



**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ**

**(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ**

(21)(22) Заявка: 2012147160/28, 06.11.2012

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
06.11.2012

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 06.11.2012

(45) Опубликовано: 27.05.2014 Бюл. № 15

(56) Список документов, цитированных в отчете о  
поиске: SU 1745681 A1 07.07.1992. RU 2065146  
С1 10.08.1996. WO 2011107472 A9 09.09.2011.  
US 4539837 A 10.09.1985

Адрес для переписки:

302020, г.Орел, Наугорское ш., 29, ФГБОУ ВПО  
"Государственный университет-учебно-научно-  
производственный комплекс" (ФГБОУ ВПО  
"Госуниверситет-УНПК")

(72) Автор(ы):

Савин Леонид Алексеевич (RU),  
Корнаев Алексей Валерьевич (RU),  
Корнаева Елена Петровна (RU),  
Антонов Павел Геннадьевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
"Государственный университет-учебно-  
научно-производственный комплекс"  
(ФГБОУ ВПО "Госуниверситет-УНПК")  
(RU)

**(54) ИНЕРЦИОННЫЙ СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ ВЯЗКОСТИ**

(57) Реферат:

Изобретение относится к измерительной технике и может быть использовано для измерения коэффициента динамической вязкости текучих сред со сложными реологическими свойствами, зависящими от скорости сдвига, давления и температуры. Способ измерения вязкости включает прокачку испытуемой среды через канал круглой формы поперечного сечения и определение параметров движения среды, а именно касательного напряжения и сдвиговой скорости деформации на поверхности канала, по

которым определяют вязкость среды. При этом канал имеет замкнутую форму тора, а прокачка испытуемой среды происходит под действием сил инерции и трения среды, возникших в результате резкой остановки вращающегося вокруг своей оси тора. Техническим результатом является повышение точности определения вязкости сред со сложными реологическими свойствами, зависящими одновременно от скорости сдвига, давления и температуры в широком диапазоне перечисленных параметров. 3 табл.



FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(21)(22) Application: **2012147160/28, 06.11.2012**

(24) Effective date for property rights:  
**06.11.2012**

Priority:

(22) Date of filing: **06.11.2012**

(45) Date of publication: **27.05.2014** Bull. № 15

Mail address:

**302020, g.Orel, Naugorskoe sh., 29, FGBOU VPO  
"Gosudarstvennyj universitet-uchebno-nauchno-  
proizvodstvennyj kompleks" (FGBOU VPO  
"Gosuniversitet-UNPK")**

(72) Inventor(s):

**Savin Leonid Alekseevich (RU),  
Kornaev Aleksej Valer'evich (RU),  
Kornaeva Elena Petrovna (RU),  
Antonov Pavel Gennad'evich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Federal'noe gosudarstvennoe bjudzhetnoe  
obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego  
professional'nogo obrazovanija  
"Gosudarstvennyj universitet-uchebno-nauchno-  
proizvodstvennyj kompleks" (FGBOU VPO  
"Gosuniversitet-UNPK") (RU)**

(54) **INERTIAL METHOD TO MEASURE VISCOSITY**

(57) Abstract:

FIELD: measurement equipment.

SUBSTANCE: method to measure viscosity includes pumping of tested medium via a channel of round shape of cross section and determination of medium movement parameters, namely, tangent stress and shift speed of deformation on the channel surface, which are used to determine medium viscosity. At the same time the channel has the closed toroid shape, and pumping

of the tested medium happens under action of inertia forces and medium friction, which arose as a result of sharp stop of the toroid rotating around its axis.

EFFECT: higher accuracy of definition of media viscosity with complex rheological properties that depend simultaneously on speed of shift, pressure and temperature in wide range of listed parameters.

3 tbl

**RU 2 517 819 C1**

**RU 2 517 819 C1**

Изобретение относится к измерительной технике и может быть использовано для измерения коэффициента динамической вязкости текучих сред со сложными реологическими свойствами, зависящими от скорости сдвига, давления и температуры.

Известен способ измерения коэффициента динамической вязкости (далее вязкости) сред, включающий определение момента силы трения на поверхности погруженного в испытываемую среду шпинделя формы цилиндр (конус, диск) при различных скоростях сдвига для испытываемой и эталонной сред (Мидлман С. Течение полимеров. Пер. с англ. Ю.Н.Панова под ред. А.Я.Малкина. - М.: Мир, 1971. - 360 с.). Способ реализован в ротационных вискозиметрах (Мидлман С. Течение полимеров. Пер. с англ. Ю.Н.Панова под ред. А.Я.Малкина. - М.: Мир, 1971. - 360 с.). Недостатком способа является невозможность создания на поверхности шпинделя условий однородности полей механических величин, что ведет к возникновению погрешности расчета касательных напряжений, сдвиговых скоростей деформаций и, как следствие, вязкости. Другим недостатком способа является сложность конструкции устройства, реализующего измерение вязкости при различных значениях гидростатического давления в испытываемой среде. Существенным совпадающим признаком аналога с заявляемым изобретением является процедура измерения момента силы трения на поверхности контакта среды и элемента устройства измерения вязкости.

Наиболее близким по физическим условиям течения испытываемой среды является способ, включающий прокачку испытываемой среды через канал известного размера и определение напряжения и скорости сдвига на стенке канала (Патент СССР №1716388, МПК G01N 11/04, опубл. 1992 г.). Способ реализован в капиллярных вискозиметрах. Недостатком способа является невозможность создания в объеме и на поверхности канала условий однородности гидростатического давления, так как процесс течения испытываемой среды обеспечивается именно перепадом давления по длине канала, что ведет к невозможности исследования сред, реологические свойства которых зависят от величины гидростатического давления. Существенными совпадающими признаками аналога (прототипа) с заявляемым изобретением являются физические условия течения, а именно реализация Пуазейлевского течения (Мидлман С. Течение полимеров. Пер. с англ. Ю.Н.Панова под ред. А.Л.Малкина. - М.: Мир, 1971. - 360 с.), а также наличие процедуры определения касательного напряжения и сдвиговой скорости деформации на поверхности канала.

Задача, на решение которой направлено изобретение, состоит в получении способа измерения вязкости сред со сложными реологическими свойствами, зависящими от скорости сдвига, давления и температуры.

Поставленная задача достигается тем, что в отличие от прототипа течение испытываемой среды происходит в замкнутом канале формы тора под действием сил инерции и трения. Такое течение при определенных геометрических, кинематических и статических параметрах устройства обеспечивает с требуемой точностью выполнение требуемых условий однородности полей термомеханических величин. Определение величин касательного напряжения, скорости сдвиговой деформации и температуры испытываемой среды на поверхности тора, а также гидростатического давления во всем объеме тора, позволяет определить величину вязкости при различных значениях выше перечисленных параметров. Предлагаемый способ заключается в плавном разгоне и резкой остановке тора с испытываемой средой с последующим в процессе инерционного торможения измерением момента силы трения и профиля скорости среды вблизи стенки тора.

Сущность изобретения заключается в следующем.

По сути, вязкость является коэффициентом пропорциональности между компонентами девиатора напряжений и девиатора скоростей деформаций в обобщенном законе Р. Гука, описывающем реологическое поведение изотропных вязкопластичных сред в рамках основных положений механики сплошных сред и безмоментной теории напряжений (Кучеряев Б.В. Механика сплошных сред (теоретические основы обработки давлением композитных металлов с задачами и решениями, примерами и упражнениями): Учебник для вузов. М.: МИСиС, 2006. - 604 с.):

$$D_{\sigma} = 2\mu D_{\xi}, \quad (1)$$

где  $D_{\sigma}$  - девиатор напряжений с компонентами  $s_{ij}$ ;

$\mu$  - вязкость;

$D_{\xi}$  - девиатор скоростей деформаций с компонентами  $e_{ij}$ .

Поэтому для определения вязкости необходимо знать значения соответствующих компонент тензора напряжений и скоростей деформаций в какой-либо малой окрестности движущейся среды. В случае если поля физических величин обладают свойством однородности на какой-то поверхности и (или) в каком-то объеме, то значения выше названных компонент могут быть определены по сравнительно легко измеряемым интегральным характеристикам. Например, по известному моменту силы трения на поверхности контакта с испытуемой средой при условии, что вид напряженного состояния известен и напряженное состояние является однородным, на этой поверхности можно легко найти значение касательного напряжения.

Рассмотрим изотермическое инерционное тормозящее течение вязкой несжимаемой среды в канале формы тора, характеризуемом радиусом образующей окружности  $r$  и расстоянием от центра оси симметрии тора до центра образующей окружности  $R$ . Среда закачана в тор под давлением  $p_0^0$ . Исследуется инерционное движение среды, возникшее в результате резкой остановки тора. До момента остановки тор достаточное количество времени вращался с угловой скоростью  $\omega^0$ , поэтому угловая скорость всех материальных частиц среды одинакова и равна  $\omega^0$ , средняя линейная скорость составляет  $V^0 = \omega^0 R$ . В начальный момент времени тор останавливается, среда при этом продолжает движение под действием сил инерции и трения. Предполагается, что в исследуемый промежуток времени действие силы гравитации незначительно, а движение среды происходит по стационарным линиям тока, образованным множеством соосных окружностей. Вводятся криволинейные ортогональные координаты:  $\beta_1$  - радиальная координата в плоскости образующей окружности,  $0 \leq \beta_1 \leq r$ ;  $\beta_2$  - угловая координата в плоскости, перпендикулярной оси тора,  $0 \leq \beta_2 \leq 2\pi$ ;  $\beta_3$  - угловая координата в плоскости образующей окружности, перпендикулярной оси тора,  $0 \leq \beta_3 \leq 2\pi$ . Коэффициенты Г.Лямэ  $h_i$  преобразования координат составят:

$$\begin{aligned} h_1 &= 1, \\ h_2 &= \beta_1 \cos(\beta_3) + R, \\ h_3 &= \beta_1. \end{aligned} \quad (2)$$

В криволинейных координатах скорость движения среды характеризуется однокомпонентным вектором скорости  $\vec{V} = [0, V_2, 0]$ , компоненты девиатора скоростей деформаций согласно формуле Дж. Стокса (Кучеряев Б.В. Механика сплошных сред (теоретические основы обработки давлением композитных металлов с задачами

и решениями, примерами и упражнениями): Учебник для вузов. М.: МИСиС, 2006. - 604 с.) определяются по формуле:

$$e_{12} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial V_2}{\partial \beta_1} - \frac{V_2 \partial h_2}{h_2 \partial \beta_1} \right),$$

$$e_{23} = \frac{1}{2} \frac{1}{h_3} \left( \frac{\partial V_2}{\partial \beta_3} - \frac{V_2 \partial h_2}{h_2 \partial \beta_3} \right). \quad (3)$$

Уравнения движения с учетом симметрии полей исследуемых термомеханических величин относительно оси тора  $\partial/\partial\beta_2=0$ , что для поля скоростей совпадает с условием несжимаемости среды, имеют вид:

$$\frac{\partial p_0}{\partial \beta_1} = \rho_{\text{ж}} \frac{V_2^2 \partial h_2}{h_2 \partial \beta_1},$$

$$\frac{\partial V_2}{\partial t} = - \frac{1}{h_2^2 h_3 \rho_{\text{ж}}} \left[ \frac{\partial}{\partial \beta_1} (h_2^2 h_3 s_{12}) + \frac{\partial}{\partial \beta_3} (h_2^2 s_{23}) \right], \quad (4)$$

$$\frac{\partial p_0}{\partial \beta_3} = \rho_{\text{ж}} \frac{V_2^2}{h_2} \frac{\partial h_2}{\partial \beta_3},$$

где  $p_0$  - гидростатическое давление;  
 $\rho_{\text{ж}}$  - плотность среды (жидкости).

Используя аппарат теории подобия и анализа размерностей, можно выполнить оценку геометрических параметров тора, начальной скорости его вращения, а также свойств среды, при которых характеристики напряженно-деформированного состояния движущейся среды на поверхности тора и поле давления во всем объеме тора будут с достаточной степенью точности однородны. Процедура обезразмеривания переменных величин представлена в таблице 1. В качестве обезразмеривающей величины вязкости  $\mu_0$  предлагается использовать вязкость, близкой по свойствам ньютоновской жидкости, а в качестве обезразмеривающей величины времени  $t_0$  - время инерционного движения среды с момента остановки тора до момента остановки среды.

Компоненты градиента скорости  $\partial V_2/\partial\beta_1$  и  $(1/h_3)(\partial V_2/\partial\beta_3)$  вблизи поверхности тора можно сравнить в начальный момент времени, тогда компонента  $\partial V_2/\partial\beta_1$  обусловлена перепадом в результате условия прилипания среды к неподвижной стенке тора и при допущении о линейности составит приблизительно  $\partial V_2/\partial\beta_1 \approx \omega_0 R/r$ , компонента  $(1/h_3)(\partial V_2/\partial\beta_3)$  обусловлена разницей окружных скоростей и составит приблизительно  $(1/h_3)(\partial V_2/\partial\beta_3) \approx \omega_0 2r/\pi r$ . Отношение компонент градиента составит приблизительно  $R/r$ , поэтому при значительной разнице радиусов вкладом компоненты градиента  $(1/h_3)(\partial V_2/\partial\beta_3)$  в вектор градиента можно пренебречь.

Таблица 1		
Обезразмеривание параметров уравнений (1)-(4)		
Обозначение безразмерной величины	Способ определения безразмерной величины	Пределы изменения безразмерной величины (если известны)
$\tilde{\beta}_1$	$\beta_1/r$	$0 \leq \tilde{\beta}_1 \leq 1$

	$\tilde{\beta}_2$	$\beta_2/2\pi$	
	$\tilde{\beta}_3$	$\beta_3/2\pi$	
5	$\tilde{h}_2$	$h_2/r$	$R/r \leq \tilde{h}_2 \leq 1 + R/r$
	$\tilde{h}_3$	$h_3/r$	$0 \leq \tilde{h}_3 \leq 1$
10	$\tilde{V}_2$	$V_2/V_0$	$0 \leq \tilde{V}_2 \leq 1$
	$\tilde{\xi}_{ij}$	$r\xi_{ij}/V_0$	-
15	$\tilde{p}_0$	$p_0/p_0^0$	-
	$\tilde{s}_{ij}$	$(2\mu_0 V_0 / r)\tilde{\mu}\tilde{\xi}_{ij}$	-
20	$\tilde{t}$	$t/t_0$	$0 \leq \tilde{t} \leq 1$

С целью оценки значимости отдельных членов в уравнениях (1)-(4) вводятся безразмерный геометрический критерий  $\gamma=r/R$ , число Рейнольдса  $Re=(rV_0\rho_{ж})/\mu_0$ , число Струхала  $Sh=r/(t_0V_0)$  и аналог числа Эйлера  $E\tilde{u} = p_0^0/(\rho_{ж} V_0^2)$ . Порядок величин компонент девиатора скоростей деформаций и правых частей уравнений движения представлен в таблице 2.

Таким образом, при условии малости геометрического параметра ( $\gamma \leq 10^{-2}$ ) можно с погрешностью порядка  $\gamma$  утверждать, что компоненты девиатора скоростей деформаций (3) имеют вид:

$$e_{12} = \frac{1}{2} \frac{\partial V_2}{\partial \beta_1},$$

$$e_{23} = 0. \tag{5}$$

Девиатор скоростей деформаций (5) однороден по всей поверхности тора. Для выполнения с заданной точностью условия однородности поля давления  $p_0$  по всему объему тора гидродинамический напор  $\rho_{ж} V_0^2$  следует выбирать согласно рекомендациям, приведенным в таблице 3.

Таблица 2

Порядок величин членов уравнений (1)-(4)			
Элемент математической модели	Физическая величина или слагаемое уравнения	Порядок величины	Примечание
45 Девиатор скоростей деформаций $D_{\xi} = \llbracket e_{ij} \rrbracket$	$2\tilde{e}_{12}$	$\approx \partial \tilde{V}_2 / \partial \tilde{\beta}_1 - \gamma$	$\gamma \leq 10^{-2}$
	$2\tilde{\xi}_{23}$	$\approx (1/\tilde{h}_3)(\partial \tilde{V}_2 / \partial \tilde{\beta}_3) - \gamma \approx \gamma(\partial \tilde{V}_2 / \partial \tilde{\beta}_1 - 1)$	

Уравнение движения:			
5	проекция на ось $\beta_1$	$\frac{\partial \tilde{p}_0}{\partial \tilde{\beta}_1}$	$\approx \frac{\gamma}{E\tilde{u}}$ $\gamma \leq 10^{-2}$
	проекция на ось $\beta_2$	$\frac{\partial \tilde{V}_2}{\partial \tilde{t}}$	$\approx \frac{1}{Re} \frac{1}{Sh} [\tilde{s}_{12} + \partial \tilde{s}_{12} / \partial \tilde{\beta}_1 + \gamma]$ $\gamma \leq 10^{-2}$
10	проекция на ось $\beta_3$	$\frac{\partial \tilde{p}_0}{\partial \tilde{\beta}_3}$	$\approx \frac{\gamma}{E\tilde{u}}$ $\gamma \leq 10^{-2}$

Таблица 3				
Условия однородности поля давления				
15	$\gamma$	$p_0^0, \text{ Па}$	Рекомендуемая величина гидродинамического напора, Па	Порядок величины перепада давления по направлению, Па
				$0 \leq \beta_1 \leq r$ $0 \leq \beta_3 \leq \pi$
	$10^{-2}$	$10^5$	$\rho_{ж} V_0^2 \leq 10^5$	$10^{-2} p_0^0$
20	$10^{-3}$	$10^5$		$10^{-3} p_0^0$
	$10^{-2}$	$10^6$	$\rho_{ж} V_0^2 \leq 10^6$	$10^{-2} p_0^0$
25	$10^{-3}$	$10^6$		$10^{-3} p_0^0$

Таким образом, при выполнении условий малости геометрического параметра ( $\gamma \leq 10^{-2}$ ), а также кинематических и статических условий

таблицы 3 можно с точностью порядка  $10^0\%$  и меньше определять вязкость испытываемой среды по формуле:

$$\mu = s_{12} / \left( \frac{\partial V_2}{\partial \beta_1} \right). \quad (6)$$

Компонента девиатора напряжений  $s_{12}$  является, по сути, касательным напряжением на поверхности тора, возникающим по причине инерционного тормозящегося течения испытываемой среды, и может быть определена на поверхности тора по известному моменту силы трения  $M$ :

$$s_{12} = M / \left( \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} (r \cos \beta_3 + R)^2 r d\beta_2 d\beta_3 \right) \approx M / (2\pi^2 R^2 r) \quad (7)$$

Градиент скорости  $\partial V_2 / \partial \beta_1$  может быть определен по результатам измерения скорости течения с помощью доплеровского измерителя скорости (Мидлман С. Течение полимеров. Пер. с англ. Ю.Н.Панова под ред. А.Я.Малкина. - М.: Мир, 1971. - 360 с.).

Способ осуществляется следующим образом.

В тор под давлением  $p_0^0$  закачивается испытываемая среда. Затем тор плавно разгоняется до угловой скорости  $\omega^0$ , удовлетворяющей рекомендациям по величине гидродинамического напора (таблица 3), и резко останавливается. После остановки

тора жидкость продолжает движение, в течение этого времени показания датчиков скорости и крутящего момента передаются на ЭВМ. Затем в фиксированный момент времени вычисляется величина касательного напряжения на поверхности тора по формуле (7) и градиент скорости жидкости на поверхности тора в виде конечно-разностного аналога производной:  $\partial V_2/\partial \beta_1 \approx \Delta V_2/\Delta \beta_1$ . По формуле (6) определяется вязкость.

Предложенный способ измерения вязкости позволяет исследовать вязкость сред со сложными реологическими свойствами, зависящими одновременно от скорости сдвига, давления и температуры в широком диапазоне выше названных параметров. Выработанные рекомендации по выбору параметров и условий исследования позволяют производить высокоточные измерения вязкости.

#### Формула изобретения

Способ измерения вязкости, включающий прокачку испытуемой среды через канал круглой формы поперечного сечения и определение параметров движения среды, а именно касательного напряжения и сдвиговой скорости деформации на поверхности канала, по которым определяют вязкость среды, отличающийся тем, что канал имеет замкнутую форму тора, а прокачка испытуемой среды происходит под действием изменяющихся во времени сил инерции и трения среды, возникших в результате резкой остановки вращающегося вокруг своей оси тора.

25

30

35

40

45