

МЕДЛЕННАЯ КИНЕТИКА ФАЗОВОГО СОСТАВА НЕФТЕЙ

Есипов Игорь Борисович

Российский государственный университет нефти и газа им.

И.М. Губкина

igor.esipov@mail.ru

ВВЕДЕНИЕ

- Сложные структуры, например гранулированные среды или вязкоупругие жидкости, проявляют свойство аномально медленного перехода к состоянию равновесия;
- Приводятся экспериментальные результаты медленной эволюции во времени реологических характеристик нефти;
- Показано, что вязкоупругие модули и соответствующие параметры нелинейности уравнения состояния нефти изменяются во времени приблизительно по логарифмическому закону;
- Предложена модель, описывающая медленную кинетику изменения параметров среды.

ЭКСПЕРИМЕНТ



Вязкоупругие модули определялись методом ротационной реометрии в режиме сдвиговых гармонических деформаций с использованием системы типа «конус – плоскость».

Реометре Anton Paar Physica MCR 501

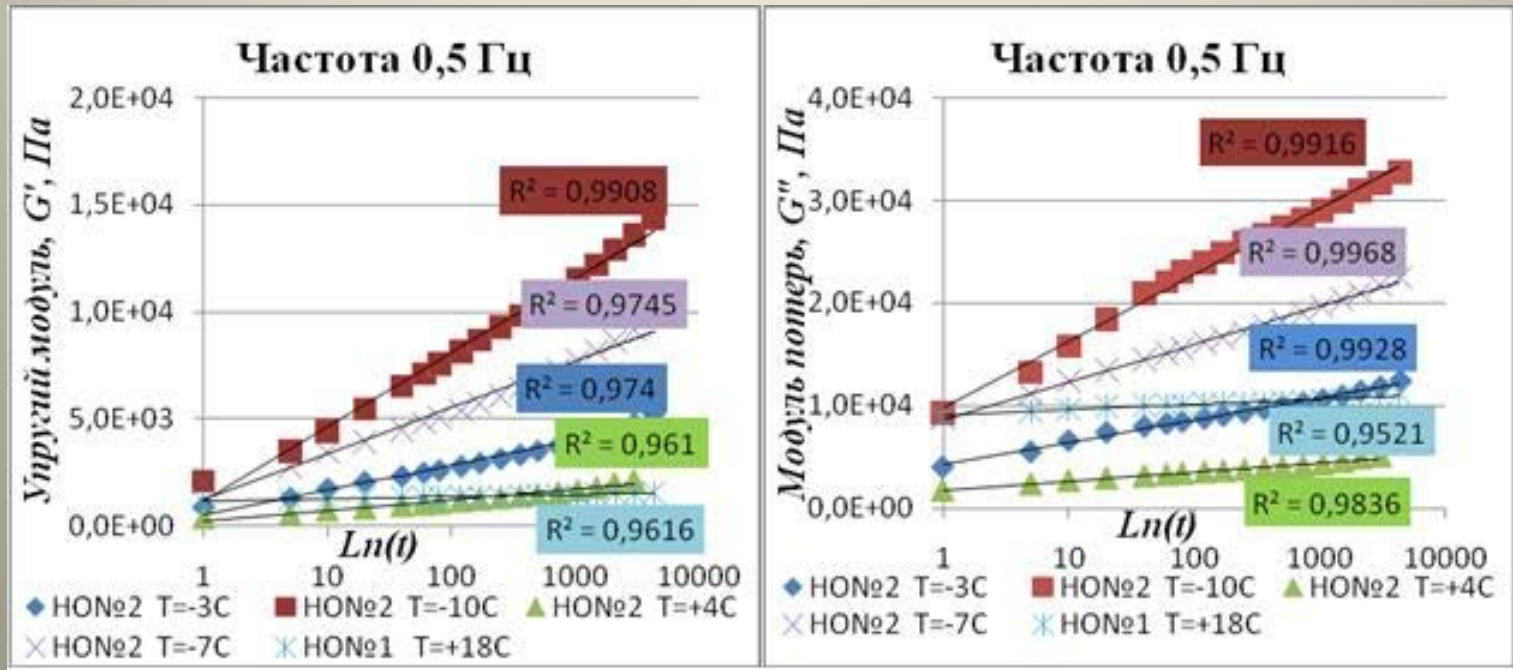
Вязкоупругие модули

- сдвиговая деформация изменялась по гармоническому закону $\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \exp(i\omega t)$, где $\varepsilon_0 \leq 1$ - амплитуда гармонических колебаний деформации и ω — частота осцилляций;
- уравнение состояния для вязкоупругой среды при осциллирующих деформациях $\sigma(t) = G' \varepsilon + \mu \dot{\varepsilon} = (G' + iG'') \varepsilon$
 - G' - модуль упругости
 - $G'' = \omega \mu$ - модуль потерь
 - $G = G' + iG''$ - комплексный модуль упругости

Компонентный состав тестируемых образцов нефти

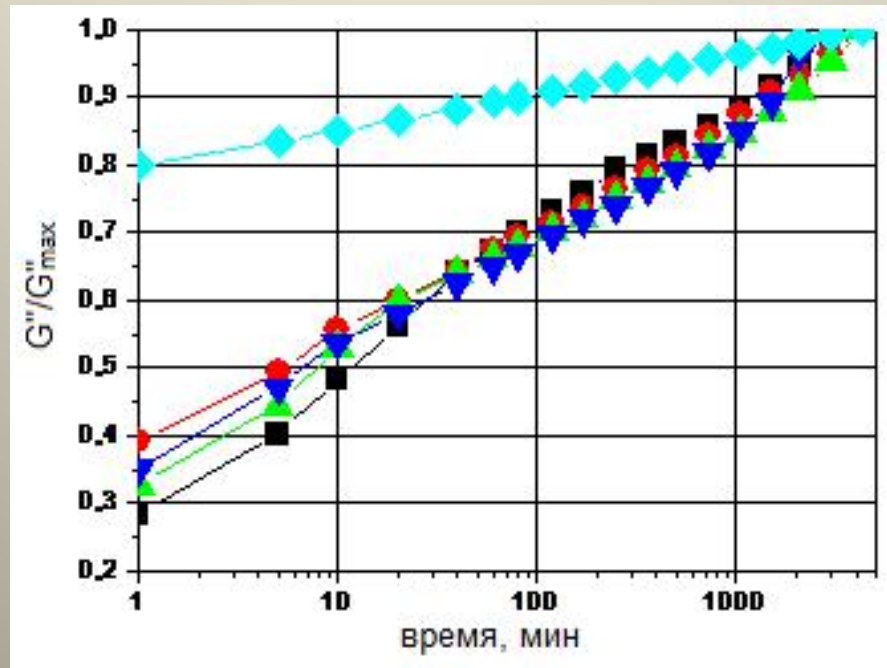
<i>образец</i>	<i>алканы, циклоалканы, %</i>	<i>ароматические компоненты %</i>	<i>смолы % С</i>	<i>асфальтены % А</i>	<i>С/А</i>
<i>#1</i>	22,50	23,60	44.8	9,98	4,49
<i>#2</i>	41.6	26.0	19,50	13.13	1,49

Результаты эксперимента



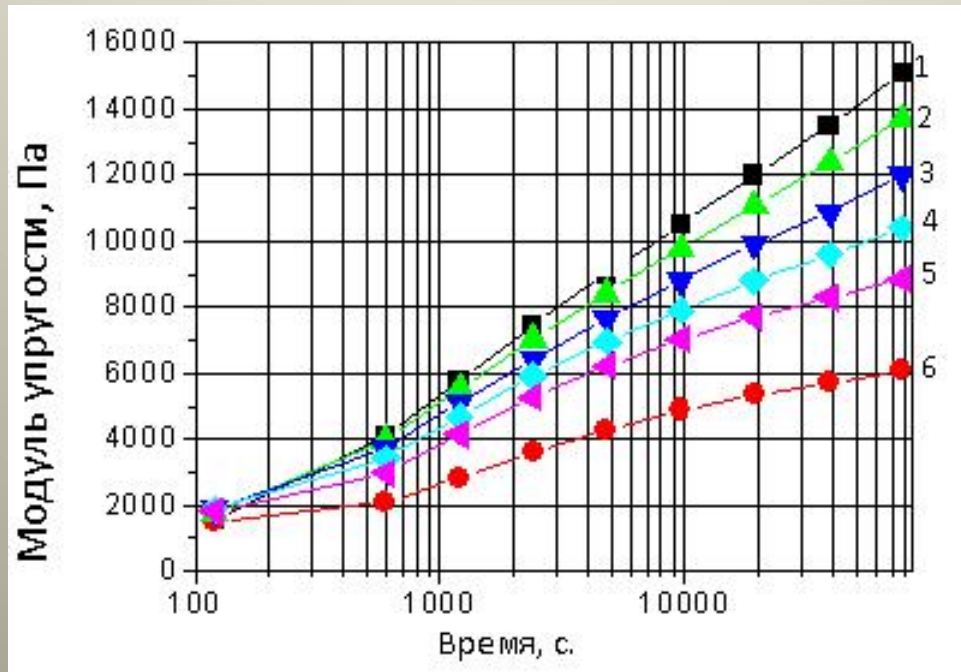
Кинетика вязкоупругих модулей нефти разных образцов. Ось абсцисс – время в минутах. R^2 – оценка статистической достоверности логарифмической аппроксимации результатов экспериментального наблюдения

Результаты эксперимента



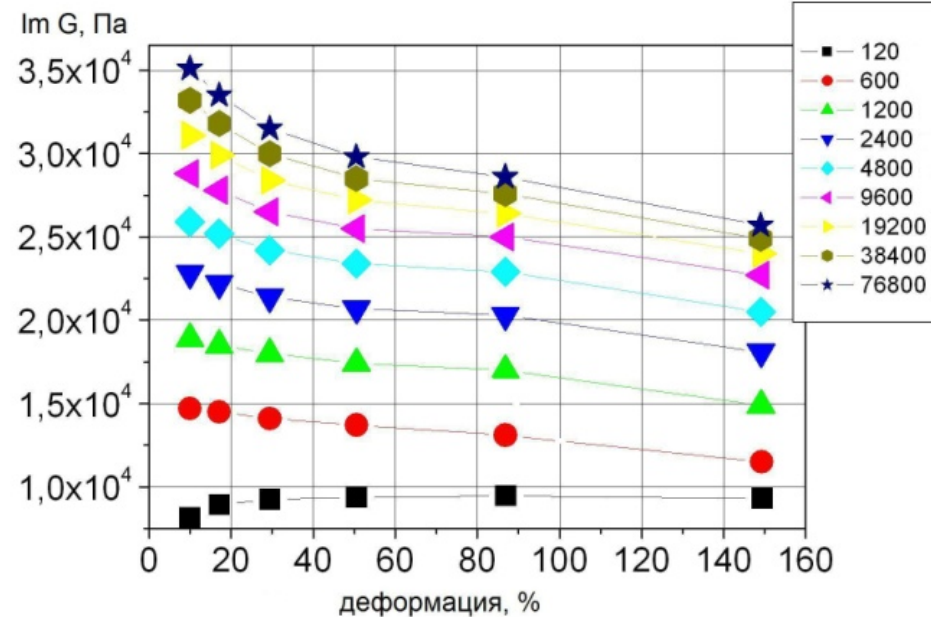
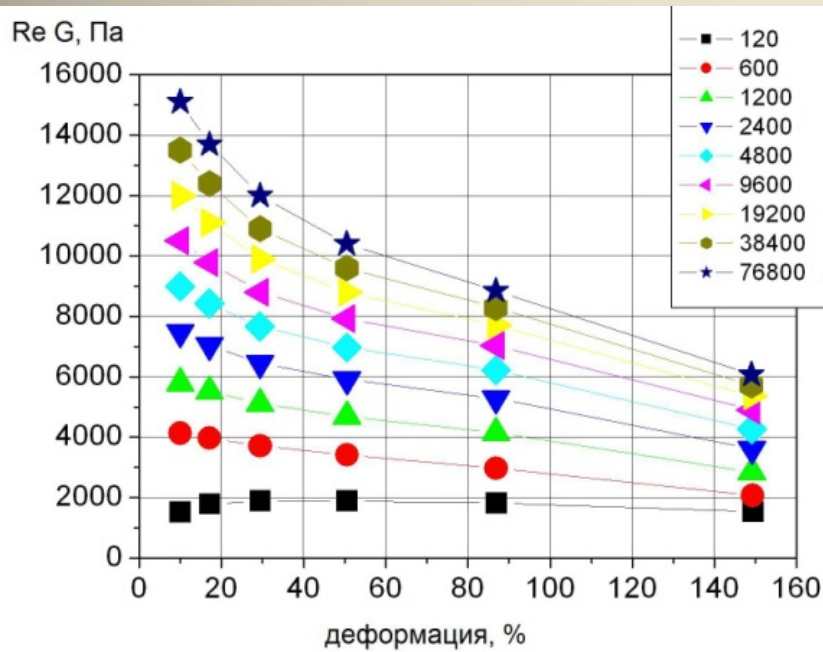
Сравнение зависимостей нормированных модулей потерь от времени при разных температурах, частота 0.5 Гц. ■ - -10С; ● - -7С; ▲ - -30С; ▼ - +4С; ◆ - 18С (нефть #1)

Нелинейность уравнения состояния



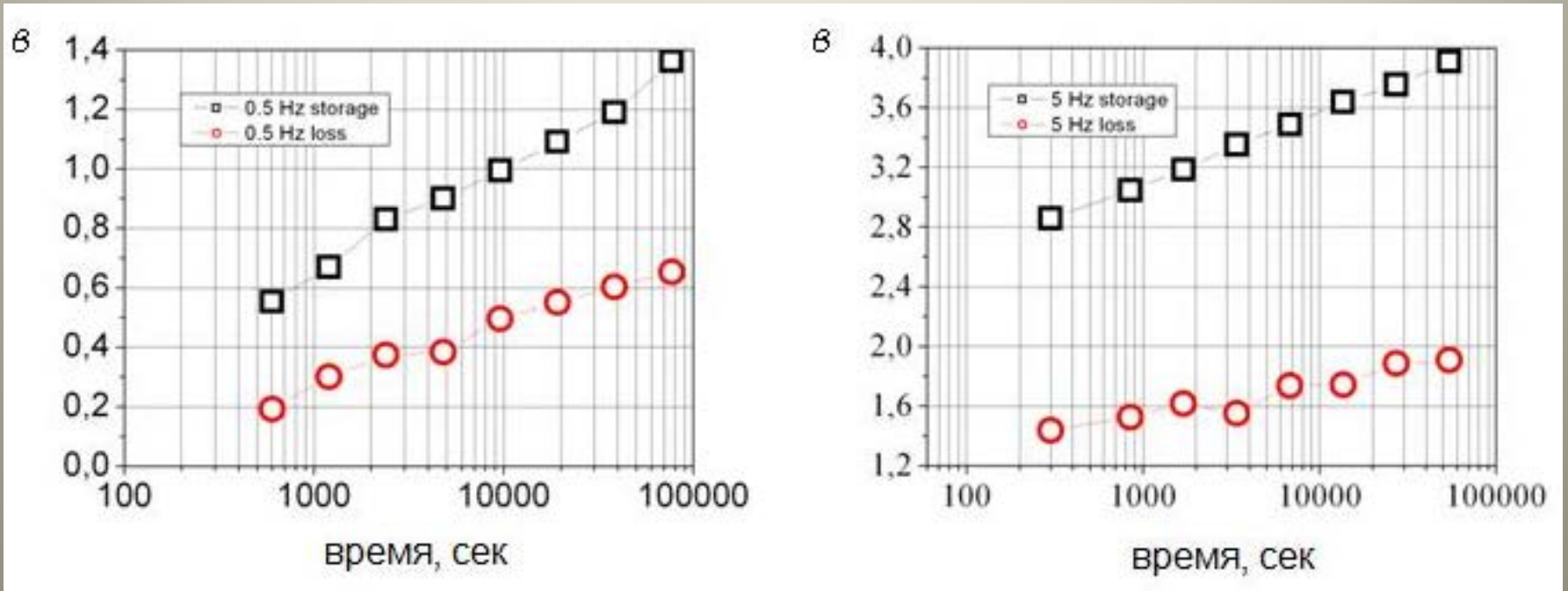
Зависимость модуля упругости от времени при различных амплитудах деформации. Кривые сверху вниз: 8.7%, 17.1%, 29.4%, 50%, , 87%, 149%. Частота 0.5 Гц.

Нелинейность уравнения состояния



Зависимость действительной и мнимой частей модуля сдвига от сдвиговой деформации. Значки соответствуют измерениям в разное время от 120 с до 76800 с.

Нелинейность уравнения состояния



Эволюция параметра нелинейности во времени: \square – $\text{Re } \beta$, \circ – $\text{Im } \beta$
а) – частота осцилляций 0.5 Гц, б) – частота осцилляций 5 Гц

Нелинейность уравнения состояния

В силу симметрии при чисто сдвиговых деформациях нелинейная компонента связи напряжение-деформация должна быть антисимметричной относительно нуля функцией. Часто принимается, что нелинейное слагаемое в этой связи описывается кубической параболой:

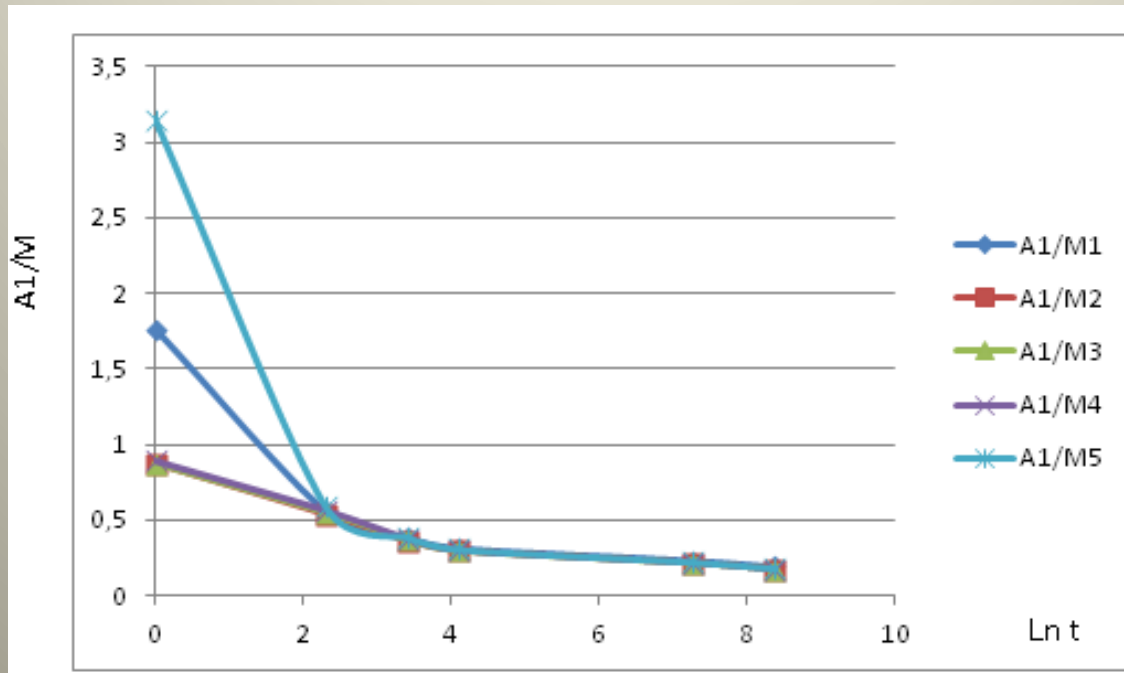
$$\sigma = G\varepsilon(1 + \alpha\varepsilon^2)$$

В наших экспериментах при малых деформациях отчетливо проявляется линейная зависимость

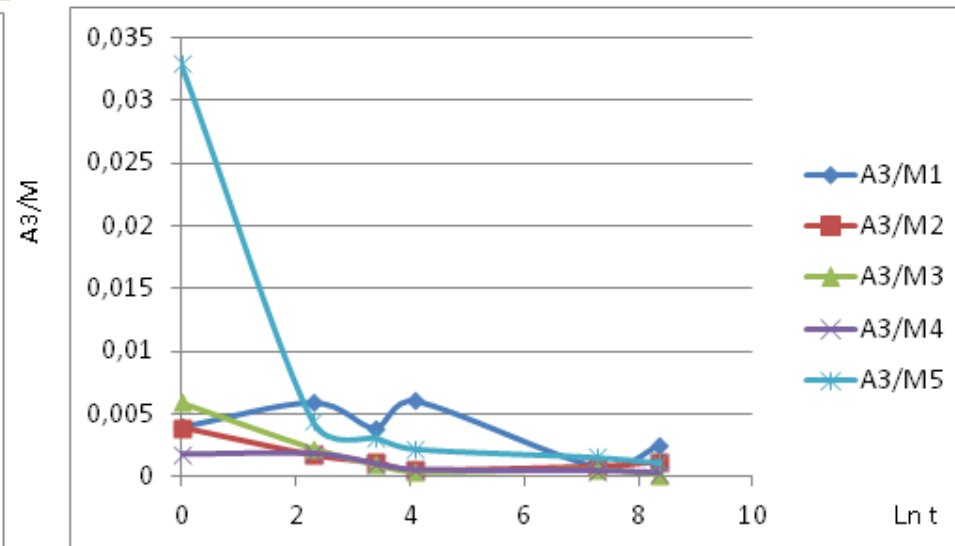
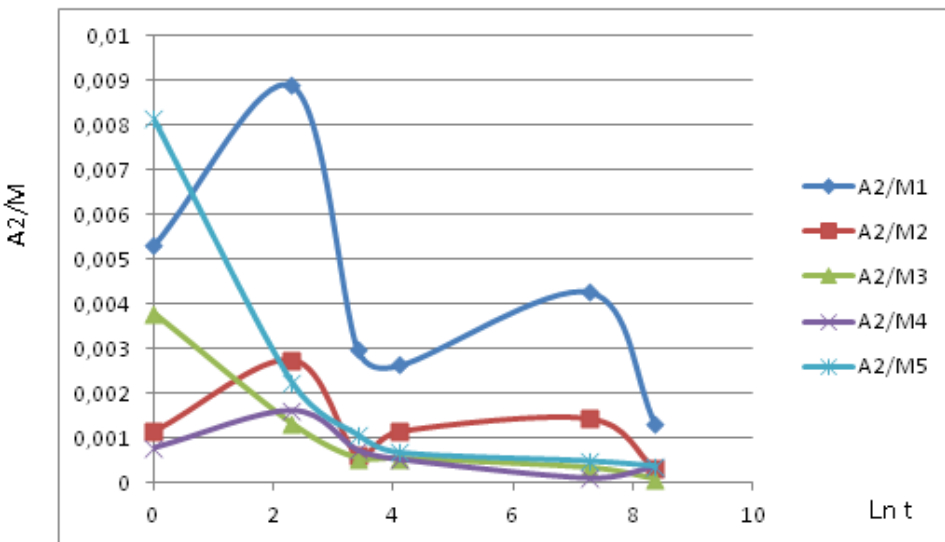
$$G_e = G(1 - \beta\varepsilon_0)$$

Это приводит к уравнению состояния в виде

$$\sigma(t) = G\varepsilon(t)(1 - \beta|\varepsilon|)$$



Зависимость от времени первой гармоники отклика, нормированного на действующий крутильный момент



Зависимость от времени второй и третьей гармоник отклика, нормированных на действующий крутящий момент

МОДЕЛЬ МЕДЛЕННОЙ КИНЕТИКИ

$$\dot{\xi} = -\tau^{-1} \Delta \xi$$

$$\xi(t) = \xi_{eq} + \Delta \xi \exp(-t / \tau)$$

$$\dot{\xi} = -\tau^{-1} [\exp(-U(\xi)/T) - \exp(-U(\xi_{eq})/T)]$$

$$U(\xi) \approx K\xi$$

$$\dot{\mu} = \frac{\mu_0}{\tau(\mu)} \frac{K(\mu - \mu_{eq})}{T}$$

$$\tau(\mu) = \tau_0 \exp \frac{K\mu}{T}$$

$$\frac{K(\mu - \mu_{eq})}{T} \approx \ln(t / \tau_0)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Обнаружено, что реологические характеристики нефти медленно эволюционируют во времени, вязкоупругие модули изменяются во времени приблизительно по логарифмическому закону;
- Нелинейные свойства вязкоупругой среды также имеют медленную кинетику своих значений. Изменение модулей упругости тяжелой нефти зависит также от температуры и частоты колебаний;
- Впервые удалось определить поведение во времени первых трех гармоник нелинейного отклика вязкоупругой среды на сдвиговое воздействие;
- Представленные здесь результаты медленной эволюции реологического состояния вязкоупругой среды экспериментально можно наблюдать преимущественно неконтактными методами, например, акустическими.