

И. А. БЕРЕЖНОЙ, Н. В. ГЕРАСИМОВ, Д. Д. ИВЛЕВ, В. И. ЦЕЙЛЕР
О ТЕЧЕНИИ ЖИДКОСТИ С УПРАВЛЯЕМОЙ ВЯЗКОСТЬЮ

(Представлено академиком Ю. Н. Работновым 18 XI 1974)

Изучение взаимодействия поля с веществом позволяет рассматривать более широкий класс сплошных сред, например, взаимодействие поля со сплошной средой дает возможность рассматривать сплошную среду с управляемыми параметрами. К таким средам можно отнести магнитовязкие жидкости, изучение которых было начато группой Розенцвайга ⁽¹⁾, электровязкие жидкости ⁽²⁾ и т. п.

В настоящей работе обсуждается поведение жидкостей с управляемой вязкостью, находящихся в переменном силовом поле касательных напряжений и переменном магнитном или электрическом поле.

Рассмотрим одномерное течение, например, феррожидкости, представляющей собой мелкодисперсную суспензию ферромагнетиков в жидкой среде. При небольшой концентрации мелкодисперсной металлической фазы течение феррожидкости можно считать ньютоновским ⁽³⁾. Не рассматривая магнитного взаимодействия и термодинамических соотношений, полагаем, что напряжения σ в ней пропорциональны скорости деформации $\dot{\epsilon}$:

$$\sigma = \mu(H) \dot{\epsilon}, \quad (1)$$

где вязкость μ является функцией напряженности магнитного поля H .

Пусть действует периодическое силовое поле касательных напряжений

$$\sigma = \sigma \sin(\omega t + \varphi), \quad (2)$$

когда феррожидкость находится в однородном магнитном поле, напряженность H которого меняется с частотой изменения напряжений силового поля,

$$H = H_0(1 + \lambda \sin \omega t), \quad \lambda \in [0, 1). \quad (3)$$

Пологая зависимость вязкости от напряженности линейной и пренебрегая временем релаксации намагниченности жидкости, получим

$$\dot{\epsilon}(t) = \frac{\sigma_0 \sin(\omega t + \varphi)}{\mu_0(1 + \lambda \sin \omega t)}. \quad (4)$$

Решение этого уравнения имеет вид

$$\begin{aligned} \epsilon = \epsilon(0) + \frac{\sin \varphi}{\lambda} \ln(1 + \lambda \sin \omega t) + \\ + \frac{\cos \varphi}{\lambda} \left[\omega t - \frac{2}{\sqrt{1 - \lambda^2}} \left(\operatorname{Arctg} \frac{\operatorname{tg} 0,5 \omega t}{\sqrt{1 - \lambda^2}} + \operatorname{arctg} \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \lambda^2}} \right) \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

Фазовые траектории на рис. 1 иллюстрируют поведение феррожидкости, находящейся в переменном магнитном поле (3) при периодическом силовом нагружении (2). Эти фазовые траектории свидетельствуют о наличии постоянной составляющей скорости деформации, величину которой

легко определить из (4):

$$\langle \dot{\varepsilon} \rangle = \frac{\sigma_0 \cos \varphi}{\mu_0 \lambda} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 - \lambda^2}} \right). \quad (6)$$

Поведение более сложных моделей сплошных сред с переменными определяющими параметрами рассмотрено в работе (4).

Средой с переменной вязкостью в нашем эксперименте служила мелко-дисперсная суспензия ферромагнетиков в керосине с добавлением олеиновой кислоты.

Если такую среду (феррожидкость) поместить в плоскую кювету (см. рис. 2), находящуюся между полюсами электромагнита, и внутри этой

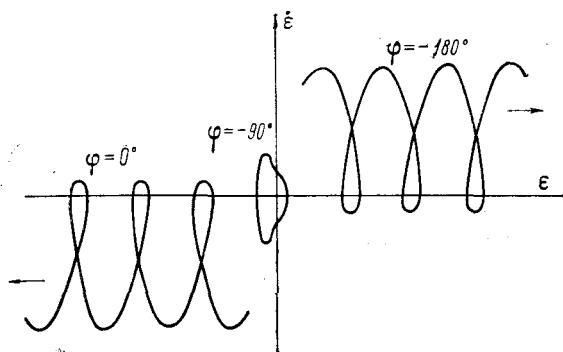


Рис. 1

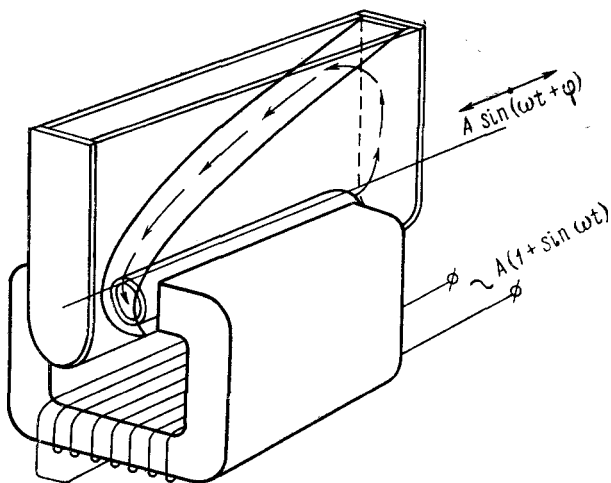


Рис. 2

кюветы установить трубку, совершающую осевое возвратно-поступательное движение, то появление постоянной составляющей скорости (6) можно наблюдать экспериментально.

Наблюдения показали, что при сдвиге фазы $\varphi = 0$ первоначально горизонтальный уровень феррожидкости стал параболическим с вершиной, обращенной влево (см. рис. 3). Изменение уровня вызвано созданием скоростного напора на выходе трубки. Траектория движения феррожидкости показана на рис. 2 стрелками. Фазовому углу $\varphi = 90^\circ$ соответствует горизонтальный уровень жидкости; при установке фазового угла $\varphi = 180^\circ$ наклон уровня меняется на противоположный и соответствует параболе с вершиной, обращенной вправо, аналогично рис. 3.

Качественно экспериментальный результат вполне согласуется с теоретическим. Как следует из (6), при $\varphi=0$ постоянная составляющая скорости деформации имеет максимальное значение и экспериментальный результат дает максимальный наклон уровня феррожидкости. При $\varphi=90^\circ$, $\cos \varphi=0$ постоянная составляющая отсутствует. В эксперименте этому слу-

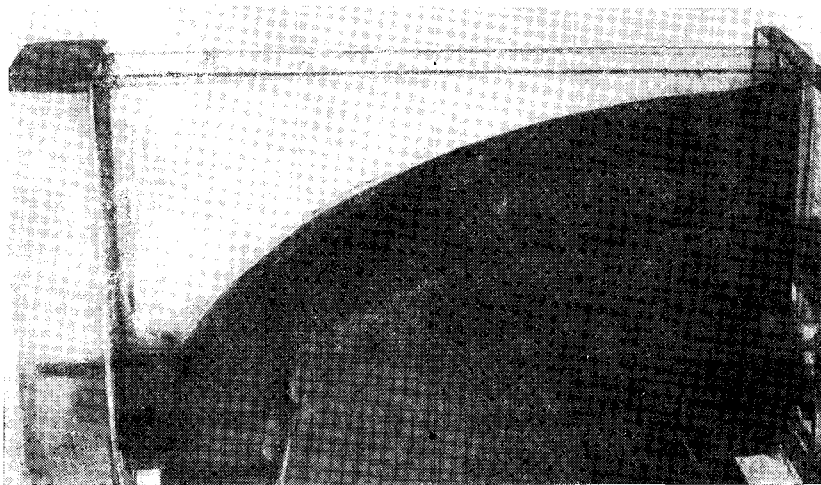


Рис. 3

чаю соответствует горизонтальный уровень жидкости. При фазовом сдвиге $\varphi=180^\circ$ происходит смена знака постоянной составляющей скорости деформации и эксперимент дает смену угла наклона жидкости, причем угол наклона опять максимальный.

Эти эффекты могут быть положены в основу ряда полезных технических приложений, так, например, можно предложить насос для создания управляемого течения магнито- и электровязких жидкостей ⁽⁵⁾.

Поступило
11 XI 1974

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ J. L. Neuringer, R. E. Rosensweig, Phys. Fluids, v. 7, № 12 (1964). ² D. L. Klass, T. W. Wartinek, J. Appl. Phys., v. 38, № 1 (1967). ³ Е. Н. Мозговой, Э. Я. Блум, А. О. Цеберс, Магнитная гидродинамика, № 1, 61 (1973). ⁴ И. А. Бережной, Н. В. Герасимов, Д. Д. Ивлев, Мех. тверд. тела, № 1, 36 (1974). ⁵ И. А. Бережной, Н. В. Герасимов, Д. Д. Ивлев, Авт. свид. № 384183 (1973).