

*А.Н. ДУБОВЕЦ*, канд. техн. наук, доц., УИПА, Харьков,  
*И.И. ЛИТВИНЕНКО*, канд. техн. наук, проф., НТУ "ХПИ",  
*М.А. ПОДУСТОВ*, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПИ",  
*Ю.Ю. ХОМЯКОВ*, инж., НТУ "ХПИ",  
*С.З. ЗЕЛЕНЦОВ*, вед. инж., НТУ "ХПИ"

## **МОДЕРНИЗАЦИЯ ВИСКОЗИМЕТРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БАЗОВЫХ ЗАКОНОВ ИЗМЕРЕНИЯ**

В статье рассмотрен опыт конструирования средств измерения вязкости в процессе функционирования закона Пуазейля. Приведены примеры измерения вязкости по значению величин входящих в закон Пуазейля.

**Ключевые слова:** конструирование, вязкость, вискозиметр, чувствительность, капилляр, параметр, измерение, зависимость, уровень, емкость.

Практический опыт конструирования средств измерения вязкости показывает, что в процессе их модернизации используются, как правило, физические модели – экспериментальные установки, позволяющие определить скрытые причины возникновения конкретных недостатков и с высокой степенью вероятности сформулировать методы их устранения.

Однако подобный подход не всегда может быть использован, так как, во-первых, физическую модель необходимо разработать, во-вторых, на указанную модель автоматически переносятся недостатки модернизируемого средства измерения и, в-третьих, возмущения, подаваемые на физическую модель, не могут превышать допустимых значений.

Именно поэтому, необходимо в процессе модернизации средств измерения, направленных на исключение имеющихся недостатков, использовать методы, позволяющие прогнозировать последствия предполагаемых их конструктивных изменений.

В процессе разработки метода модернизации вискозиметров, позволяющего без построения физической модели – экспериментальной установки получать достоверные прогнозные данные, с последующим их использованием в процессе исключения недостатков существующих приборов для измерения вязкости использовались три аксиомы:

1) любое средство измерения обязательно реализует конкретный физический (или другой) закон или закономерность;

© А.Н. Дубовец, И.И. Литвиненко, М.А. Подустов, Ю.Ю. Хомяков, С.З. Зеленцов, 2013

2) рабочим органом любого средства измерения является его чувствительный элемент, выходной сигнал которого материализует формулу, лежащую в основе средства измерения; работоспособность средства измерения и его функциональные возможности зависят (в большинстве случаев) от метрологических и надежностных характеристик именно чувствительного элемента;

3) конструктивное решение средства измерения (кроме чувствительного элемента) обеспечивается в большинстве случаев рациональным выбором серийно выпускаемых элементов (преобразователи, усилители, реверсивные двигатели, устройства представления информации, блоки сигнализации и регулирования), которые встраиваются в корпус средства измерения, объединяя их в многофункциональный блок.

Разрабатываемый метод прогнозирования поведения капиллярных вискозиметров после его модернизации базировался на неоспоримом факте взаимосвязи выходного сигнала чувствительного элемента с базовой формулой закона измерения.

Предлагаемый метод был опробован (и демонстрируется) на основе конструкции капиллярного вискозиметра, реализующего в процессе функционирования закон Пуазейля.

Целью метода является получение достоверной информации, которая может быть использована при модернизации существующих и разработке новых конструкций капиллярных вискозиметров.

Капиллярные вискозиметры функционируют в соответствии с формулой Пуазейля

$$\mu = k \frac{\pi r^4}{Ql} \Delta P \quad (1)$$

где  $\mu$  – динамическая вязкость;  $k$  – коэффициент;  $r$  – радиус капилляра;  $Q$  – расход жидкости через капилляр;  $l$  – длина капилляра;  $\Delta P$  – перепад давления на концах капилляра.

Из (1) следует, что при постоянных значениях  $k$ ,  $Q$ ,  $l$ ,  $r$

$$\mu = K \Delta P = F(\Delta P) \quad (2)$$

В учебной и специальной литературе отмечается, что погрешность измерения капиллярных вискозиметров не превышает 2 % и определяется в ос-

новном точностью поддержания температуры и расхода, что является их существенным достоинством и позволяет использовать в качестве «образцовых» при градуировке шкал других видов приборов для измерения вязкости.

Обязательная взаимосвязь выходного сигнала чувствительного элемента капиллярного вискозиметра с законом, лежащим в основе метода измерения, позволила сделать вывод о возможности использования формулы закона Пуазейля в качестве математической модели, преобразование которой позволяет получить необходимую информацию для его усовершенствования.

Если необходимо, например, решить задачу повышения чувствительности капиллярного вискозиметра – уменьшения его порога чувствительности, то формула (1) может быть преобразована к виду

$$\Delta P = \mu \frac{l}{r^4} \frac{Q}{k\pi} \quad (3)$$

из которой следует, что порог чувствительности капиллярного вискозиметра уменьшается при увеличении длины капилляра и уменьшении его радиуса. При этом очевидно, что уменьшение радиуса капилляра нецелесообразно, так как при этом уменьшается его пропускная способность, что при автоматическом измерении вязкости в промышленных условиях недопустимо. Увеличивать длину капилляра также нецелесообразно, так как это приводит к увеличению габаритов вискозиметра.

На основе анализа полученной информации возникают одновременно несколько вопросов:

- 1) как без увеличения  $r$  капилляра увеличить в необходимое число раз его пропускную способность;
- 2) как увеличить длину капилляра, не увеличивая габаритов вискозиметра.

Преобразуя формулу (3) получим

$$\Delta P = \frac{lQ}{r^4 k\pi} = \frac{lQn}{r^4 nk\pi} \quad (4)$$

из которой следует, что пропускная способность капиллярного вискозиметра может быть увеличена в  $n$  раз, не изменяя радиус капилляра  $r$ , посредством использования батареи патрубков, в которой каждый капилляр имеет радиус  $r$ .

Длина капилляра также может быть увеличена в  $n$  раз, если линейный капилляр заменить на спиральный, у которого каждый виток спирали выполнен в виде эллипса.

Предлагаемый метод базируется на информации, что все параметры, входящие в формулу (1) подразделяются на три группы (и это относится к любым формулам – законам, которые реализуются конструкциями различных средств измерения):

- 1) стабилизированные конструктивным исполнением;
- 2) стабилизированные посредством управления;
- 3) представляющие информацию о значении контролируемого параметра (в рассматриваемом случае – вязкости жидкости).

В рассматриваемом случае к первой группе параметров относятся  $l$  – длина капилляра и  $r$  – радиус капилляра, ко второй группе  $Q$  – расход жидкости через капилляр, который стабилизируется при помощи шестеренчатого насоса, к третьей группе  $\Delta P$  – перепад давлений на концах капилляра, по значению которого определяется текущее значение вязкости исследуемой жидкости.

Из формулы (1) следует, что функциональная зависимость (2) может иметь место, если в (1) все члены, кроме одного –  $\Delta P$  имеют постоянные значения, которые задаются конструктивными параметрами элементов, входящих в состав капиллярного вискозиметра ( $r$  и  $l = const$ ) и стабилизированным параметром посредством управления расходом жидкости через капилляр –  $Q$ .

Естественно возникает вопрос о возможности измерения вязкости по значению другой величины, входящей в формулу Пуазейля. При этом следует подчеркнуть, что процесс измерения предполагает при реализации измерения выразить измеряемую величину через другие величины, одни из которых могут быть постоянными конструктивно, другие постоянными за счет управления, а одна – переменной, поддающаяся измерению и пропорционально отображающая измеряемую величину – вязкость.

Например, для измерения вязкости можно использовать зависимость  $\mu = F(r^4)$  при  $k, l, Q, \Delta P = const$ , т.е. в данном случае переменной величиной является радиус капилляра –  $r$ .

При этом справедливо

$$\mu Ql = K\Delta P r^4; \quad \frac{\mu}{r^4} = \frac{K\Delta P}{Ql} = const; \quad \frac{\mu \pm \Delta\mu}{(r \pm \Delta r)} = \frac{K\Delta P}{Ql} = const \quad (5)$$

Из (4) следует, что при  $\frac{K\Delta P}{Ql} = const$  вязкость жидкости может определяться по переменному значению  $r$ . При этом знаки приращения вязкости жидкости и значения  $r$  должны совпадать, т.е. при увеличении вязкости должен увеличиваться радиус капилляра и наоборот.

В формуле (4) индикатором изменения вязкости является перепад давлений  $\Delta P$ , знак приращения которого  $\pm \Delta P$  указывает характер изменения вязкости исследуемой жидкости при  $Q = const$ .

Конструкция вискозиметра должна обеспечить изменение радиуса  $r$  капилляра таким образом, чтобы вернуть  $\Delta P$  к заданному постоянному значению. В данном случае приращение  $\pm \Delta r$  характеризует приращение вязкости, а значение  $r$  при  $\Delta P = const$  – текущее значение вязкости исследуемой жидкости. Может быть также рассмотрен вариант  $\mu = F(Q)$  при  $K, r, l, \Delta P = const$ , в соответствии с которым:

1) вязкость исследуемой жидкости –  $\mu$  должна определяться по текущему значению ее расхода –  $Q$ ;

2) в качестве индикатора достоверности текущего значения вязкости следует выбрать параметр  $\Delta P$  (при выполнении условия  $\Delta P = const$ );

3) расход исследуемой жидкости  $Q$  должен изменяться только при нарушении равенства  $\Delta P = const$  до момента восстановления указанного равенства;

4) для измерения  $Q$  следует выбрать прибор, шкала которого должна быть проградуирована в единицах измерения вязкости.

Если  $\mu = F(Q)$  при  $K, r, l, \Delta P = const$ , то равенство  $\mu Ql = K\Delta P r^4$  сохранится при условии, если

$$(\mu \pm \Delta\mu)(Q \mp \Delta Q) = \frac{Kr^4\Delta P}{l} = const \quad (6)$$

Из (5) следует, что при  $\frac{Kr^4\Delta P}{l} = const$  вязкость жидкости может изменяться по переменному значению  $Q$ . При этом зависимость между  $\mu$  и  $Q$  будет обратно пропорциональной, т.е. при увеличении вязкости расход жидкости через капилляр должен уменьшаться и наоборот.

Возможен также вариант  $\mu = F(l)$  при  $K, r, \Delta P, Q = const$ , в соответствии с которым:

1) вязкость исследуемой жидкости должна определяться по текущему

значению длины капилляра –  $l$ ;

2) в качестве индикатора «достоверности» текущего значения вязкости следует выбрать разность давления на концах капилляра –  $\Delta P$ ;

3) поддержание разности давления на заданном уровне  $\Delta P = \text{const}$  следует обеспечивать за счет изменения длины капилляра  $l$  (при стабилизированном расходе  $Q$  расходе жидкости через капилляр.

4) параметром, стабилизированным конструктивно, является радиус капилляра –  $r$ , параметром, стабилизированным посредством управления – расход жидкости через капилляр –  $Q$ .

Если  $\mu = F(l)$  при  $K, r, \Delta P, Q = \text{const}$ , то

$$\mu l = \frac{Kr^4 \Delta P}{Q} = \text{const}$$

$$(\mu \pm \Delta \mu)(l \mp \Delta l) = \frac{Kr^4 \Delta P}{Q} = \text{const} \quad (6)$$

Следовательно, вязкость жидкой среды в рассматриваемом случае может определяться по переменному значению длины капилляра  $l$ . При этом знаки приращения вязкости жидкости  $\mu$  и значения  $l$  должны быть противоположными.

При определении возможных вариантов представления вязкости жидкости через параметры, входящие в формулу Пуазейля, необходимо выявлять также «сложные» параметры, которые могут быть представлены конкретными законами или закономерностями.

К указанным параметрам относится, например, расход жидкости –  $Q$ , который стабилизируется в (1) при помощи насоса-дозатора. Но

$$Q = sv \quad (8)$$

где  $s$  – площадь поперечного сечения проточного тракта (питающий патрубок, капилляр, трубопровод), в котором движется жидкость,  $v$  – скорость движения жидкости в проточном тракте.

Кроме того,

$$v = \sqrt{2gH} \quad (9)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения;  $H$  – высота столба жидкости, обеспечивающая жидкости движение со скоростью  $v$ .

При этом очевидно, что скорость  $v$  движения жидкости (и, следовательно,  $Q$ ), может изменяться за счет изменения  $H$ , что позволяет стабилизировать  $Q$  и  $v$  за счет стабилизации  $H$ , и изменять  $Q$  и  $v$  по заданной программе посредством изменения  $H$ .

После выявления всех зависимостей, представляющих составные элементы формулы Пуазейля, (или другого закона) появляется возможность их практического использования.

Можно рассмотреть вопрос об использовании в капиллярном вискозиметре напорной системы, реализующей формулу  $Q = vs = s\sqrt{2gH}$  для обеспечения постоянства в системе уровня жидкости  $H$ , используя, например цилиндрическую емкость с переливным устройством в боковой стенке (схема вискозиметра представлена на рис. 1).

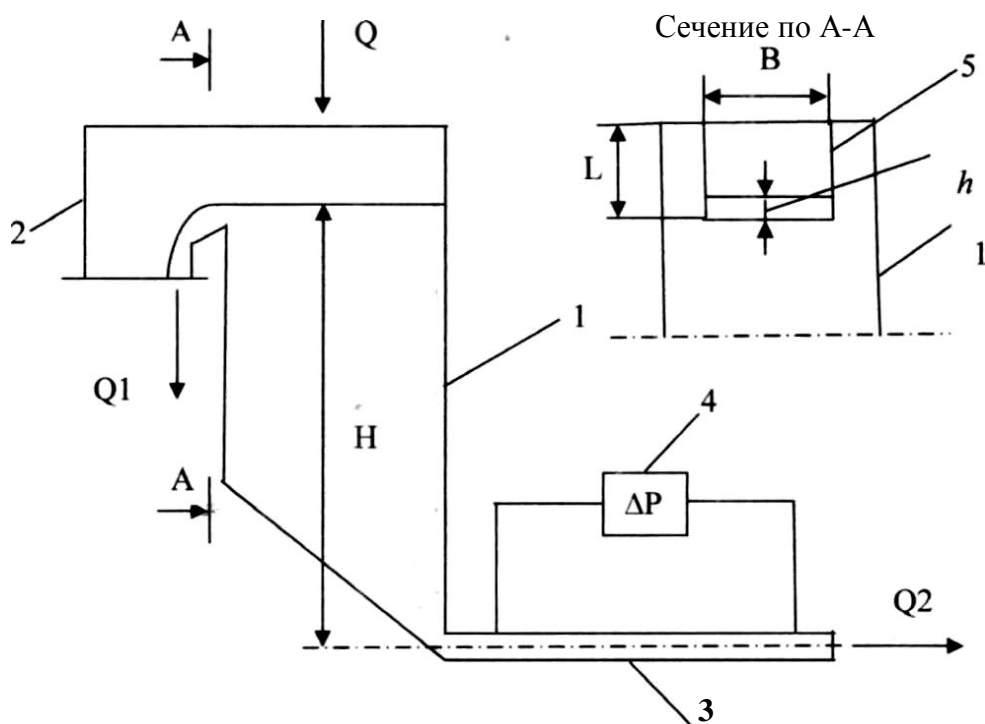


Рис. 1 – Схема вискозиметра: 1 – приемная (цилиндрическая) емкость вискозиметра; 2 – переливное устройство; 3 – капилляр; 4 – измерительный прибор; 5 – прямоугольная щель переливного устройства, вырезанная в стенке приемной емкости;  $\Delta P$  – перепад давлений на концах капилляра;  $B$  – ширина щели;  $h$  – высота слоя жидкости над сливным порогом (в щели переливного устройства);  $L$  – высота (глубина) щели переливного устройства.

Но в этом случае необходимо или стабилизировать  $Q$ , или создать условия, при выполнении которых колебания  $Q$  в допустимых пределах не будут влиять на значение  $Q_2$ .

Другими словами  $Q_2 = const$ , если при  $Q = Q + \Delta Q$  будет выполняться условие  $Q_1 = Q_1 + \Delta Q$ .

Если предположить, что уровень жидкости, поступающей в приемную емкость вискозиметра, изменяется на величину  $h$ , то можно записать

$$Q_2 = kB\sqrt{2g(H_{\Pi} + h)} = kB\sqrt{2g\left(1 + \frac{h}{H_{\Pi}}\right)H_{\Pi}} \quad (9)$$

из которых следует, что чем больше значение  $H_{\Pi}$  относительно  $h$  или отношение  $h/H_{\Pi}$ , тем в меньшей степени значение  $h$  оказывает на расход  $Q_2$  жидкой среды через капилляр.

Следовательно, при конструировании напорной системы с переливным устройством необходимо максимально увеличить высоту  $H_{\Pi}$  приемной емкости, но это одновременно, что необходимо принимать во внимание, увеличивает габариты вискозиметра.

Поэтому представляет интерес предложение о необходимости увеличения ширины  $B$  щели переливного устройства, в процессе которого использовалась формула

$$Q_1 = kBh\sqrt{2gh} = kB\sqrt{2gh^3} \quad (10)$$

преобразованная в равенство

$$Q_1 = kB\sqrt{2gh^3} = const = k(B + \Delta B)\sqrt{2g(h - \Delta h)^3} \quad (11)$$

на основе которого следует вывод, что погрешность измерения вязкости за счет изменения расхода жидкости, поступающей в приемную емкость в пределах  $(Q + \Delta Q)$ , может быть уменьшена за счет увеличения ширины щели  $B$  переливного устройства, где  $k$  – коэффициент пропорциональности;  $\Delta B$  – приращение ширины щели переливного устройства;  $\Delta h$  – приращение высоты слоя жидкости над сливным порогом переливного устройства.

Из формулы (11) также следует, что:



1) условием для минимизации высоты  $h$  слоя жидкости над сливным порогом является  $h \rightarrow 0$  при  $B \rightarrow \infty$ ;

2) с позиций гидравлики идеальная щель не должна иметь боковых стенок, так как они, во-первых, способствуют увеличению уровня жидкости над сливным порогом при увеличении  $Q$  и, во-вторых, являются дополнительным сопротивлением движению жидкости через площадь поперечного сечения щели.

По существу необходимо создать щель, которая не имеет боковых стенок и обеспечивает условие  $h \rightarrow 0$  при  $B \rightarrow \infty$  без изменения высоты приемной емкости капиллярного вискозиметра.

Решение указанных вопросов обеспечивают конструкции приемных емкостей, приведенные на рис. 2 и 3.

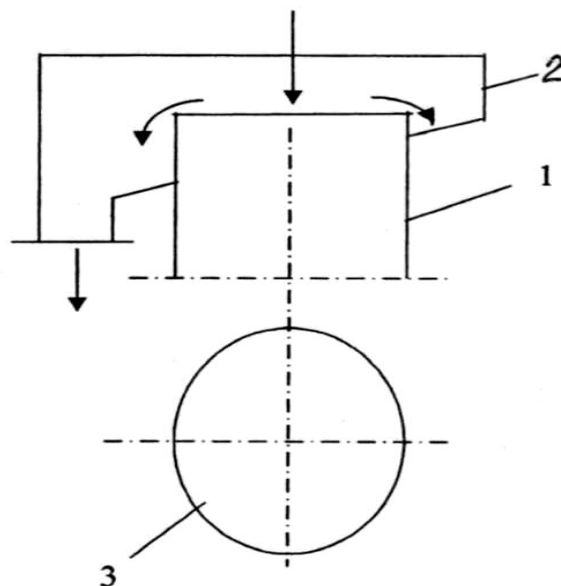


Рис. 2 – Конструкция верхней части приемной емкости: 1 – цилиндрическая приемная емкость; 2 – переливное устройство; 3 – периметр переливного порога.

Первая из них исключает боковые стенки приемной емкости, используя в качестве сливного порога периметр верхней части цилиндрической приемной емкости 1.

Второе предлагает дополнительное увеличение диаметра верхней части приемной емкости за счет установки расширителя 4.

При этом второе решение может осуществляться при сохранении высоты приемной емкости и даже ее уменьшении.

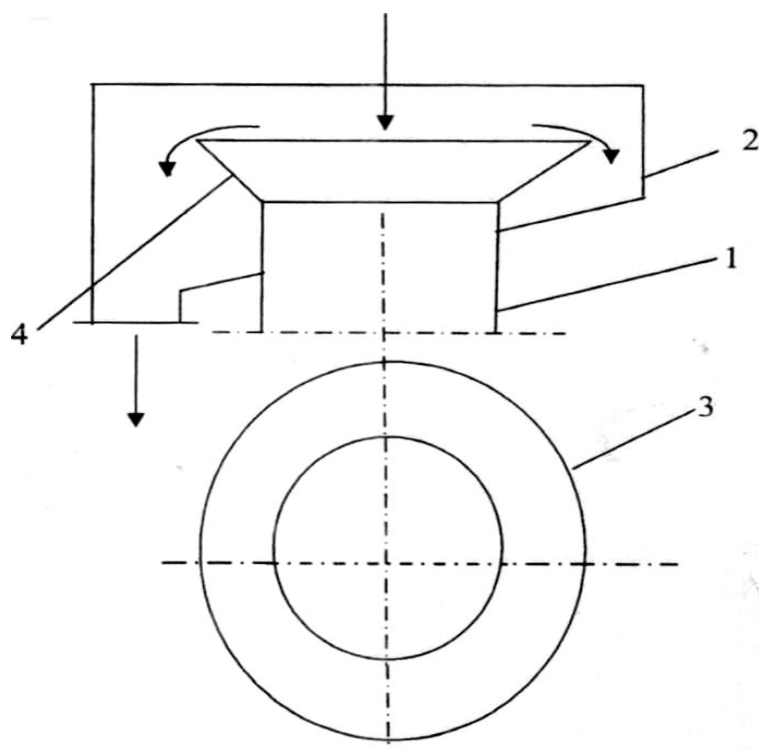


Рис. 3 – Конструкция верхней части приемной емкости с увеличением диаметра: 1 – цилиндрическая приемная емкость; 2 – переливное устройство; 3 – периметр переливного порога; 4 – расширитель цилиндрической приемной емкости.

### **Выводы:**

1. Приводимая в учебниках и излагаемая в процессе лекционных занятий информация о законах, используемых при разработке капиллярных вискозиметров, в большинстве случаев является догмой, подтверждающей неразрывную связь теории с практикой – практическую ценность изучаемых законов, но не обеспечивающая возможность их использования при модернизации конструкций капиллярных вискозиметров.

2. Рационально в процессе представления законов, на основе которых создаются капиллярные вискозиметры (и другие средства измерения), входящие в формулу закона параметры, разделять на, стабилизированные конструктивно, стабилизируемые посредством управления и контролируемые.

3. Наличие в формуле нескольких взаимосвязанных конкретным законом параметров обеспечивает возможность получить на «теоретическом» уровне в виде модели несколько вариантов выражения контролируемого параметра через другие, входящие в формулу закона, и установить закономерность функционирования средства измерения (число, последовательность и содержание операций), которые оно должно выполнять в процессе измерения контролируемого параметра.

4. Каждое выделенное «теоретическое» представление контролируемого параметра должно быть материализовано примерами его практического использования, так как именно на данном этапе проявляется творческое воображение - переход от абстрактного представления к материальной модели - конструкции средства измерения с новыми, более эффективными характеристиками.

5. Этап преобразования формул, на базе которых основано средство измерения позволяет определить без создания лабораторной установки все возможные варианты «теоретического» представления конструкций средства измерения и выбрать из них лучшее – перенести опыт методики модернизации капиллярных вискозиметров на другие средства измерения.

**Список литературы:** 1. А.с. 1307305 СССР, G01N 11/00. Питающая емкость вискозиметра / А.Н. Дубовец, М.А. Дубовец (СССР); заявл. 04.11.85; опубл. 30.04.87, Бюл. № 16. 2. Кулаков М.В. Технологические измерения и приборы для химических производств: учебник для вузов / М.В. Кулаков. – [3-е изд.]. – М.: Машиностроение, 1983. – 424 с. 3. Патент на корисну модель 48997, G01N 11/00. Вискозиметр / Григорова О.М., Дубовець О.М., Жукова Ю.А.; заявник та патентовласник Українська інженерно-педагогічна академія; заявл. 06.11.09; опубл. 12.04.10, Бюл. № 7.

*Поступила в редколлегию 21.10.13*

УДК 378.1:159.955

**Модернизация вискозиметров с использованием базовых законов измерения / А.Н. ДУБОВЕЦ, И.И. ЛИТВИНЕНКО, М.А. ПОДУСТОВ, Ю.Ю. ХОМЯКОВ, С.З. ЗЕЛЕНЦОВ // Вісник НТУ «ХП». – 2013. – № 64 (1037). – (Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія). – С. 45 – 55. – Бібліогр.: 3 назв.**

У статті розглянуто досвід конструювання засобів вимірювання в'язкості в процесі функціонування закону Пуазейля. Наведені приклади вимірювання в'язкості по значенню величин вхідних в закон Пуазейля.

**Ключові слова:** конструювання, в'язкість, вискозиметр, чутливість, капіляр, параметр, вимірювання, залежність, рівень, ємність.

The article describes the experience of designing tools viscosity measurements during operation Poiseuille law. The examples of the viscosity measurement units meaningfully included in Poiseuille's law.

**Keywords:** design, viscosity, viscometer, sensitivity, capillary, parameter, measurement, the dependence of the level of capacity.