

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНОГО РЕОЛОГИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ

**А. В. Михневич, Н. Н. Михневич**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»,  
кафедра «Гидропневмоавтоматика»*

**Т. Л. Романькова**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»,  
кафедра «Информационные технологии»*

В современных гидравлических системах все чаще используют жидкости со сложными механизмами течения [1], [2]. Изучение реологического поведения таких жидкостей в соответствующих курсах («Механика жидкости и газа», «Рабочие жидкости, смазочные материалы и УГПС») вызывает у студентов определенные объективные трудности.

Во-первых, достаточно сложными являются реологические уравнения неньютоновских жидкостей. Во-вторых, студентам трудно наглядно представить себе жидкость, у которой не только вязкостная характеристика зависит от многих факторов (кроме температуры и давления, от скорости сдвига, времени и т. д.), но которая обладает подобно твердым телам пластичностью и упругостью (вязкопластичные, псевдопластичные, дилатантные, реопексные, вязкоупругие и т. п.).

Система реологических уравнений (1) является моделью вязко-упруго-пластического смазочного слоя в зоне контакта:

$$\left. \begin{aligned} P_{ij} &= \frac{E}{1+\nu} \varepsilon_{ij}^{(e)} + \frac{\nu \cdot P_{ij} \cdot g_{ij}}{1+\nu} + 2\mu_0 \dot{\varepsilon}_{ij}^{(e)}, \\ \left\{ \begin{aligned} P_{ij} &= -p \cdot g_{ij} + 2 \left( \mu_0 + \frac{\tau_0}{(2\dot{\varepsilon}_{km}^{(p)} \cdot \dot{\varepsilon}_{km}^{(p)})^{0,5}} \right) \dot{\varepsilon}_{ij}^{(p)}, \\ &\text{при } \frac{1}{2} (P_{ij} \cdot P_{ji}) > \tau_0^2, \\ \dot{\varepsilon}_{ij}^{(p)} &= 0 \quad \text{при } \frac{1}{2} (P_{ij} \cdot P_{ji}) \leq \tau_0^2, \end{aligned} \right\} & (1) \\ \varepsilon_{ij}^{(e)} + \varepsilon_{ij}^{(p)} &= \varepsilon_{ij}, \\ \dot{\varepsilon}_{ij}^{(e)} + \dot{\varepsilon}_{ij}^{(p)} &= \dot{\varepsilon}_{ij}, \end{aligned} \right\}$$

где  $\varepsilon_{ij}$  – тензор полных деформаций в смазочном слое.

Для обеспечения анализа реологически сложной среды, представленной системой (1), разработана структурная диаграмма (рис. 1). Данная диаграмма состоит из трех основных элементов: механического эквивалента упругости (поз. 1), механического эквивалента пластичности (поз. 2) и механического эквивалента вязкого течения (поз. 3).

Принцип действия предлагаемой механической модели состоит в следующем. При приложении внешней нагрузки  $F$  развивается только упругая деформация в

элементе упругости 1, кинетически заторможенная элементом вязкости 3, если возникающие касательные напряжения в слое не превышают предела текучести  $\tau_0$  элемента пластичности 2.

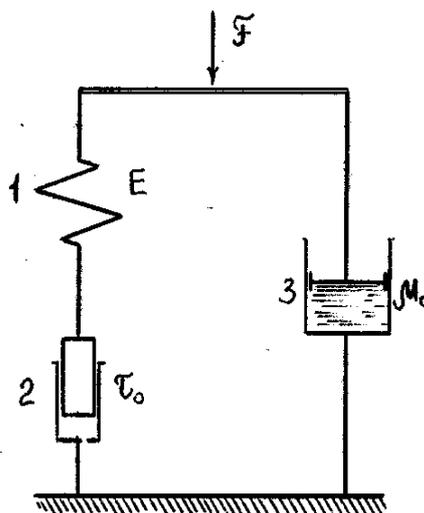


Рис. 1. Структурная диаграмма вязко-упруго-пластичности смазочного слоя: 1 – эквивалент упругости ( $E$  – модуль Юнга); 2 – эквивалент пластичности ( $\tau_0$  – предел текучести); 3 – эквивалент вязкого течения ( $\mu_0$  – обобщенный коэффициент вязкости);  $F$  – внешняя нагрузка

Если касательные напряжения в слое, обусловленные внешней нагрузкой  $F$ , превышают предел текучести  $\tau_0$  элемента пластичности, то развивается также пластическая деформация (пластическое течение) элемента пластичности 2, аддитивная упругой деформации элемента упругости 1, также кинетически заторможенная элементом вязкости 3.

Для упрощения математического описания и демонстрации механической аналогии был сделан ряд допущений, правомерность которых в некоторой степени дискуссионна: пластическая и упругая деформации в смазочном слое развиваются независимо друг от друга; явление «упрочнения» слоя (т. е. повышения предела текучести  $\tau_0$ ) при уменьшении его толщины может учитываться зависимостью  $\tau_0$  от толщины слоя  $\delta$ . В целом это допущение является общепринятым в механике сложных сред.

В настоящее время на базе платформы.NET разрабатывается компьютерная программа, позволяющая наглядно продемонстрировать студентам реологическое поведение вязко-упруго-пластичной жидкости с использованием механической модели, схема которой приведена на рис. 1. Благодаря возможности варьировать исходные данные, а также применению эффектов анимации, преподаватель может сопровождать изложение материала визуальной демонстрацией влияния характеристик жидкости на ее поведение при приложении внешней нагрузки. Данная программа может использоваться как при чтении лекций с использованием мультимедийных средств обучения, так и в самостоятельной работе студентов. Рассматривается также возможность расширения функций создаваемого приложения, что позволит проводить исследование поведения вязко-упруго-пластического смазочного слоя на основе математической модели, представленной системой уравнений (1).