

Определение реологических характеристик технических жидкостей ротационными гироскопическими вискозиметрами

М.Ф. Детлер, А.В. Криворотов, А.И. Недолужко, А.Ю. Парубец

Донской государственной технической университет, Ростов – на – Дону

Аннотация: Исследуются возможности теоретических и экспериментальных методов определения реологических характеристик технических жидкостей. Проведена сравнительная оценка ротационных и гироскопических вискозиметров. Выявлено явление проскальзывания слоёв неньютоновской жидкости у поверхности измерительных цилиндров при увеличении градиентов скоростей сдвига и процентного содержания наполнителя. Сделан вывод о некорректности принятой гипотезы на основе, которой проводится определение реологических параметров технических неньютоновских жидкостей ротационными приборами.

Ключевые слова: Технические жидкости, неньютоновская среда, реология, вискозиметр, реологическая модель, автомобильная техника.

Конструктивные особенности машин, условия их работы требуют обеспечения определенных реологических параметров смазочных материалов и технических жидкостей. Их несоответствие ГОСТам неизбежно влечёт за собой сокращение межремонтных сроков и вынужденным простоям техники. Использование различных методов контроля технических жидкостей, с необходимой точностью измерений или расчетов реологических параметров является одним из эффективных путей обеспечения ресурса автомобильных двигателей.

Многие технические жидкости и смазки, являются многокомпонентными и не подчиняются закону вязкости Ньютона (так называемые неньютоновские жидкости) и их вязкостные свойства невозможно охарактеризовать только коэффициентом вязкости. Это жидкости, с характерной зависимостью между скоростью деформации и напряжением в потоке. Их свойства, исследуются вискозиметрами и реометрами, теоретически описываются с помощью реологических уравнений и функций типа:

$$\tau_{xy} = f\left(\frac{dv_x}{dy}\right) \quad (1)$$

В реологии неньютоновских сред, для описания их вязкостно - прочностных свойств, предлагают множество различных математических моделей течения [1-4]. Анализ показал, что, реально для аналитических решений используются уравнения приведенные ниже:

$$\begin{aligned} \tau &= k\dot{\gamma} && \text{(среда Ньютона)} \\ \tau &= \tau_0 + k\dot{\gamma} && \text{(среда Шведова- Бингама)} \\ \tau &= k\dot{\gamma}^n && \text{(среда Оствальда-де Виля)} \\ \tau &= \tau_0 + k\dot{\gamma}^n && \text{(среда Гершеля-Балкли)} \\ \tau &= (k_0 + k_1\sqrt{\dot{\gamma}})^2 && \text{(среда Кессона)} \end{aligned} \quad (2)$$

Несмотря на кажущую простоту, аналитические решения с достаточной для практического применения точностью удается получить, как правило, для простых сдвиговых течений в трубопроводах и на стенках цилиндров [5,6].

Для ньютоновских жидкостей Маргулисом [9] была получена формула, связывающая динамический коэффициент вязкости и угловую скорость вращения ротора вискозиметра

$$\Omega = \frac{\frac{M}{2\pi r_2^2} - \frac{M}{2\pi r_1^2}}{2\eta} = \frac{M}{4\eta\pi} \left(\frac{r_1^2 - r_2^2}{r_1^2 r_2^2} \right) \quad (3)$$

где: Ω -угловая скорость вращения ротора; M - крутящий момент; r_1, r_2 - соответственно, наружный радиус внутреннего цилиндра и внутренний радиус наружного цилиндра; η - коэффициент динамической вязкости.

Отсюда коэффициент динамической вязкости ньютоновской жидкости

$$\eta = \frac{M}{4\Omega\pi} \frac{(r_1^2 - r_2^1)}{r_1^2 r_2^2} \quad (4)$$

Связь касательных напряжений и градиентов скоростей сдвига описывается линейным интегральным уравнением типа Вольтера.

$$\Omega = \frac{1}{2} \int_{\tau_1 \alpha^{-2}}^{\tau_1} \tau^{-1} \dot{\gamma}(\tau) d\tau \quad (5)$$

Решение этого уравнения получил Павловский

$$\dot{\gamma}_1(\tau_1) = 2\tau_1 \sum_{\beta=0}^{\infty} \alpha^{-\beta} \frac{d[\Omega(\alpha^{-2\beta} \tau_1)]}{d\tau_1} \quad (6)$$

Однако для неньютоновских сред таких простых зависимостей теоретически получить не удастся. Усложнение реологических уравнений неньютоновских сред практически потеряло свою актуальность, так как уравнения течения трудно использовать при аналитическом решении в большинстве инженерных задач. Кроме того, мощность современных компьютеров позволяет достаточно точно результаты экспериментальной вискозиметрии описать рядами или интерполировать экспериментальные данные многочленами вида

$$Y = \sum_{N=0}^M A_N X^N \quad (7)$$

Требование к зависимостям, полученным при обработке экспериментальных данных одно – адекватность математической модели изучаемому объекту и технологическому процессу.

Определяющим при экспериментальных способах определения вязкости является точность полученных измерений. В работах [7,8]

приводятся данные об инвариантности результатов капиллярной и ротационной вискозиметрии по сравнительному критерию инвариантности. Эти данные позволяют отнести ротационные вискозиметры к группе наиболее точных приборов по функциональной системе классификации реометров. Вместе с тем, и высокоточные ротационные вискозиметры имеют ряд недостатков влияющих на точность измерения реологических характеристик неньютоновских сред:

- нарушается однородность сдвиговой деформации при движении исследуемого материала в радиальном направлении, вызванном центробежной силой;

- наличие эффекта Вейссенберга при повышенных скоростях деформации материала;

- исследуемый материал, заполняющий промежуток между дном сосуда внешнего цилиндра и нижним торцом внутреннего цилиндра вносит свой вклад в общую силу сопротивления деформированию;

- износ вращающихся частей, которые накладывают отпечаток на корректность измерений;

- устройства, применяемые в вискозиметрах для измерения моментов и угловых скоростей, зачастую имеют паразитные моменты сопротивления.

Ротационные приборы различных конструкций и фирм, в сущности, отличаются именно способами решения этих проблем. Наибольшее распространение получили вискозиметры с торсионным измерителем моментов. В них в качестве торсионов применяется стальная проволока или винтовая пружина, поворачивающаяся вокруг своей оси до наступления равновесия между моментом сил сопротивления (трения) испытуемого материала и моментом сил упругости торсиона [10]. Этим вискозиметрам присущи недостатки приведенные выше. Для расширения диапазона измерений, повышения точности и быстродействия приборов нами было

предложено семейство ротационных гироскопических вискозиметров, защищенных рядом авторских свидетельств. Особенностью таких вискозиметров является то, что один из коаксиальных цилиндров соединен с приводным двигателем, а другой с корпусом двухступенного гироскопа [11,12]. На этом вискозиметре были определены реологические параметры неньютоновских жидкостей. В качестве неньютоновских жидкостей применялся гидрогель, загущенный продуктом САКАП (сополимер акриловой кислоты) с металлическим наполнителем – порошком АСДА-30. В качестве конкурирующего вискозиметра был выбран Реотест- 2.

Тарировка ротационного гироскопического вискозиметра проводилась по реологическим характеристикам эталонных жидкостей, при температуре 200 С. В таблицах №1и №2 приведены данные замеров реологических параметров неньютоновских жидкостей двумя типами вискозиметров. Проведенные измерения позволяют сделать вывод о том, что исследуемые жидкости проявляют дилатантные свойства.

Таблица №1

Реологические параметры неньютоновских жидкостей.

Скорость, С-1 , γ	0,3 % САКАП		0,3 % САКАП+ 12% АСДА-30		0,3 % САКАП+ 14% АСДА-30		Диапазон измерений
	α	Вязкость, мПа.с	α	Вязкость, мПа.с	α	Вязкость, мПа .с	
650	75	948,5	78,3	991,1	82,8	1046,6	1
1000	11.8	970,8	12,33	1014,5	13	1072,3	2
1100	13.5	1009,7	14,1	1056,1	14,9	1115,2	2
1600	21.4	1067	22	1116,1	23	1183	2
1900	25	1082.5	26,1	1132,2	27,6	1195,6	2
3000	40	1096,9	41.8	1146.3	44,2	1211,6	2
3200	42.8	1100,4	44,8	1151,6	47,5	1220,7	2
Прибор «Реотест- 2»							
650	72,7	920	75.86	959.4	79,9	1011	1
1000	11.4	936,8	11.9	982	12,5	1034.8	2
1100	12.7	945.5	13.7	1021.2	14,4	1075,1	2
1600	20.3	1045.7	21	1078.3	22,2	1141,5	2
1900	24.3	1050,6	25,3	1094,8	26,6	1152.6	2
3000	38,8	1064.2	40,4	1109	42,7	1170.4	2

3200	41,6	1069.5	43.3	1113,6	45,8	1178	2
------	------	--------	------	--------	------	------	---

Таблица № 2

Влияние наполнителя на реологические параметры жидкости

Скорость, С-1, γ	0,3 % САКАП+ 14% АСДА-30		0,3 % САКАП+ 18% АСДА-30		0,3 % САКАП+ 20% АСДА-30		Диапазон измерений
	α	Вязкость, мПа.с	α	Вязкость, мПа.с	α	Вязкость, мПа.с	
3200	47,5	1220,7	57	1469	63	1593	2
Прибор «Реотест- 2»							
3200	45,8	1178	55.15	1418	54,4	1402	2

Вместе с тем, необходимо отметить, что увеличение содержания наполнителя до 20% привело к существенной разнице в показаниях вискозиметров. Прибор «Реотест-2» показал снижение вязкости неньютоновской жидкости, гироскопический прибор сохранил тенденцию к её росту. Снижение замеренной вязкости можно объяснить проскальзыванием среды у поверхности тела с более «жестким» измерителем. Отмеченный эффект требует дальнейшего изучения. Вместе с тем, гипотеза об отсутствии проскальзывания вязкой среды у поверхности тел на основе, которой считается, что момент вращения ротора, передаваемый от одной поверхности к другой, является мерой вязкости жидкости, не корректна. Такая гипотеза не может быть применена к большинству неньютоновских жидкостей. Кроме того, вряд ли возможно с высокой точностью измерить крутящий момент. Гироскопические ротационные вискозиметры обладают более высокой точностью, но и более сложной конструкцией. Применение того или иного типа приборов обусловлено необходимой точностью измерений, кругом решаемых задач. Теоретические исследования должны базироваться на простейших реологических уравнениях. Во всех же остальных случаях предпочтение следует отдавать экспериментальному определению характеристик жидкостей.

Литература

1. Рейнер М Реология «Наука», М., 1965. с.23-66
2. Шульман З.П. Конвективный тепло-массоперенос реологически сложных жидкостей. - Москва: Энергия, 1975.- 352 с.
3. Реология. Под редакцией Ф.Эйриха.-М.:Иностранной литературы,1962. 824 с.
4. Уилкинсон У.Л. Неньютоновские жидкости. – М.: Мир, 1965. –216 с.
5. А.И. Недолужко, А.А. Недолужко Движение неньютоновской жидкости по внутренней поверхности цилиндрического бака- «Научное обозрение» №9, 2014, с. 714-717
6. Огибалов П. М., Мирзаджанзаде А. Х. Нестационарные движения вязкопластических сред. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1977.-374 с.
7. Серова Т.Б Поверка и калибровка вискозиметров : АСМС: 2007-93с.
8. Азаров Б.М., Арет В.А. Инженерная реология пищевых производств. – М.: Московский технологический институт пищевой промышленности, 1978.- 110 с.
9. Дежина И.Ю. Об одном методе решения задач реологии в лессовых просадочных грунтах // Инженерный вестник Дона, 2017, №1 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2017/4001/.
10. Семенов В.В., Асцатуров Ю.Г., Ханжонков Ю.Б. Разработка оптико-электронного устройства для контроля качества моторного масла // Инженерный вестник Дона, 2014, №3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3732/.
11. Недолужко А.И, Гарин В.М. Мельник В.В Ротационный вискозиметр.- Авторское свидетельство СССР №898294, 14.09.1981 г.
12. Yin, Z.Y., Chang C.S., Karstunen M. and Hicher P.Y., 2010. An anisotropic elasticviscoplastic model for soft clays. International Journal of Solids and Structures, 47, pp: 665-677.

13. Voynov K.N., Shwarts M.A., Belyh V.V. Prognostication and estimation of the residual period of operation for pair of friction. In Zakopane, International conf. KONMOT, vol.2, Poland. 21-30.09.2004, pp. 651-656.

References

1. Rejner M. Reologija [Rheology] «Nauka», M., 1965. pp. 23-66
 2. Shul'man Z.P. Konvektivnyj teplo. massoperenos reologicheski slozhnyh zhidkostej. [Convective heat and mass transfer reologicheskie complex fluids] Moskva: Jenergija, 1975. 352 p.
 3. Reologija.[Rheology] Pod redakciej F.Jejriha. M.:Inostr.literatury, 1962. 824 p.
 4. Uilkinson U.L. Nen'jutonovskie zhidkosti. [Non-Newtonian fluids] M.: Mir, 1965. 216 p.
 5. A.I. Nedoluzhko, A.A. Nedoluzhko Dvizhenie nen'jutonovskoj zhidkosti po vnutrennej poverhnosti cilindricheskogo baka «Nauchnoe obozrenie» №9, 2014, pp. 714-717
 6. Ogibalov P. M., Mirzadzhanzade A. H. Nestacionarnye dvizhenija vjaskoplasticheskikh sred. [Nonstationary motion of viscoplastic media] M. Izd-vo Mosk. un-ta, 1977. 374 p.
 7. Serova T.B Poverka i kalibrovka viskozimetrov. [Verification and calibration of viscometers] ASMS: 2007. 93 p.
 8. Azarov B.M., Aret V.A. Inzhenernaja reologija pishhevyh proizvodstv [Engineering rheology of food production]. M.: Moskovskij tehnologicheskij institut pishhevoj promyshlennosti, 1978. 110 p.
 9. Dezhina Ju. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2017, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2017/4001/.
 10. Semenov V.V., Ascaturov Ju.G., Hanzhonkov Ju.B. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2016, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3732/.
-



11. Nedoluzhko A.I., Garin V.M. Mel'nik V.V Rotacionnyj viskozimetr. [Rotational viscometer]. Avtorskoe svidetel'stvo SSSR №898294, 14.09.1981g.

12. Yin Z.Y., Chang C.S., Karstunen M. and Hicher P.Y., 2010. An anisotropic elasticviscoplastic model for soft clays. International Journal of Solids and Structures, 47, pp: 665-677.

13. Voynov K.N., Shwarts M.A., Belyh V.V. Prognostication and estimation of the residual period of operation for pair of friction. In Zakopane, International conf. KONMOT, vol.2, Poland. 21-30.09.2004, pp. 651-656.