

## К ИЗМЕРЕНИЮ ВЯЗКОПЛАСТИЧНЫХ СВОЙСТВ РАСТВОРА ГЛИЦЕРИНА КАПИЛЛЯРНЫМ МЕТОДОМ

*И.В. Елюхина*

**Выполнена интерпретация результатов экспериментов по изучению свойств 10%-ного раствора глицерина в воде в рамках реологической модели, включающей пластическую и нелинейно вязкую составляющие. Проведен выбор экспериментов, позволяющих уточнить как реологическую принадлежность жидкости, так и ее свойства.**

В работах [1, 2] приведены результаты, полученные с помощью капиллярного вискозиметра и указывающие, по мнению авторов, на существование предела прочности у 10%-ного раствора глицерина в воде. Основанием для последнего утверждения служит наличие участка со скоростью течения  $V \sim 0$  при малых перепадах давления  $\Delta P$  в капилляре (рис. 1). Малое число экспериментальных точек в [1, 2] не позволяет сделать достаточно точные выводы, и поэтому в настоящей работе обсудим возможные реологические модели поведения и в их рамках выполним оценку характеристик среды для проверки корректности подобного описания и выбора экспериментов, необходимых для его уточнения.

Несимметричность кривых, построенных при противоположных направлениях течения, т.е. четность функции  $|V| = |V|(\Delta P)$  (см. рис. 4.2 в [2]), позволяет предположить принадлежность раствора к тиксотропным средам. Для уточнения такого его представления следует провести дополнительные исследования, в частности, выбирая капилляры различной длины  $L$  и радиуса  $R$  (см., например, [3]). Далее будем полагать отсутствие этой гистерезисной петли, и, исходя из качественной картины (см. рис. 1), предложенной в [1], при данных условиях эксперимента будем считать раствор нелинейной вязкопластичной жидкостью.

Рассмотрим установившееся ламинарное течение в круглой цилиндрической трубе несжимаемой жидкости, реологические свойства которой описываются моделью Балкли–Гершеля

$$\tau = \tau_0 + K|\dot{\gamma}|^n; \quad (1)$$

где  $\tau_0$  – предел текучести,  $K$  и  $n$  – постоянная и показатель степенного реологического закона,  $\dot{\gamma} = dv/dr$  – скорость сдвига,  $\tau$  – модуль касательного напряжения; в цилиндрической системе координат относительно вектора скорости принято предположение:  $v_z = v(r)$  и  $v_r = v_\theta = 0$ ;  $r = 0$  – на оси трубы, т.е.  $\dot{\gamma} < 0$ . Заметим, что в [2] использован капилляр с  $L = 83 \cdot 10^{-3}$  м,  $R = 31 \cdot 10^{-5}$  м.

При течении в трубе жидкости, обладающей пределом текучести, в потоке всегда присутствует твердое ядро (рис. 2), радиус  $r_0$  которого определяется соотношением (см., например, [3])

$$r_0 = 2\tau_0 L / \Delta P. \quad (2)$$

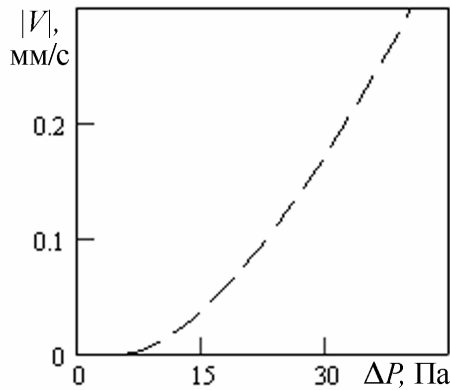
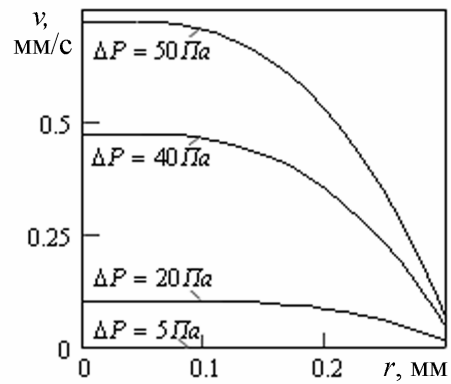
Скорость  $v(r)$  при  $r > r_0$  на рис. 2 определяется из решения дифференциального уравнения (1) при граничном условии  $v(R) = 0$ :

$$v(r) = \frac{2LK}{\Delta P} \frac{n}{n+1} \left[ \left( \frac{\tau(R) - \tau_0}{K} \right)^{\frac{1+n}{n}} + \left( \frac{\tau(r) - \tau_0}{K} \right)^{\frac{1+n}{n}} \right]; \quad (3)$$

где [3]

$$\tau(r) = \frac{r \Delta P}{2L}; \quad (4)$$

а при  $r \leq r_0$  среда движется как абсолютно твердое тело со скоростью  $v(r_0)$ .

Рис. 1. Зависимость  $|V| = |V|(\Delta P)$ Рис. 2. Профили скорости при различных  
сдвиговых напряжениях

Скорость  $V$  ввиду отсутствия ее конкретизации в [1, 2] будем предполагать равной средней скорости, которую определим как

$$|V| = \frac{Q_{мс} + Q_{мек}}{\pi R^2}, \quad Q_{\dot{\sigma} \dot{\epsilon}} = \int_{r_0}^R 2\pi r v(r) dr, \quad Q_{\dot{\sigma} \dot{\epsilon}} = \pi r_0^2 v(r_0); \quad (5)$$

где  $Q_{мек}$  – расход текучей компоненты,  $Q_{мс}$  – расход среды через твердое ядро.

Аналитическую зависимость для средней скорости  $|V| = |V|(\Delta P)$  ввиду громоздкости выражения опускаем. Значение скорости в (5), как и в (3), определялось для случая отсутствия скольжения на стенке трубы, которое можно установить экспериментально с использованием капилляров различного радиуса (см., например, [3, 4]). Оценивание неизвестных реологических свойств выполнено путем минимизации функции качества, являющейся критерием соответствия экспериментальных (см. рис. 1) и расчетных (по модели (2–5)) данных, на множестве реологических свойств среды. Были получены следующие их оценки:  $\tau_0 = 0,011 \text{ Па}$ ,  $K = 0,024 \text{ Па} \cdot \text{с}^{n-2}$ ,  $n = 0,65$ .

На отклонение кривой вязкопластичного течения от линейного закона влияют, в частности, потери давления на изменение кинетической энергии, потери напора в резервуаре, потери давления на создание обратимой деформации при наличии упругой составляющей в свойствах среды и пр. (см., например, [5]). Обсуждение подобных ситуаций позволит скорректировать реологическую модель раствора. Для подтверждения полученных значений необходимо провести другие независимые эксперименты. Так, например, в крутильно-колебательном методе (см., например, [6]) можно осуществить предельно малые напряжения и скорости сдвига, что позволяет сделать наблюдаемыми слабо неньютоновские и, в частности, слабо пластичные свойства. Оптимальные в этом плане эксперименты для указанных выше значений реологических параметров можно реализовать при циклической частоте колебаний пустого тигля  $q_0 \sim 1 \dots 10$ .

### Литература

1. Апакашев Р.А., Павлов В.В. Определение предела прочности и модуля сдвига воды при малых скоростях течения // МЖГ. – 1997. – № 1. – С. 3–7.
2. Апакашев Р.А. Выявление квазикристаллических свойств оксидных расплавов // Дис. д-ра хим. наук. – Екатеринбург: Урал. гос. горно-геол. академия, 1999. – 290 с.
3. Уилкинсон У.Л. Неньютоновские жидкости. – М: Мир, 1964. – 216 с.
4. Астарита Дж., Марручи Дж. Основы гидромеханики неньютоновских жидкостей. – М.: Мир, 1978. – 309 с.
5. Шульман З.П., Кордонский В.И. Магнито-реологический эффект. – Минск: Наука и техника, 1982. – 184 с.
6. Вяткин Г.П., Елюхина И.В. Моделирование движения вязкопластичной среды в цилиндре, совершающем затухающие крутильные колебания // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика, физика, химия». – 2005. – Вып. 5. – №2(42). – С. 100–106.

Поступила в редакцию 17 марта 2005 г.