

Свойства и возможности нелинейной модели сдвигового течения тиксотропных вязкоупругопластичных сред

Докладчик: Гулин Вячеслав Владимирович
Научный руководитель: к.т.н. Хохлов Андрей Владимирович

Доклад посвящён систематическому исследованию нелинейной модели максвелловского типа для описания сдвигового деформирования тиксотропных сред, описывающей взаимное влияние процесса деформирования и эволюции структуры материала [1]. Модель ориентирована на описание широкого класса структурированных систем – растворов и расплавов полимеров, дисперсий, тяжёлой нефти, битумных вяжущих, буровых растворов, коллоидных систем, гелей и других.

Эволюция состояния среды в одномерном случае (простой сдвиг) описывается системой уравнений:

$$\begin{aligned}\dot{\gamma} &= \dot{\tau}/G(w) + \tau/\eta(w), \quad \dot{w} = k_1(1-w) - k_2g(\tau)w, \\ G(w) &= G_0 \exp(\beta w), \quad \eta(w) = \eta_0 \exp(\alpha w)\end{aligned}\tag{1}$$

где γ – деформация сдвига, τ – касательное напряжение, $G(w)$ и $\eta(w)$ – модуль сдвига и вязкость, зависящие от структурированности $w(t)$, k_1 и $k_2g(\tau)$ – скорость образования и разрушения структуры. Материальная функция $g(\tau)$ описывает ускорение разрушения структуры с ростом напряжения. Здесь G_0 , η_0 – характерные (минимальные) значения модуля сдвига и вязкости, α и β – параметры чувствительности вязкости и модуля к структурированности. Разрушение структуры определяется напряжением, а не скоростью сдвига, что принципиально отличает модель от большинства известных аналогов.

В докладе будут представлены результаты исследования модели в следующих направлениях:

- равновесные состояния и свойства кривых течения (вязкости) [2], [10];
- фазовые портреты и классификация типов положения равновесия [2], [3];
- отклики на программы по деформации и по напряжению (диаграммы деформирования [4], [5], [10], кривые релаксации [5], [8], [10], ползучести и восстановления [6], [7], [10]);

- отклик на синусоидальную деформацию [9].

Намечены результаты и перспективы трёхмерного обобщения модели на произвольное деформирование несжимаемой среды.

Вычислительное исследование (методом численного интегрирования задачи Коши) модели в широком наборе режимов нагружения показало, что единый механизм (обратная связь между напряжением и эволюцией параметра структурированности w) порождает непрерывный спектр поведения от жидкообразного до твердообразного. С одной стороны, модель воспроизводит псевдопластическую кривую течения с двумя ньютоновскими вязкостями и вязкоупругий отклик; с другой – зуб текучести на диаграммах деформирования и кажущуюся ненулевую асимптоту кривых релаксации (признак твердообразной среды). Обнаружен ряд тонких нелинейных эффектов эволюции структуры – в том числе убывающий участок неравновесной кривой течения, дающий вариант объяснения аномалий, обычно толкуемых как нестабильность течения, и спонтанное нарушение симметрии отклика при синусоидальном деформировании. Установлено качественное соответствие порождаемых моделью кривых данным для растворов полимеров, битумных вяжущих и ряда структурированных систем; представлена частичная идентификация параметров модели по данным для водного раствора полимера различной концентрации.

Исследование опирается на основополагающую работу [1] и развёрнуто в девяти публикациях 2023–2026 гг. [2]–[10].

- [1] Столин А.М., Хохлов А.В. Нелинейная модель сдвигового течения тиксотропных вязкоупругопластичных сред, учитывающая эволюцию структуры, и её анализ // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 1: Математика. Механика*. 2022. № 5. С. 31–39.
- [2] Хохлов А.В., Гулин В.В. Анализ свойств нелинейной модели сдвигового течения тиксотропных сред, учитывающей взаимное влияние эволюции структуры и процесса деформирования // *Физическая мезомеханика*. 2023. Т. 26, № 4. С. 41–63.
- [3] Khokhlov A.V., Gulin V.V. Families of stress-strain, relaxation, and creep curves generated by a nonlinear model for thixotropic viscoelastic-plastic media accounting for structure evolution. Part 1. The model, its basic properties, integral curves, and phase portraits // *Mech. Compos. Mater.* 2024. Vol. 60, No. 1. P. 49–66.
- [4] Хохлов А.В., Гулин В.В. Кривые течения и деформирования нелинейной модели сдвигового течения тиксотропных вязкоупругопластичных сред, учитывающей эволюцию структуры // *Вестн. Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Механика*. 2024. № 1. С. 112–143.
- [5] Khokhlov A.V., Gulin V.V. Families of stress-strain, relaxation, and creep curves generated by a nonlinear model for thixotropic viscoelastic-plastic media accounting for structure evolution. Part 2. Relaxation and stress-strain curves // *Mech. Compos. Mater.* 2024. Vol. 60, No. 2. P. 259–278.
- [6] Khokhlov A.V., Gulin V.V. Families of stress-strain, relaxation, and creep curves generated by a nonlinear model for thixotropic viscoelastic-plastic media accounting for structure evolution. Part 3. Creep curves // *Mech. Compos. Mater.* 2024. Vol. 60, No. 3. P. 473–486.
- [7] Хохлов А.В., Гулин В.В. Влияние эволюции структуры и уровня нагрузки на свойства кривых ползучести и восстановления, порождаемых нелинейной моделью деформирования тиксотропных вязкоупругопластичных сред // *Физическая мезомеханика*. 2024. Т. 27, № 5. С. 77–103.
- [8] Khokhlov A.V., Gulin V.V. The influence of the ramp deformation stage and structure evolution on the properties of stress relaxation curves produced by nonlinear models of viscoelastic-plastic media // *Polymer Science - Series C*. 2025. Vol. 67, No. 2. P. 68–110.
- [9] Гулин В.В. Свойства кривых циклической деформации, порождаемых нелинейной моделью сдвигового течения, учитывающей взаимное влияние процесса деформирования и эволюции структуры. 2026, Вестн. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естеств. науки. 1(124):4–31.
- [10] Хохлов А.В., Гулин В.В. Модель тиксотропных вязкоупругопластичных сред, учитывающая эволюцию структуры, и свойства порождаемых ею кривых течения, деформирования, релаксации и ползучести. 2026, Высокомолек. соед. Сер. А. 1:67–134.