

Профессор В.Н. Колодежнов

(Воронеж. гос. ун-т инж. технол.) кафедра теоретической механики,
тел. (473) 255-55-57

Механический аналог реологических моделей, демонстрирующих проявление эффекта “отвердевания”

Приводится описание механизма с поведением, подобным поведению жидкости с «отвердеванием» при сдвиге.

The mechanism description with the behavior similar to behavior of liquid with "hardening" at shift is provided.

Ключевые слова: реологическая модель, механический аналог.

Реальные сплошные среды демонстрируют самые разные механические свойства: вязкие, упругие и пластические [1-5]. Для их описания, как правило, используют три базовые механические модели.

Вязкие свойства описывают реологической моделью Ньютона, которая в самом простом варианте предполагает линейную зависимость между касательным напряжением τ и скоростью сдвига $\dot{\gamma}$

$$\tau = \mu \cdot \dot{\gamma}; \quad \mu = \text{const},$$

где μ - коэффициент динамической вязкости.

В более сложных моделях нелинейно-вязких жидкостей предполагается, что динамическая вязкость непостоянна и представляет собой некоторую функцию инвариантов тензора скоростей деформаций либо для одномерных сдвиговых течений скорости сдвига. На соответствующих схемах реологических моделей вязкие элементы обозначают в виде цилиндра с поршнем (рис. 1, а).

Упругие свойства описывают реологической моделью Гука, предполагающей пропорциональность касательного напряжения τ деформации сдвига γ

$$\tau = G \cdot \gamma; \quad G = \text{const},$$

где G - модуль упругости (сдвига).

На схемах реологических моделей упругие элементы изображают пружинами (рис.1, б).

И, наконец, пластические свойства описывают моделью сухого трения Сен-Венана. В соответствии с этой моделью течение сплошной среды отсутствует, если касательное

напряжение не превышает так называемого напряжения сдвига τ_{plast} . На схемах реологических моделей элементы с сухим трением обозначают в виде двух, допускающих скольжение друг по отношению к другу, пластин (рис. 1, в).

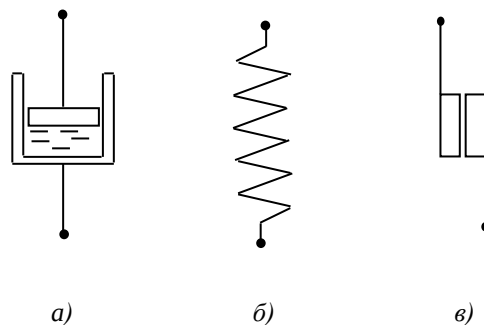


Рис.1. Базовые модели реологического поведения сплошных сред: а – модель вязкой жидкости Ньютона; б – модель упругого тела Гука; в - модель пластической среды Сен-Венана

Комбинирование этих базовых моделей позволяет создавать и более сложные модели, описывающие, например, вязкоупругое, вязкопластическое и другие варианты поведения сплошных сред.

Однако проводившиеся в последнее время исследования по реологии и полученные в ходе результаты указывают на некоторые новые явления, которые не всегда можно описать даже в рамках комбинирования указанных выше трех основных реологических моделей.

В этой связи возникает необходимость несколько расширить существующий арсенал базовых реологических моделей, описывающих поведение сплошных сред. В частности,

речь пойдет о моделировании выявленного в последнее время явления, которое можно назвать эффектом “отвердевания”.

Эффект “отвердевания”. Суспензии мелкодисперсных частиц при определенных размерах и концентрации демонстрируют аномально высокое дилатантное поведение [6, 7].

Сущность такой аномалии заключается в следующем. При приближении модуля скорости сдвига к некоторому критическому значению ($|\dot{\gamma}| \rightarrow \dot{\gamma}_{crit}$) крутизна кривой течения $\tau = \tau(\dot{\gamma})$ неограниченно возрастает. Поскольку именно эта характеристика определяет вязкие свойства жидкости, такое поведение жидкости можно интерпретировать как проявление эффекта “отвердевания”.

При этом речь идет о конечных по величине значениях скорости сдвига и касательного напряжения. Заметим, что, по крайней мере, на уровне традиционной математической модели дилатантных жидкостей со степенным законом вязкости ее неограниченно большие значения достигаются при бесконечно больших значениях скорости сдвига.

Некоторые возможные варианты реологических моделей нелинейно-вязких жидкостей, демонстрирующих проявление эффекта “отвердевания”, приводятся в [8, 9].

Механический аналог системы, демонстрирующей проявление эффекта “отвердевания”. Сразу же заметим, что речь здесь идет не о физической модели, объясняющей проявление эффекта “отвердевания” на основе взаимодействия “коллектива” мелкодисперсных частиц.

В качестве примера механической системы, которая предполагает “заклинивание” на определенных режимах функционирования, рассмотрим устройство на рис. 2.

Основу устройства составляет барабан 1, помещенный в сосуд 2, заполненный вязкой сплошной средой 3. В радиальных каналах барабана размещаются подпружиненные подвижные элементы 4. В нормальном состоянии пружины 5, будучи растянутыми, максимально смещают подвижные элементы 4 к оси барабана 1.

На стенках полости 2 выполнены выступы 6, ограничивающие вращение барабана в случае, когда подвижные элементы 4 будут максимально смещены в каналах от оси вращения к периферии.

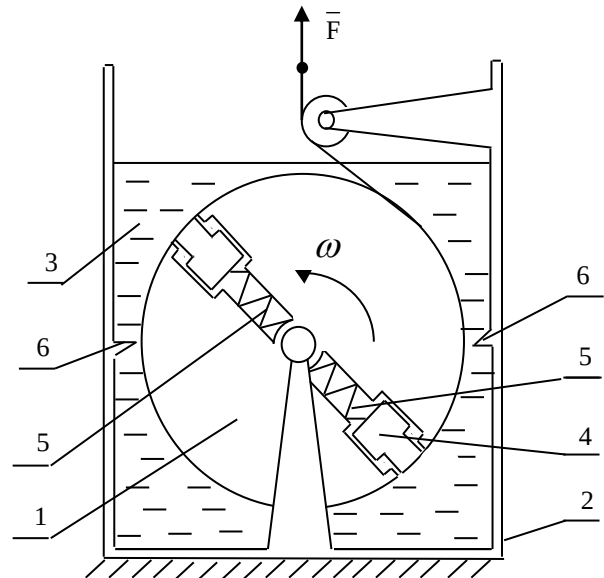


Рис. 2. Схема устройства, предполагающего возможность “заклинивания” барабана

Динамическое поведение такого устройства схоже с поведением вязкой жидкости, демонстрирующей проявление эффекта “отвердевания”.

Действительно, при сравнительно небольших угловых скоростях ω вращения, когда переносная сила инерции не будет превышать силы упругости пружины, подвижные элементы будут максимально смещены к оси вращения. В такой ситуации вращение ротора в вязкой сплошной среде будет имитировать вязкое поведение рассматриваемой жидкости.

При достижении некоторой критической скорости вращения (связанной в установившемся режиме с соответствующим критическим значением силы F_{crit}) подвижные элементы окажутся выдвинутыми за пределы обода барабана и обеспечат его “заклинивание”.

Задаваясь определенным значением силы трения между выступом и выдвинутым элементом, связанным с приложенной силой F , можно даже после остановки барабана обеспечить контактирование (прижим) выдвинутых элементов с выступами. Применительно в реологической модели вязкой жидкости, для которой рассматриваемое устройство выступает в качестве механического аналога, такая ситуация может интерпретироваться именно как проявление эффекта “отвердевания”. При этом дальнейшее деформирование жидкости приостанавливается.

Если же после этого значение силы F снизится ниже уровня F_{crit} , пружины, преодолевая силы трения, втянут подвижные элементы внутрь обода барабана и система возвратится в исходный режим вращения барабана под действием силы F и момента сил вязкого сопротивления сплошной среды.

Сразу же оговоримся, что приведенное описание функционирования устройства (механического аналога реологической модели) носит исключительно качественный характер. Что же касается математической модели динамики такого устройства, то она здесь не приводится, как не относящаяся напрямую к обсуждаемым реологическим моделям.

Поскольку базовые модели (см. рис. 1) не позволяют описывать эффекты отвердевания, предлагается дополнить их еще одним элементом. В качестве обозначения для такого элемента предлагается принять условное изображение устройства на рис. 2.

Пример реологической модели вязкопластической жидкости, демонстрирующей проявление эффекта “отвердевания”. Комбинируя известные базовые модели сплошных сред, можно получать более сложные модели.

В качестве примера на рис. 3 представлен механический аналог реологической модели гипотетической вязкопластической среды, поведение которой предполагает демонстрацию эффекта “отвердевания.”

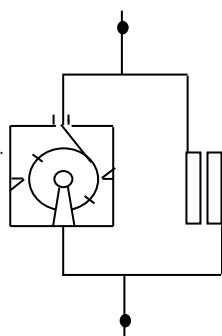


Рис. 3. Механический аналог реологической модели вязкопластической сплошной среды, демонстрирующей эффект “отвердевания”

Согласно этой модели при выполнении условия $\tau < \tau_{plast}$ течение будет отсутствовать. При этом в тех зонах области течения, где выполняется такое условие, жидкость будет вести себя подобно твердому телу. В случае же выполнения условия $\tau > \tau_{plast}$ будет иметь

место течение. Однако при $|\dot{\gamma}| \rightarrow \dot{\gamma}_{crit}$ начнет проявляться эффект “отвердевания” и снова в соответствующих зонах жидкость начнет вести себя подобно твердому телу.

Рассмотренный выше аналог механической системы может быть принят в качестве дополнения к уже известным базовым моделям с целью более полного описания реологического поведения нелинейно-вязких жидкостей, демонстрирующих появление эффекта “отвердевания”

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ, проект № 12-08-00629а.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лодж, А.С. Эластичные жидкости [Текст] / А.С. Лодж. – М.: Наука, 1969. – 464 с.
2. Виноградов, Г.В. Реология полимеров [Текст] / Г.В. Виноградов, А.Я. Малкин. – М.: Химия, 1977. – 440 с.
3. Вялов, С.С. Реологические основы механики грунтов [Текст] / С.С. Вялов. – М.: Высшая школа, 1978. – 447 с.
4. Астарита, Дж. Основы гидродинамики неньютоновских жидкостей [Текст] / Дж. Астарита, Дж. Марруччи. – М.: Мир, 1978. – 311 с.
5. Литвинов, В.Г. Движение нелинейно-вязкой жидкости [Текст] / В.Г. Литвинов. – М.: Наука. 1982. – 376 с.
6. Lee Y.S., Wagner N.J. Rheological Properties and Small – Angle Neutron Scattering of Shear Thickening, Nanoparticle Dispersion at High Shear Rates. // Ind. Eng. Chem. Res., 2006, Vol. 45, № 21, P. 7015 – 7024.
7. Wisniewski A. Nanotechnology for increase of body protection capability. – URL :<http://www.witu.mil.pl/www/biuletyn/zeszyty/20080107p/7.pdf> . Дата обращения: 31.08.2012.
8. Колодежнов, В.Н. Течение в плоском канале дилатантной жидкости с эффектом “отвердевания” [Текст] / В.Н. Колодежнов // Обозрение прикладной и промышленной математики. 2010. Т.17. Вып. 3. - С. 422.
9. Колодежнов, В.Н. Особенности течения в цилиндрическом канале жидкости, реологическая модель которой учитывает эффект “отвердевания” [Текст] / В.Н. Колодежнов // Обозрение прикладной и промышленной математики. 2011. Т. 18. Вып. 2. -С. 283 - 284.