values of their volume and the diameter of their capillary part are equal. The coefficients of the basic equation, which was applied according to ISO 2431, have been determined for the viscometer VZ-246 which is widely used in domestic practice. It has been found that this equation can also be used for the description of correlation dependences of discharge time when using the funnels with different nozzle geometry. The alignment charts are plotted and the coefficients of correlation dependences are determined for different types of viscometers. The analysis of the errors associated with the use of the proposed approach shows its acceptability within the limits of the repeatability and reproducibility values specified by ISO 2431.

**Keywords:** paint-and-lacquer materials; viscometry; apparent viscosity; discharge time; correlation analysis.

**REFERENCES**

1. Koleske J.V., *Paint and coating testing manual: 15-th edition of the Gardner-Sward handbook*. ASTM International, 2012. 1007 p.
2. Goldschmidt A., Streitberger H.-J., *BASF handbook on basics of coating technology*. Vincentz Network, Munster, 2007. 792 p.
3. Mezger T.G., *The rheology handbook: for users of rotational and oscillatory rheometers*. Vincentz Network, Munster, 2006. 299 p.
4. Gupta S.V., *Viscometry for liquids: calibration of viscometers*. Springer, Heidelberg, 2014. 256 p.