

ОБСУЖДЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МАЯТНИКОВОГО ВИСКОЗИМЕТРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕНЬЮТОНОВСКИХ СВОЙСТВ

И.В. Елюхина

Сведений о поведении высокотемпературных сред к настоящему времени недостаточно для уверенной идентификации реологического типа, и поэтому своевременной является разработка комплекса экспериментов, позволяющих наблюдать и измерять неньютоновские свойства таких сред. В работе обсуждены возможности маятникового вискозиметра для решения подобных задач.

В рамках разработки комплекса экспериментов по изучению неньютоновских свойств высокотемпературных сред ранее были рассмотрены основные традиционные для таких жидкостей методы – крутильно-колебательный и вибрационный (см., например, [1–3]). Эти методы относятся к нестационарным; первый из них обычно используется при исследовании металлических расплавов, второй – для оксидных и шлаковых систем. С позиций неньютоновости были интерпретированы данные, получаемые с помощью стационарной капиллярной вискозиметрии (см., например, [4]), также приемлемой для сред с рабочими температурами ~ 1200–2000 К. Теперь обратимся еще к одному из возможных для решения подобных задач нестационарному методу – маятниковому (см., например, [5, 6]).

Пусть тонкая пластинка с площадью поверхности S подвешена с помощью подвесной системы, имеющей момент инерции I и крутильную жесткость K , и совершает вокруг точки подвеса колебания в своей плоскости с периодом τ_0 и декрементом затухания колебаний δ_0 . При помещении ее в жидкость вследствие увлечения среды ускоренно движущейся пластиной возрастает эффективный момент инерции подвесной системы, увеличивается период колебаний: $\tau > \tau_0$, и вследствие дополнительной диссипации механической энергии, обусловленной вязким трением между подвергаемыми сдвигу слоями жидкости, растет скорость затухания колебаний: $\delta > \delta_0$. Задача заключается в предсказании закона колебаний $\alpha = \alpha(t)$: зависимости от времени t угла поворота α маятника, помещенного в неньютоновскую среду массой M , и является сопряженной: движение пластины непосредственно связано с возбуждаемым ей движением среды.

Примем положения, традиционно используемые в этом методе, как то: амплитуды колебаний малы, маятник имеет большую длину – что в свою очередь позволяет допустить, что пластинка совершает плоскопараллельное движение. Краевыми эффектами здесь также пренебрегаем. Тогда математическая модель будет иметь вид:

– уравнение движения маятника [5]

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} + \frac{rl^2}{I} \frac{d\alpha}{dt} + \frac{(mg\ell_c + K)}{I} \alpha = \frac{F_{\delta} \delta \ell}{I}; \quad (1)$$

– уравнение движения жидкости

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z}; \quad (2)$$

– начально-краевые условия для (1, 2)

$$d\alpha/dt|_{t=0} = 0, \alpha(0) = \alpha_0, V(z, 0) = 0, V(0, t) = d\alpha/dt \cdot \ell, V(\infty, t) = 0; \quad (3)$$

Легко заметить, что при данной постановке и допущениях задача эквивалентна задаче для вибрационного вискозиметра, совершающего затухающие колебания (за тем исключением, что в последнем случае $A = Sdp/m$, где m – масса подвесной системы). Поэтому для дальнейшего обсуждения возможностей маятникового вискозиметра следует обратиться к соответствующим работам по вибрационному методу (к примеру, [2]). Для сравнения заметим также, что для маятникового вискозиметра параметры колебаний в отсутствие среды равны

$$\tau_0^2 = \frac{4\pi^2 I^2}{I(mg\ell_c + K) - 0,25r^2 l^4}, \quad \delta_0 = \frac{1}{2} \frac{r\ell^2 \tau_0}{I}; \quad (11)$$

для вибрационного вискозиметра –

$$\tau_0^2 = \frac{4\pi^2 m^2}{m\gamma - 0,25r^2}, \quad \delta_0 = \frac{1}{2} \frac{r\tau_0}{m}, \quad (12)$$

где γ – жесткость упругого элемента.

Отдельно отметим, что помимо вектора состояния системы (величин U и ξ в (8, 9)) и пространственно-временных координат (T и ζ) в систему уравнений входит только один параметр – A , безразмерный комплекс, характеризующий свойства среды и условия эксперимента, объединяющий все параметры установки. Изменение A позволяет варьировать условия эксперимента и выбирать оптимальные, определяемые совокупностью причин, как-то: достаточным числом колебаний до момента, после которого уверенная регистрация α невозможна; значительным изменением периода и декремента затухания в процессе колебаний – для большей наблюдаемости неньютоновских эффектов; чувствительностью оценок реологических свойств среды к ошибкам в измеряемых в эксперименте параметрах и др.

Маятниковый метод математически подобен вибрационному для режима установившихся колебаний, но технически он реализуется иначе, в частности, обладает различными с вибрационным методом возможностями для изменения условий эксперимента, измерения наблюдаемых в опыте параметров, отклика на шум, организации переходных процессов и пр. В связи с этим экспериментатору при выявлении неньютоновских свойств высокотемпературных сред полезно иметь в распоряжении и такую экспериментальную базу для проверки согласованности получаемых данных этим методом и иными.

Литература

1. Елюхина И.В. Оценивание свойств неньютоновских сред крутильно-колебательным методом // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2004. – Вып. 4. – № 8(37). – С. 18–21.
2. Елюхина И.В. Вибрационный метод затухающих колебаний для измерения свойств ньютоновских и неньютоновских сред // Тр. XI Рос. конф. «Строение и свойства металлических и шлаковых расплавов». – Екатеринбург, 2004. – Т. 2. – С. 223–227.
3. Вяткин Г.П., Елюхина И.В. Идентификация нелинейно вязких и вязкопластичных свойств вибрационным методом // Матер. 22 симп. по реологии. – М.: ИНХС РАН, 2004. – С. 29.
4. Елюхина И.В. К измерению вязкопластичных свойств раствора глицерина капиллярным методом // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика, физика, химия». – 2005. – Вып. 5. – №2(42). – С. 110–111.
5. Росин Г.С. Маятниковый вискозиметр // Завод. лаб. – 1967. – Т. 33. – №8. – С. 1027–1028.
6. Шпильрайн Э.Э., Фомин В.А., Сквородько С.Н., Сокол Г.Ф. Исследование вязкости жидких металлов. – М.: Наука, 1983. – 243 с.

Поступила в редакцию 19 марта 2005 г.