

Нелинейность сдвиговых колебаний вязкоупругой жидкостиВ.В. Гришаев¹, И.Б. Есипов^{1,2,*}, М.А. Миронов²¹ *Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина, кафедра физики, Россия, 119991, Москва, Ленинский просп., д. 65, корп. 1*² *Акустический институт, Россия, 117036, Москва, ул. Шверника, д. 4*

(Статья поступила 17.11.2014; Подписана в печать 10.12.2014)

Вязкоупругие модули тяжелой сырой нефти медленно эволюционируют пропорционально логарифму времени. Новые исследования зависимости комплексного модуля сдвига от амплитуды деформации выявили логарифмический рост во времени параметра нелинейности для образцов сырой нефти. Эксперименты выполнялись на ротационном реометре в режиме малых гармонических крутильных осцилляций. Установлено, что комплексный модуль сдвига линейно уменьшается с ростом амплитуды сдвиговых возмущений, что возможно при линейной зависимости величины вязкоупругих характеристик исследованного образца нефти от абсолютной деформации среды. Приводятся результаты анализа зависимости первых трех гармоник вязкоупругого отклика на гармонические сдвиговые возмущения для данного образца нефти от амплитуды воздействия и времени

PACS: 43.25.Ba

УДК:534.8

Ключевые слова: вязкоупругие модули, медленная кинетика, кинетика нелинейности.

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа продолжает экспериментальные исследования [1, 2]. Измерены зависимости вязкоупругих модулей сдвига от времени для образца сырой, дегазированной и обезвоженной тяжелой нефти при различных, возрастающих амплитудах колебаний сдвиговых деформаций. При этом были зарегистрированы отклики вязкоупругого образца нефти на гармонические сдвиговые возмущения. Основная цель заключается в исследовании зависимости модулей сдвига от амплитуды колебаний деформации и определении коэффициента нелинейности такой вязкоупругой среды, а также изучение поведения первых трех гармоник ее нелинейного отклика. Состав исследуемой нефти и методика измерений подробно описана в [1].

Вязкоупругие модули определялись методом ротационной реометрии в режиме сдвиговых гармонических деформаций на ротационном реометре Rheotest RN4.1 с использованием системы типа «конус–плоскость». При этом, в отличие от работы [1], деформация образцов ε была как существенно меньше единицы, так и порядка единицы, что позволяет реализовать режим нелинейных возмущений.

1. МЕДЛЕННАЯ КИНЕТИКА ВЯЗКОУПРУГИХ МОДУЛЕЙ

В упругих средах напряжение сдвига σ пропорционально сдвиговой деформации ε . В вязких жидкостях величина σ будет пропорциональной скорости сдвиговой деформации $\dot{\varepsilon}$.

В нашем случае сдвиговая деформация изменялась по гармоническому закону $\varepsilon(t) = \varepsilon_0 e^{i\omega t}$, где ε_0 — ам-

плитуда гармонических колебаний деформации и ω — частота осцилляций. Объединяя вклады упругой и вязкой составляющих, запишем уравнение состояния для вязкоупругой среды при осциллирующих деформациях в виде:

$$\sigma(t) = G'\varepsilon + \mu\dot{\varepsilon} = (G' + i\omega\mu)\varepsilon = (G' + iG'')\varepsilon, \quad (1)$$

где G' — модуль упругости, характеризует упругую часть модуля сдвига, а $G'' = \omega\mu$ — модуль потерь, μ — вязкость. G'' определяет вязкую часть модуля сдвига. Вместе они составляют комплексный модуль упругости при сдвиге $G = G' + iG''$.

Благодаря использованию системы конус–плоскость все элементы среды в процессе измерений испытывали одинаковые деформации, минимальная из них была равна 0,086. Предполагается, что осцилляции с такой амплитудой не вызывают заметных изменений в структуре среды во время измерений, в частности не влияют на текущие значения измеряемых параметров G' , G'' . При этом отношение длины вязкоупругой волны к ширине зазора на всех частотах существенно превышает 1, что обеспечивает условие однородности деформации жидкости поперек зазора при всех режимах измерений.

Рис. 1 иллюстрируют кинетику вязкоупругих модулей при осцилляциях малой амплитуды на частоте 0,5 Гц для различных образцов нефти. В работе [1] сделан анализ различий в составе данных образцов. Основное отличие заключается в том, что отношение концентрации смол и асфальтенов (С/А) у образца нефти #1 в три раза выше по сравнению с образцом #2. Графики показывают существенный рост модуля сдвига за время наблюдения для образца нефти #2, как вещественной, так и мнимой частей. Представленные в логарифмическом масштабе во времени, все графики имеют выраженный линейный рост модулей сдвига. Это означает, что модуль сдвига исследуемой среды зависит от времени по закону $G(t) \sim \log(t)$. Эта за-

*E-mail: igor.esipov@mail.ru

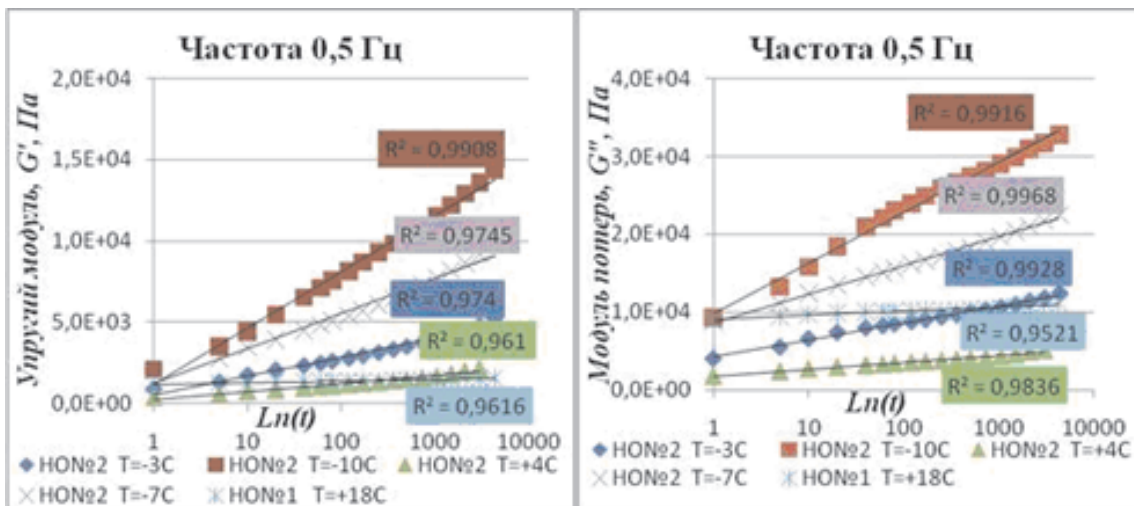


Рис. 1: Кинетика вязкоупругих модулей нефти разных образцов. Ось абсцисс — время в минутах. R^2 — оценка статистической достоверности логарифмической аппроксимации результатов экспериментального наблюдения

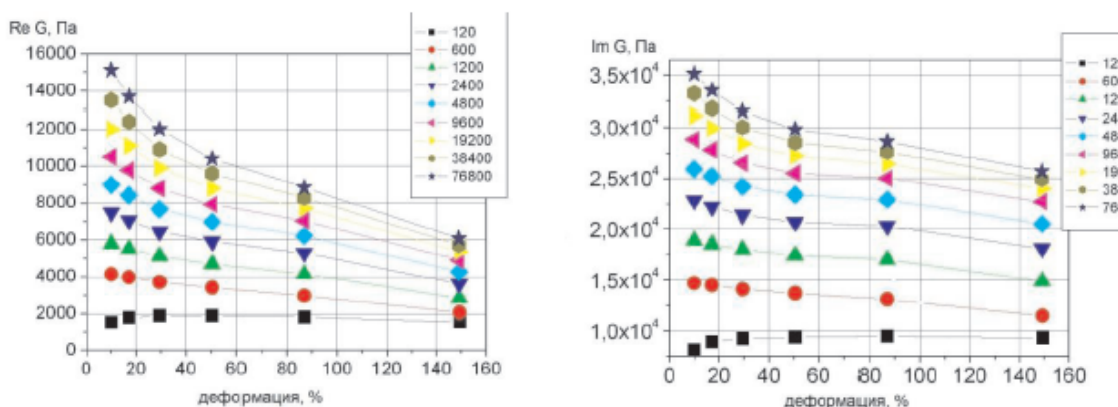


Рис. 2: Зависимость действительной и мнимой частей модуля сдвига от сдвиговой деформации. Значки соответствуют измерениям в разное время от 120 с до 76800 с

висимость прослеживается вплоть до максимального времени наблюдения (72 часа), не проявляя тенденции к насыщению. Отметим, что при понижении температуры вещественная и мнимая части модуля заметно — в несколько раз — возрастают. При этом мнимая (диссипативная) часть модуля по абсолютной величине больше действительной при всех температурах. Это означает, что исследуемая среда проявляет в этих условиях в большей степени свойства жидкости, нежели упругого тела. Из этих данных видно, что при одинаковых начальных значениях G'' , скорость эволюции вязкоупругих модулей нефти #2 оказывается значительно выше, чем нефти #1. Таким образом, результаты, представленные на рис. 1 указывают на то, что образец #1 является более стабильным, чем #2, так как в нефти #1 асфальтены экранированы смолами лучше, по сравнению с нефтью #2. Следует отметить, что наличие внутренней структуры можно предполагать и в чистых жидкостях. На это, в частности, ука-

зывают и результаты работ [3,4,5], где исследована сдвиговая упругость органических жидкостей.

2. МЕДЛЕННАЯ КИНЕТИКА НЕЛИНЕЙНОСТИ ВЯЗКОУПРУГИХ МОДУЛЕЙ

Дальнейшие эксперименты выполнялись с образцом нефти #2. Была исследована особенность развития медленной кинетики нефти в зависимости от амплитуды периодических сдвиговых возмущений. Поскольку наиболее выраженные изменения в значении модулей сдвига происходили с образцом #2, то исследование нелинейности сдвиговых колебаний при медленной кинетике вязкоупругих свойств нефти было выполнено с этим образцом нефти при температуре -10°C .

По-прежнему мы изучали медленную кинетику комплексного модуля сдвига в течение длительного времени (80000 с) с периодическими сеансами измерений мо-

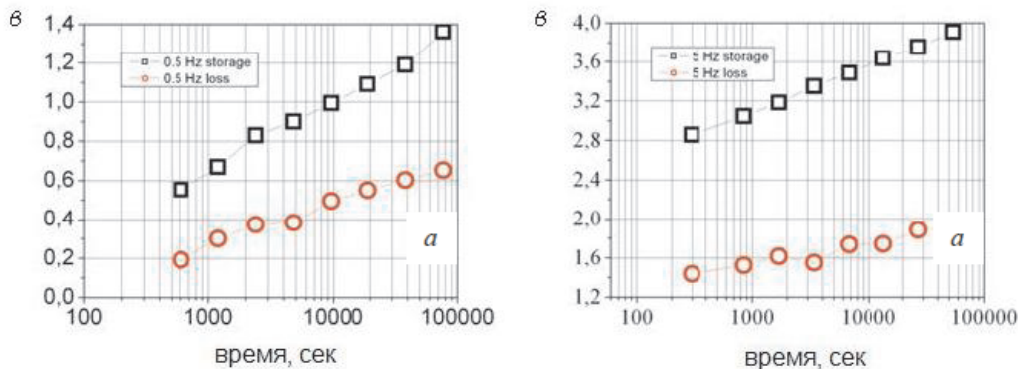


Рис. 3: Эволюция параметра нелинейности β во времени: \square — $\text{Re}\beta$, \circ — $\text{Im}\beta$; а) — частота осцилляций 0,5 Гц, б) — частота осцилляций 5 Гц

для сдвига. Каждый из сеансов состоял из нескольких измерений с разными амплитудами деформации в диапазоне от 8,7% до 149%. После каждого измерения выдерживалась пауза соответствующей длительностью и измерение снова повторялось.

На рис. 3 представлены зависимости модуля упругости от времени при различных амплитудах деформации, меняющихся от 8,7% до 149% (кривые сверху вниз). Видно, что модуль упругости по-прежнему растет со временем по логарифмическому закону, что определяет медленную кинетику их величин. С ростом амплитуды сдвиговой деформации величина модуля уменьшается и такая реакция среды усиливается со временем. То есть, со временем параметры образца нефти становятся все более зависимыми от амплитуды сдвиговых возмущений.

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:

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

α — параметр нелинейности. В соответствии с такой моделью при гармонических колебаниях деформации $\varepsilon \sim A \cos(\omega t)$, усредненный по периоду колебаний модуль сдвига зависит от амплитуды колебаний A квадратичным образом: $G_e = G(1 + \alpha \langle \varepsilon^2 \rangle) = G(1 + \frac{1}{2}\alpha A^2)$. Такая зависимость типична для снижения вязкости с ростом скорости сдвига (при отрицательном значении параметра нелинейности α). Однако, в наших экспериментах (рис. 4) при малых деформациях отчетливо проявляется линейная зависимость G_e от A $G_e = G(1 - \beta A)$. Такая зависимость заставляет отказать от кубической нелинейности в уравнении (2).

Единственно возможная зависимость, обеспечивающая, с одной стороны, антисимметричность связи σ и ε , а, с другой стороны, линейность связи эффективного модуля сдвига с амплитудой сдвиговых колебаний, является зависимость, содержащая

модуль деформации:

$$\sigma = \mu\varepsilon(1 - \beta|A|). \quad (3)$$

Коэффициент $\beta = (1/G)\partial G/\partial A$ (параметр нелинейности модуля сдвига) определяется из наклона экспериментальных кривых рис. 2 при минимальных амплитудах деформации. Видно, что параметр нелинейности модуля сдвига является положительной величиной — с ростом амплитуды возмущений, как упругость, так и потери в среде уменьшаются. Значение коэффициента β при этом мы будем определять при малых деформациях, когда, собственно говоря, и справедливы выражения (2) и (3).

На рис. 3 показаны зависимости действительной и мнимой величины коэффициента β от времени (для вещественной и мнимой частей G). Видно, что коэффициенты нелинейности, так же как и сами величины модулей G' , G'' увеличивается пропорционально логарифму времени и проявляют медленную кинетику. Коэффициент нелинейности модуля сдвига в несколько раз больше коэффициента нелинейности модуля потерь. Коэффициенты нелинейности на частоте 5 Гц в несколько раз больше коэффициентов нелинейности на частоте 0,5 Гц. Несмотря на то, что абсолютное значение величины параметра нелинейности возрастает с частотой, скорость его эволюции во времени снижается.

О характере нелинейности можно судить по интенсивности возникающих высших гармоник в реакции среды на гармоническое возбуждение. На рис. 4 и рис. 5 представлены зависимости от логарифма времени первых трех гармоник отклика, нормированных на амплитуду соответствующих действующих моментов сил. Здесь время определялось в минутах.

Этот опыт длился 72 часа (4320 мин). Перед началом опыта исследуемый образец нефти интенсивно перемешивался при вращении системы конус-плоскость реометра. Измерения проводились в моменты времени 1 мин, 10 мин, 30 мин, 60 мин, 1440 мин и 4320 мин после перемешивания. Во время каждого сеанса измерения выполнялись при последовательно увеличива-

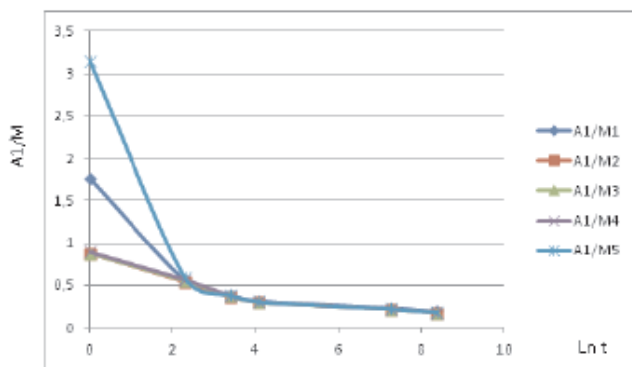


Рис. 4: Зависимость от времени первой гармоники отклика, нормированного на действующий крутильный момент

ющейся амплитуде действующего вращательного момента при частоте осцилляций 0,5 Гц. Для того, чтобы минимизировать воздействие на исследуемый образец, время осцилляций на каждой амплитуде ограничивалось 5 периодами (10 с). Значения действующих вращательных моментов оставались постоянными во всех сеансах измерений и их амплитуды приведены в следующей таблице.

Таблица I: Амплитуда вращательного момента

M1	M2	M3	M4	M5
0,414 мНм	0,91 мНм	1,9 мНм	3,9 мНм	7,85 мНм

Результаты, представленные на рис. 4 и рис. 5, указывают на то, что значения гармоник в деформации среды в начальные моменты времени быстро меняются. Это свидетельствует о неустойчивом состоянии исследуемого образца нефти. Относительное значение первой гармоники и остальных двух уменьшаются со временем, что соответствует о том, что среда становится более упругой, уменьшается ее деформация при заданном вращательном моменте. Такие изменения оказываются более выраженными при малой амплитуде вращательного момента. Рост амплитуды вращательного момента стабилизирует состояние исследуемого образца, что достигается, по-видимому, за счет разрушения неустойчивых связей в среде. Наиболее ярко это видно на графике зависимости второй гармоники от времени на рис. 5 при вращательном моменте M1. Стоит заметить, что величина третьей гармоники превышает величину второй гармоники в нашем опыте, что также указывает на неаналитический характер нелинейности упругих связей в нашей среде.

Неаналитическое описание нелинейности модуля упругости можно, вероятно, применять и к другим сложным средам, прежде всего — к твердым средам с дефектами. В работах, посвященных нелинейным акустическим эффектам в таких средах, отчетли-

во наблюдались противоречащие классической нелинейной теории упругости эффекты: генерация в поле сдвиговых волн второй сдвиговой гармоники [6], линейная зависимость скорости распространения продольных волн и поглощения от амплитуды [7, 8] В работе [6], пожалуй, впервые отмечен эффект медленной кинетики акустических свойств структурно неоднородного материала. В работе [22], в частности, предложена неаналитическая зависимость коэффициента нелинейности в виде функции, содержащей деформацию ε и $sign(\dot{\varepsilon})$ — знак скорости деформации. Заметим, что физический смысл такой зависимости неясен. Мы также не можем пока дать адекватное описание возможных физических процессов, приводящих к зависимостям типа (3). Особенности нелинейности структурно-неоднородных сред применительно к методам нелинейной акустической диагностики рассмотрены в работе [9].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение перечислим основные результаты этой работы.

Обнаружено, что реологические характеристики нефти медленно эволюционируют во времени, вязкоупругие модули изменяются во времени приблизительно по логарифмическому закону. Ранее подобная закономерность наблюдалась в структурированных твердых и сыпучих (гранулированных) средах. Впервые показано, что и параметр нелинейности модуля сдвига исследованного образца нефти, также растет пропорционально логарифму времени. То есть 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. При этом среда находилась в нестационарном состоянии и медленно эволюционировала. Измеренные особенности поведения гармоник может быть полезным для описания уравнения состояния вязкоупругой среды при сдвиговых возмущениях.

Для более полного количественного описания и предсказания результатов экспериментов необходимо развитие модели в направлении учета частотных зависимостей модулей упругости. Необходимо развитие адекватной физической количественной модели структуры сильновязкой нефти с учетом уже полученных экспериментальных зависимостей.

Заметим, что представленные здесь результаты медленной эволюции реологического состояния вязкоупругой среды экспериментально можно наблюдать преимущественно неконтактными методами, например, акустическими, предполагающими малую деформацию или малые возмущения исследуемого вещества. В на-

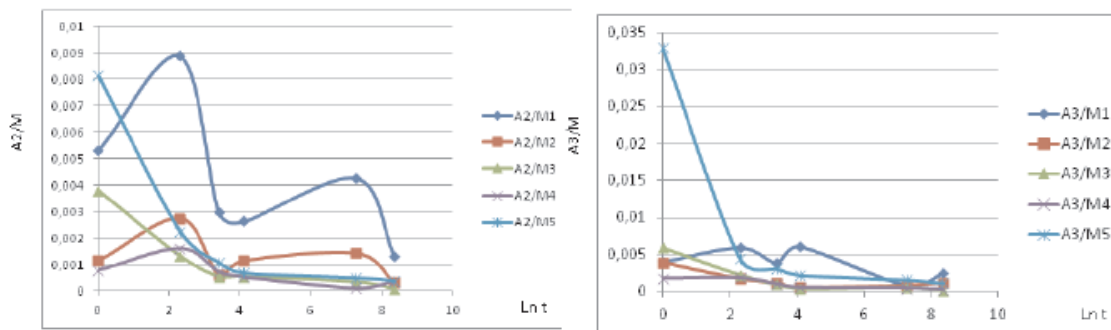


Рис. 5: Зависимость от времени второй и третьей гармоник отклика, нормированных на действующий крутильный момент

ших опытах деформация среды составляла величину $0,086 \ll 1$ для измерения вязкоупругого модуля сдвига. Деформация менялась до 1,5 при определении нелинейных параметров этой характеристики. Применение методов измерений с меньшей величиной возмущения

среды позволит повысить диапазон исследуемых параметров и точность их определения.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект 14-02-00579).

- [1] Миронов М.А., Шеломихина И.А., Зозуля О.М., Есипов И.Б. Акуст. журн. **58**, № 1, С. 132. (2012).
 [2] Есипов И.Б., Зозуля О.М., Миронов М.А. Акуст. журн. **60**, № 1. С. 166. (2014).
 [3] Бадмаев Б.Б., Будаев О.Р., Дембелова Т.С. Акуст. журн. **45**, № 5. С. 610. (1999).
 [4] Б.Б. Бадмаев, Б.Б. Дамдинов. Акуст. журн. **47**, № 4. С. 487. (2001).
 [5] Бадмаев Б.Б., Бальжинов С.А., Дамдинов Б.Б., Дембе-

- лова Т.С. Акуст. журн. **56**, № 5. С. 602. (2010).
 [6] Гедройц А.А., Зарембо Л.К., Красильников В.А. Докл. АН СССР. **150**, С. 515. (1963).
 [7] Johnson P., Sutin A. Journ. Acoust. Soc. Am. **117**, N 1. P. 124. (2005).
 [8] Руденко О.В., Коробов А.И., Изосимова М.Ю. Акуст. журн. **56**, № 2. С. 187. (2010).
 [9] Руденко О.В. УФН. **1766** № 1. С. 77. (2006).

Nonlinearity of shear oscillations for visco-elastic fluid

V.V. Grishaev¹, I.B. Esipov^{1,2,a}, M.A. Mironov²

¹Russian state university of oil and gas by I.M. Gubkin, Physics chair, Russia, 119991, Moscow, Leninsky prosp., 65, build. 1

²Acoustics institute, Russia, 117036, Moscow, Shvernika str., 4
 E-mail: ^aigor.esipov@mail.ru

Heavy raw oil modules slowly vary in proportion to log of time. The recent research of complex shear module dependence on strain amplitude reveals log time increasing of nonlinear parameter for sample of raw oil. Experiments have been done at the rotation rheometer in the mode of small torsional oscillations. Experiment showed the complex shear module linearly decreases with amplitude of shear excitation increase and that could be if the value of shear module of the oil linearly varies with strain modulus. Results of the first three harmonics amplitudes analysis for visco-elastic response on both amplitude excitation and time are presented as well.

PACS: 43.25.Ba

Keywords: visco-elastic modules, slow kinetics, kinetics of nonlinearity.

Received 17.11.2014.

Сведения об авторах

1. Гришаев Владимир Валерьевич — студент 3 курса магистратуры; тел.: (495) 939-00-00, e-mail: grishaev@digaz.ru.
2. Есипов Игорь Борисович — докт. физ.-мат. наук, профессор, профессор; тел.: +7 (915) 160-87-40, e-mail: igor.esipov@mail.ru.
3. Миронов Михаил Арсеньевич — канд. физ.-мат наук, заведующий лабораторией; e-mail: mironov_ma@mail.ru.