

# **МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНОГО РЕОЛОГИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ**

**В. В. Игнатенко, Е. А. Гапоненко, Е. Г. Сорокин**

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

Научные руководители: А. В. Михневич, Т. Л. Романькова

Целью данной работы является моделирование сложного реологического поведения жидкостей, используемых в современных гидравлических системах, с помощью механических аналогий.

Всесторонней характеристикой реологического поведения неньютоновских жидкостей пожелает служить предлагаемая авторами структурная диаграмма, состоящая из трех основных элементов: механический эквивалент упругости; механический эквивалент пластичности; механический эквивалент вязкого течения. Таким образом, предлагаемая механическая аналогия будет имитировать поведение вязкоупруго-пластичной сплошной среды. Математическое описание такой среды предложено в виде системы уравнения (1).

$$\left. \begin{aligned}
 p_{ij} &= \frac{E}{1+\nu} * \varepsilon_{ij}^{(e)} + \frac{\nu * P_{kk} * q_{ij}}{1+\nu} + 2 * \mu_0 * \varepsilon_{ij}^{(e)} \\
 p_{ij} &= -P * q_{ij} + 2 * \left\{ \mu_0 + \frac{\tau_0}{\sqrt{2 * \varepsilon_{km}^{(p)} * \varepsilon_{km}^{(p)}}} \right\} * \varepsilon_{ij}^{(e)} \\
 &\text{при } \frac{1}{2} * (P_{ij} * P_{ij}) > \tau_0^2 \\
 \varepsilon_{ij}^{(p)} &= 0 \\
 &\text{при } \frac{1}{2} * (P_{ij} * P_{ij}) \leq \tau_0^2 \\
 \varepsilon_{ij}^{(e)} + \varepsilon_{ij}^{(s)} &= \varepsilon_{ij} \\
 \varepsilon_{ij}^{(e)} + \varepsilon_{ij}^{(s)} &= \varepsilon'_{ij}
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

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

Предлагаемая механическая аналогия представлена на рис. 1.

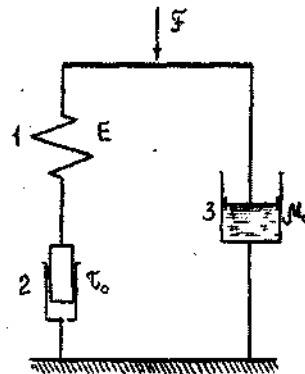


Рис. 1. Структурная диаграмма вязко-упруго-пластичности смазочного слоя: 1 – эквивалент упругости ( $E$  – модуль Юнга); 2 – эквивалент пластичности ( $\tau_0$  – предел текучести); 3 – эквивалент вязкого течения ( $\mu_0$  – обобщенный коэффициент вязкости);  $F$  – внешняя нагрузка

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 воз-

никающие касательные напряжения в слое не превышают предела текучести  $\tau_0$  элемента пластичности 2.

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.

По мере увеличения нагрузки и уменьшения толщины слоя ослабляется зависимость толщины слоя от прилагаемой нагрузки, т. е. разделительный слой становится более твердообразным - повышается предел текучести слоя и, соответственно, повышается сопротивление нормальным нагрузкам.

Так как деформации упругого и пластического деформирования материала аддитивны, то на приведенной диаграмме эквивалентность упругости и пластичности соединены последовательно.

Развитие упругих и пластических деформаций в слое кинематически заторможено проявлением вязкостных свойств среды; поэтому эквивалент вязкого трения параллелен элементам упругости и пластичности.

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  $\chi_0$  от толщины слоя  $b$ . В целом это допущение является общепринятым в механике сложных сред.

Предлагаемая структурная диаграмма допускает экспериментально наблюдаемое изменение реологических характеристик (упругости, пластичности и вязкости) при увеличении нагрузки  $F$ .

Для иллюстрации поведения сложных неньютоновских жидкостей, в частности, смазочных материалов, разработана программа, которая на базе описанной выше механической модели позволяет продемонстрировать вязкую, упругую и пластичную составляющие жидкостей при различных нагрузках (рис. 2).

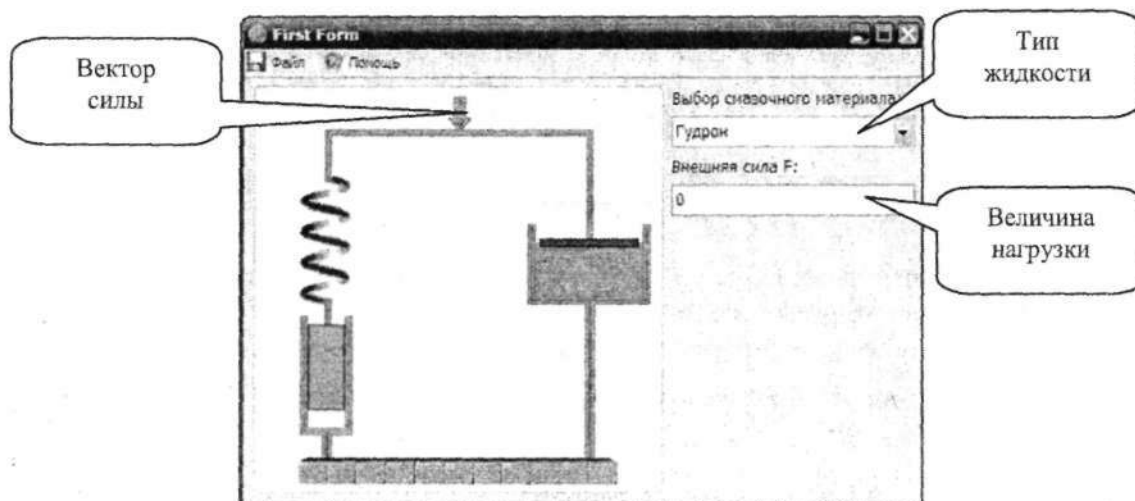


Рис. 2. Главная форма программы

Разработанное приложение позволяет наблюдать реакцию различных жидкостей в зависимости от приложенной нагрузки. Для этого необходимо выбрать тип жидкости из списка, затем либо задать значение силы, действующей на жидкость, в специальном поле, либо переместить вектор силы, используя мышь. На графическом поле отобразятся изменения, которые и будут демонстрировать реакцию.

На данном этапе имеется возможность демонстрации поведения трех жидкостей: гудрон, МС-20 и ВМ. При необходимости можно увеличить количество исследуемых жидкостей, создав файл со справочной информацией.

Изменение изображения зависит от типа жидкости, т. е. от коэффициента (предел текучести). Пока сила  $F$  будет меньше предела текучести, материал деформироваться не будет. Как только сила достигает предела текучести и превышает его, происходит деформация материала, проявляются его пластичные свойства.

Данная программа может использоваться для разных целей. Например, в учебном процессе при изложении лектором материала лекции. Это может упростить обучение, так как будут наглядно показаны свойства таких систем. Также программу можно использовать для ознакомительных целей студентами, будущими специалистами в данной области. В ближайшее время в программе планируется реализовать математическую модель, что позволит проводить исследования влияния нагрузок на толщину смазочного слоя и, следовательно, программа будет иметь практическое значение.

Таким образом, разработанная структурная диаграмма (механическая аналогия) составных реологических моделей (вязкопластичные, вязкоупругие, псевдопластичные и т. п. жидкости) значительно облегчает анализ реологического поведения сложных неньютоновских сред, а также синтез математического описания их реологических моделей.

### Литература

1. Михневич, А. В. Исследование утечек жидкости в поршневых парах гидромашин / А. В. Михневич, Н. Н. Михневич // Машиноведение-2008 : тез. докл. VII Междунар. науч.-техн. конф., 23-24 окт. 2008 г. / Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. - Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2008. - С. 128-129.
2. Михневич, А. В. Исследование утечек жидкости в поршневых парах гидромашин / А. В. Михневич, Н. Н. Михневич // Машиноведение-2008 : тез. докл. VII Междунар. науч.-техн. конф., 23-24 окт. 2008 г. / Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. - Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2008. - С. 129-130.