

**РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
СТРУКТУРООБРАЗУЮЩИХ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ****RHEOLOGICAL PROPERTIES OF STRUCTURED DISPERSE SYSTEMS**

В работе приводятся результаты исследования проявления аномалии вязкости в дисперсных системах. Исследованы дисперсные системы, обладающие пространственной структурой, каркас которых не полностью разрушается вплоть до определенного значения скорости сдвига. Оценен характер внешнего воздействия, действующего в малой окрестности некоторой точки движущейся среды в данный момент времени.

Экспериментально изучен процесс разрушения-восстановления связей образца нефти с гетерогенной структурой, при котором проявляются элементы, ответственные за тиксотропное поведение флюида.

Определены объемные доли дисперсной фазы и интенсивности амплитуды возмущения (скорости сдвига), при котором имеет место эффект разрушения-восстановления структуры в реологически сложных средах в процессе течения. Исследовано реологическое поведение спектра композиций, включающих нефти добавки дисперсной фазы в определенных объемных долях, в качестве которой использован водорастворимый полимер (0,1% водный раствор полиакриламида) в соотношении 1,0 об.%, 2 об.%, 3 об.%, 4 об.% и 5 об.%, с ярко выраженной структурой, усиливающей релаксационные свойства нефти.

Рассмотрены некоторые аспекты поведения гетерогенных жидкостей в условиях переменного компонентного состава флюидов и переменных внешних условий. Исследуется гетерогенная система «нефть-полимер» при низких значениях скорости сдвига. В этой области система характеризуется переходными реологическими характеристиками и наблюдаются значительные флуктуации вязкости с изменением компонентного состава композиций, устанавливается связь с процессами её разрушения и восстановления.

Оценивается процесс самопроизвольного релаксационно-тиксотропного затухающего колебания в структурированной системе.

Results of investigations on appearance of viscosity abnormality in dispersible systems is given in the paper. The dispersible systems of spatial structure, whose framework doesn't completely fail up to some shear rates are studied.

Character of external action applied in small vicinity of some point of medium flow at the given time is estimated.

The process of heterogeneous oil structure destruction and recovery at which there appear the effects of thixotropic phenomenon is studied experimentally.

Volume fraction of dispersible phase and perturbation amplitude intensity (shear rates) as which structure destruction and recovery occurs under rheologically complicated media flow are determined.

Rheological behavior of the different compositions, including oil with additives in certain volume fractions of dispersible phase is studied. Here water soluble polymer (0.1% aqueous solution of polyacrylamide) in ratio 1.0 vol.%, 2 vol.%, 3 vol.%, 4 vol.% and 5 vol.% that brightly expresses the structurization and amplifies relaxation properties of oil is used.

Some aspects of behavior of heterogeneous liquids are considered under conditions of variable component compositions and variable external conditions.

“Oil-polymer” heterogeneous system is studied at lower values of shear rates. In this field, the system characterized by transient rheological characteristics and there are significant fluctuations in viscosity with the change in the composition content, that relates to the processes of structure destruction and reconstruction.

The processes of spontaneous relaxation thixotropic damping vibration in the structured system is valuated.

Ключевые слова: пульсация, гетерогенная жидкость, тиксотропия, колебания, труба, амплитуда, скорость, давление, возмущающее движение, расход.

Key words: pulsation, heterogeneous liquid, thixotropy, vibrations, pipe, amplitude, speed, pressure, periodical perturbation, flow rate.

Введение

В последние годы исследование течения жидкостей приобрело актуальность в связи с большим разнообразием технологических жидкостей, проявляющих аномальные реологические свойства (нелинейная вязкость). На практике часто встречаются дисперсные системы, обладающие пространственной структурой, в которых вплоть до очень высоких скоростей сдвига не происходит полное разрушение [1].

Возникает необходимость оценки характера на внешнее воздействие. Это означает, что напряжение, действующее в малой окрестности некоторой точки среды в данный момент времени, зависит от предыстории деформации соответствующего элементарного объема [2, 3, 4, 5].

Одной из причин проявления аномальной вязкости является сверхмицеллярное структурообразование, которое было установлено у многих гидрофобных коллоидных растворов. Причиной слипания частиц может быть нарушение агрегативной устойчивости и коагуляции. В неполярных средах, к которым можно отнести углеводородные жидкости и, в частности, гетерогенные нефти связь между частицами возникают из-за частичной перекристаллизации или притяжения друг к другу полярных групп таких соединений, как асфальтены, смолы и парафины (АСП), нафтеновые кислоты и иных компонентов [2, 5, 6, 7, 8].

Панахов Г. М., Аббасов Э. М., Юзбашиева А. О., Расулова С. Р., Гусейнов В. Г.
Институт Математики и Механики
НАН Азербайджана,
г. Баку, Республика Азербайджан

**G. M. Panahov, E. M. Abbasov,
A. O. Yuzbashiyeva,
S. R. Rasulova, V. G. Guseynov**
Institute of Mathematics
and Mechanics,
Azerbaijan National Academy
of Sciences,
Baku, Republic Azerbaijan

Оствальд [5] высказал предположение, что аномалия вязкости коллоидных растворов обуславливается структурообразованием, и назвал этот эффект структурной вязкостью. Несомненно, что структурообразование является наиболее частой причиной аномалии вязкости [2,5, 7]. В этой концепции остается открытым вопрос о форме зависимости вязкости от напряжения сдвига. Он не может быть решен на основании общей схемы рассуждений без конкретизации природы связей. Сдвиговое уменьшение вязкости с ростом скорости сдвига, в рамках представленной модели объясняется только разрушением агрегатов частиц. Ориентирующее действие течения учитывается в функции распределения агрегатов и влияет только на значения коэффициентов реологического уравнения.

Авторы [9] считают, что для каждого значения скорости существует критический размер агрегата. Агрегаты, размером больше критического разрушаются “пополам” под действием гидродинамических сил, более мелкие агрегаты объединяются при столкновениях за счет поверхностных сил сцепления. Такие свойства флюидов описывают модель Кессона [10], согласно которой реологические параметры определяются как:

$$\tau_c = \left\{ \frac{\alpha\beta}{\alpha a - 1} \left[\left(\frac{1}{1-\Phi} \right)^{\frac{\alpha a - 1}{2}} - 1 \right] \right\} \quad (1)$$

$$\eta_c = \frac{\eta_0}{[1-\Phi]^{\frac{\alpha a - 1}{2}}} \quad (2)$$

где: $\beta = \frac{3f_a^{\frac{1}{2}}}{[48]^{\frac{1}{2}}}$, f_a – сила сцепления частиц на

единицу площади сечения частиц, Φ – объемная доля дисперсной фазы; η_c – эффективная вязкость дисперсионной среды, a – безразмерный коэффициент, $a=0,7$.

Их коэффициент связан только с гидродинамическим взаимодействием отдельных частиц и не имеет никакого отношения к упаковке частиц, как в агрегатах, так и в системе в целом. В предложенной модели гидродинамические эффекты разделяются на гидродинамическое взаимодействие движущихся частиц (или агрегатов) и на действие растягивающих гидродинамических сил, которые разрушают агрегаты. Первый эффект приводит к увеличению вязкости за счет перекрывания полей течения вокруг частиц, которые проходят в непосредственной близости друг от друга в процессе сдвигового течения (что определяет величину коэффициента h_c). Второй эффект вызывает разрыв достаточно больших агрегатов за счет сил Стокса, в результате чего уменьшается диссипация энергии вязкого трения [10].

Приложение внешней нагрузки сдвигает равновесие процесса в дисперсных системах. Такая трактовка процесса течения в духе идей Г. Эйринга и П. А. Ребиндера связывает эффект аномалии вязкости с тиксотропными превращениями в системе и позволяет дать кинетическую интерпретацию не только режиму установившегося течения, но и предстационарной стадии деформирования.

С точки зрения эксперимента равновесное состояние достигается, когда значение измеряемой величины далее не изменяется. Это означает, что процессы разрушения и восстановления агрегатов взаимно скомпенсированы, имеется некоторое равновесное распределение агрегатов по размерам. Отклонение течения от равновесного состояния приводит к отклонению кривой течения от теоретической кривой данного реологического уравнения.

В теории Дении-Бродки принимается, что деформирование влияет на динамическое равновесие в структурированных тиксотропных системах так, что оно увеличивает скорость разрушения связей, не влияя на скорость их восстановления [11]. Авторы [12] ввели различие между разрушением структуры с течением времени и разрушением структуры благодаря изменению скорости сдвига.

Тиксотропное поведение нефти обычно описываются [13] уравнением Гершеля-Балкли, а при высоких скоростях сдвига уравнением Бингама, которое остается основным уравнением, используемым для описания аномальных нефтей [14]. В целом, все исследователи сходятся во мнении, что неньютоновские свойства нефтей связаны с наличием структурированной дисперсной системы. Высокопарафинистые нефти, которые разрушаются в сдвиговом течении, всегда имеют предельное напряжение сдвига τ_0 и часто демонстрируют гистерезис кривых течения [15, 16].

В [17, 18] предложено рассматривать структурные изменения одновременно при вариации скорости сдвига $\dot{\gamma}$ и времени t . Чтобы ввести тиксотропные свойства в реологические уравнения, необходимо установить характер зависимости реологических параметров от времени. Например, для степенного закона течения [19] равновесное состояние описывается уравнением $\tau_c = k\dot{\gamma}^n$. Зависимость $\tau(t)$ выражается уравнением $d\tau/dt = -k[\tau - \tau_c^a]$, но наблюдаемое изменение τ – следствие изменения параметров реологической модели, например, в виде $dn/dt = -k_n[n_c - n]^p$.

Таким образом, для каждого момента времени следует записать отдельную кривую течения $\tau_c = k(e) \cdot \dot{\gamma}^{n(t)}$, поэтому для описания течения системы требуется большое число параметров, описывающих зависимости k и n от времени. Такой полуэмпирический подход приводит к уравнениям,

содержащим большое число тиксотропных параметров.

Ниже приведены некоторые соотношения, относящиеся к нефтяным системам [20]:

$$\tau = \tau_{y0} + \tau_{y1} \lambda + k\lambda^n, \quad d\lambda/dt = \alpha(1-\lambda) - b\dot{\gamma}\lambda$$

$$\tau = (k + \Delta k^1 \lambda) \lambda + \tau_{y1} \lambda + \lambda \Delta k \dot{\gamma}^m, \quad d\lambda/dt = -b\dot{\gamma}^m (\lambda - \lambda^*)^2.$$

Эти уравнения отражают феноменологический подход авторов [21], выраженный соотношениями $d\lambda/dt = f(\lambda, \dot{\gamma})$, где λ – некоторый структурный параметр.

Эксперименты. В работе экспериментально изучен процесс самопроизвольного тиксотропного разрушения-восстановления связей в исследуемом образце нефти месторождения Кюрсанга (Азербайджан) с плотностью 901 кг/м³, АСП-9%.

Исследования осуществлялись на вискозиметре HAAKER rheostress 600, реологические измерения проводились на регулируемых режимах скоростей сдвига. Методика исследований заключалась в помещении определенного объема данной нефти между коаксиальными цилиндрами реовискозиметра, один из которых подвижен.

На рисунке 1 приведены характерные реологические кривые, полученные в результате лабораторных исследований для указанного образца нефти. Сопоставление положений теории аномальной вязкости с результатами экспериментов, проведенных для нефти, показало, что в исследуемых образцах АСП включения приводят к таким изменениям, при которых проявляются элементы структуры, ответственные за тиксотропные процессы. При увеличении скорости сдвига разрушается структурная решетка, образованная АСП компонентами, изначально присутствующими в нефти. При уменьшении скорости сдвига внутренняя структура композиции неустойчива и характеризуется тиксотропными свойствами. Проведенные исследования подтверждают наличие гистерезисных эффектов (рисунок 1).



Рисунок 1. Зависимость τ ($\dot{\gamma}$)

Эффект гистерезиса обычно связывают с запаздыванием процесса восстановления структуры

или недостаточным разрушением исходной структуры. Основным вопросом является изучение влияния определяющих параметров, кинетика изменения структуры и другие осредненные гидродинамические характеристики течения жидкости, затухают или нарастают течения от “возмущения” со времени.

Процесс самопроизвольного тиксотропного разрушения – восстановления связей в структурированной системе описываются так [22, 23, 24, 25]

$$-\frac{dN}{dt} = k_1 N_+^n - k_2 N_-^m \quad (3)$$

где N_+ и N_- – концентрация неразрушенных и разрушенных связей; $k_{1,2}$ – константы скоростей процессов разрушения и восстановления связей; n и m – константы, которые по аналогии с химическими реакциями определяют порядок реакций процессов разрушения и восстановления связей; t – время.

С другой стороны, известно, что вязкость системы определяется числом связей, сохраняющихся в системе в данный момент времени. Естественно предположить, что концентрация неразрушенных связей определяет удаленность состояния системы от состояния предельного разрушения, которое характеризуется величиной η_{∞} , тогда:

$$N_+ = [\eta(t) - \eta_{\infty}] / (\eta_0 - \eta_{\infty}) \quad \text{и} \quad N_- = [\eta(0) - \eta(t)] / (\eta_0 - \eta_{\infty}) \quad (4)$$

Так видно, что под влиянием деформирования происходит сдвиг динамического равновесия процессов разрушения и восстановления связей и, соответственно, степень разрушения структуры увеличивается.

Кроме того, существует мнение [26, 27], что сдвиговое течение присутствует при сколь угодно малых напряжениях сдвига. Такая неустойчивость структурной вязкости не описывается моделями Пауэлла – Эйринга [28] и Михайлова – Лихтгейма [29] и др., поскольку данные модели устанавливают только равновесные зависимости $\eta_{sp} = \eta_{sp}(\dot{\gamma})$.

Подобная связь структуры и вязкости дисперсных систем экспериментально исследована в работе по теории размерностей и получена зависимость, качественно описывающая кинетику вязкости неньютоновских сред при сдвиговом нагружении [30].

Идентичные процессы происходят в технологии транспорта жидкостей, которые протекают более интенсивно при пульсирующих режимах работы. Авторами статьи [24] изучено квазистационарное пульсирующее течение, а в работе [31] рассмотрены акустические характеристики потока в трубе, в которой исследуются структурные изменения неньютоновских жидкостей.

Важным является изучение «неустановившегося» течения, в котором имеет место разрушение

Таблица. Физико-химические характеристики нефти

Объемный фактор при давлении насыщения	Плотность нефти в поверхностных условиях, г/см ³	Вязкость нефти в поверхностных условиях при T=20 °C, мПа·с	Состав нефти		
			Сера, %	Парафин, %	Асфальтены, %
1,093	0,974	1478,0	0,37	3,12	9,19

структуры реологических сложных сред и установление того, при каких объемных долях дисперсной фазы и интенсивных амплитудах возмущения (скорости сдвига) улучшится основное течение.

В связи с этим в нашей работе рассмотрены некоторые аспекты поведения гетерогенных жидкостей в условиях переменного компонентного состава флюидов и переменных внешних условий.

При экспериментальном исследовании тиксотропного поведения неньютоновской нефти задача состояла в определении динамики напряжения, времени деформации и режима нагружения.

С этой целью исследовано реологическое поведение спектра композиций, включающих нефть и добавки в определенных объемных долях дисперсной фазы ярко выражающей структурированности систем. В качестве дисперсной фазы использовано водорастворимый полимер (0,1% водный раствор полиакриламида) соотношении 1,0 об. %, 2 об.%, 3 об.%, 4 об.% и 5 об.%, усиливающий релаксационные свойства нефти. Использовались пробы нефти месторождения с физическими характеристиками, представленными в таблице.

В первой серии экспериментов исследования проводились на реовискозиметре HAAKER rheostress-600 на регулируемых режимах скоростей сдвига и температуре термостатирования, равной 25 °C. Методика исследований заключалась в размещении исследуемых образцов нефти и нефтеполимерной смеси между коаксиальными цилиндрами реовискозиметра, один из которых подвижен. При определенных угловых скоростях сдвига определялись значения касательного напряжения сдвига t (Па) и оценивалась эффективная вязкость $\eta_{эф}$ (мПа·с).

Результаты экспериментов показали, что равновесное состояние между скоростью и напряжением сдвига устанавливается с некоторым запаздыванием. На рисунках 2-7 приведены характерные реологические кривые, полученные в результате лабораторных исследований для образца нефти (рисунок 2) и нефтеполимерной композиции, содержащей 1,0; 2,0; 4,0 и 5,0 об.% ПАА 0,1%-го водного раствора ПАА (рисунки 3-7). Аналогичные опыты произведены для концентраций 0,1%-го водного раствора полиакриламида в нефти.

Сопоставление положений теории аномальной вязкости с результатами экспериментов, проведенных для ряда концентраций водорастворимого полимера (ПАА) в нефти,

показало, что в исследуемых образцах полимерные включения в углеводородные (нефтяные) системы приводят к таким изменениям, при которых проявляются элементы структуры, ответственные за релаксационно-тиксотропные процессы [32, 33].

При низких значениях скорости сдвига порядок в нефтеполимерной композиции хоть и нарушается введенным полимером, но свойства смеси все еще определяются структурной решеткой, образованной асфальтосмолистыми веществами, изначально присутствующими в нефти. При увеличении скорости сдвига область система «нефть-полимер» проявляет переходные свойства, когда ни нефтяная система, ни полимерные включения не имеют упорядоченной структуры. На переходный характер этой области указывает то, что при изменении состава внутренняя структура композиции неустойчива и характеризуется обратимыми колебаниями вязкости, связанными с процессами её разрушения и восстановления. В дальнейшем происходит рост упорядоченности системы и формирование новой, преимущественно эмульсионной структуры, образованной глобулами полимера и компонентами нефтяной системы. Экспериментальные результаты показаны на рисунках 2-7.

Как видно релаксационно-тиксотропные характеристики циклического деформирования являются функцией сдвигового напряжений воздействия. Это соответствует области деформирования с малыми амплитудами, и граница определяется по зависимости абсолютного значения динамической вязкости от амплитуды скорости деформаций. Рассмотрим общие закономерности изменения вязкостных свойств нефтяных систем при непрерывном деформировании. Как показали эксперименты, с увеличением скорости сдвига на участках интенсивных колебаний вязкости жидкости режим течения изменялся от деформационного, постепенно приобретая характер режима установившегося течения при различной интенсивности изменения вязкости. В области небольших скоростей сдвига имеет место единая кривая, описывающая зависимость различных частот с различными «амплитудами» деформаций зависимостью $|\eta^*| = f(\dot{\gamma}_{max})$. Это значит, что существуют амплитуды изменения вязкости при определенных скоростях сдвига, которые соответствуют переходу от режима деформирования с малыми амплитудами к большому.

На рисунке 8 представлена зависимость максимальных значений скорости сдвига при

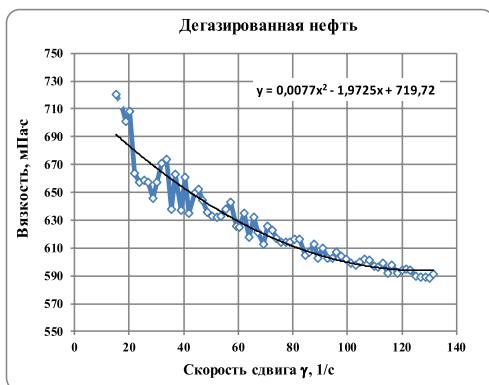


Рисунок 2. Реологические зависимости образцов дегазированной нефти

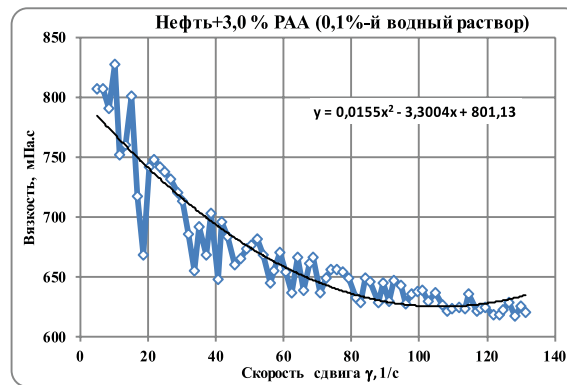


Рисунок 5. Реологические зависимости композиции нефть + 3 об.% полиакриламида (0,1% водный раствор ПАА)

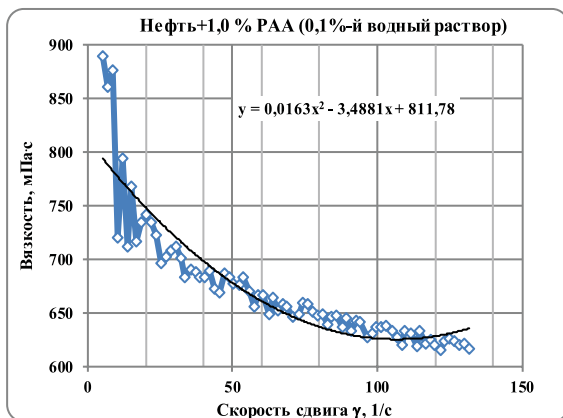


Рисунок 3. Реологические зависимости композиции нефть + 1 об.% полиакриламида (0,1% водный раствор ПАА)

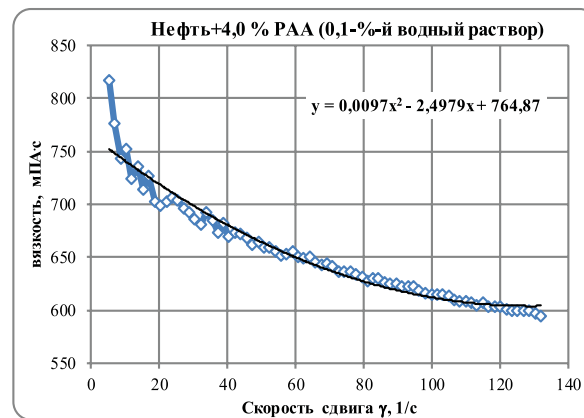


Рисунок 6. Реологические зависимости композиции нефть + 4 об.% полиакриламида (0,1% водный раствор ПАА)

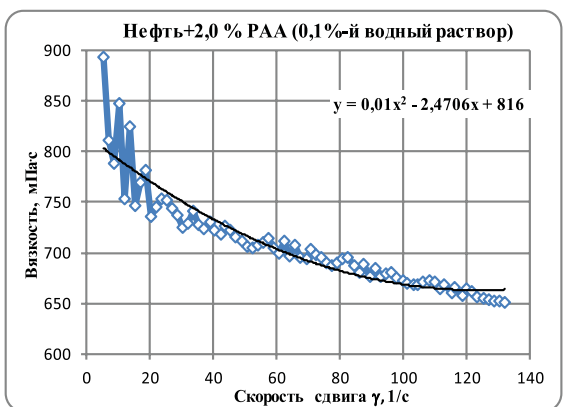


Рисунок 4. Реологические зависимости композиции нефть + 2 об.% полиакриламида (0,1% водный раствор ПАА)

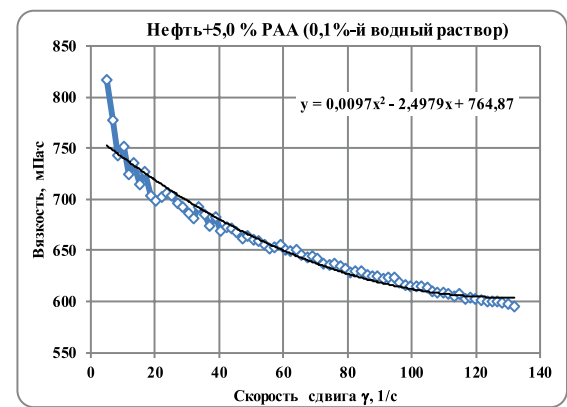


Рисунок 7. Реологические зависимости композиции нефть + 5 об.% полиакриламида (0,1% водный раствор ПАА)

различных концентрациях полиакриламида в нефтеполимерной композиции $|\eta^*| = f(\dot{\gamma}_{\max})$ и описывающая зависимость эффективной вязкости от скорости сдвига для установившихся режимов течения на различных максимальных значениях скоростей сдвига.

При исследовании полидисперсных нефтеполимерных композиции была установлена явная зависимость величины $|\eta^*| = f(\dot{\gamma}_{\max})$ от концентраций 0,1%-го водного раствора полиакриламида в нефти. С ростом концентраций 0,1%-го водного раствора полиакриламида в нефти

изменение «амплитуды» $|\eta^*| = f(\dot{\gamma}_{\max})$ носит нестационарный характер.

Теория. Процесс самопроизвольного релаксационно-тиксотропного затухающего колебания процесса разрушения-восстановления связей в структурированной системе оценивается следующим образом.

Пусть ω_0 собственная частота системы, ξ – коэффициент затухания. Тогда процесс затухания описывается дифференциальным уравнением [34]

$$\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + 2\xi\omega_0 \frac{\partial x}{\partial t} + \omega_0^2 x = 0.$$

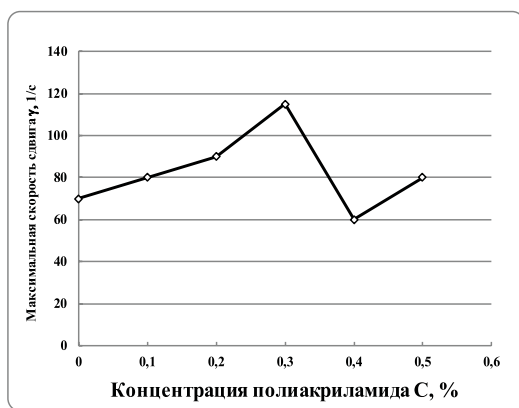


Рисунок 8. Зависимость максимальных значений $f(\dot{\gamma}_{max})$ интенсивности колебаний от величины объемных концентраций 0,1%-го водного раствора полиакриламида в нефти

Легко найти корни характеристического уравнения

$$\lambda_1 = \omega_0(-\xi + \sqrt{\xi^2 - 1})$$

$$\lambda_2 = \omega_0(-\xi - \sqrt{\xi^2 - 1})$$

В нашем случае происходит слабое затухание (рисунки 2 - 7) – слабому затуханию соответствует $\xi < 1$. Тогда решением характеристического уравнения являются два комплексно-сопряженных корня

$$\lambda_{1,2} = -\omega_0 \xi \pm i\omega_0 \sqrt{1 - \xi^2}$$

Решение уравнения можно записать в виде:

$$x(t) = e^{-\xi\omega_0 t} (c_1 \cos(\omega_d t) + c_2 \sin(\omega_d t)),$$

где $\omega_d = \omega_0 \sqrt{1 - \xi^2}$ – собственная частота затухающих колебаний. Константы c_1 и c_2 определяются из начальных условий $x(0) = a, \frac{\partial x}{\partial t}(0) = b$.

Величина τ , определяемая из $\xi = \frac{1}{r}$, называется временем релаксации, причем τ амплитуды убывает по времени.

Таким образом, в представленной работе рассмотрены некоторые аспекты течения гетерогенных флюидов с изменяющимся компонентным составом переменных внешних условиях, учет которых актуален в задачах фильтрации и транспорта жидкостей. Установлено, что при определенных объемных долях дисперсной фазы и значении скорости сдвига наблюдается улучшение характеристик течения и взаимного вытеснения флюидов.

Выводы

- Экспериментально исследованы процессы разрушения-восстановления связей образцов нефти с гетерогенной структурой, при которых проявляются эффекты, связанные с тиксотропным характером флюидов.

- Установлено что, при низких значениях скорости сдвига поведение гетерогенной системы «нефть-полимер» носит переходный характер. В этой области при изменении компонентного состава внутренняя структура композиции неустойчива и характеризуется обратимыми колебаниями вязкости, связанными с процессами её разрушения и восстановления.

- Получена зависимость $|\dot{\gamma}^*| = f(\dot{\gamma}_{max}^*)$, описывающая для различных «амплитуд» деформаций зависимость эффективной вязкости от скорости сдвига для установившихся режимов течения нефтеполимерной композиции.

- Теоретически оценен процесс самопроизвольного релаксационно- тиксотропного затухающих колебаний «разрушения – восстановления» связей в структурированной системе.

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Герман А. М., Иванушкин С. Г. Сопряженный теплообмен при пульсирующем течении нелинейно-вязкопластичных жидкостей в круглой трубе// Теплообмен. (Минск).1984. Т. 5(VII). Ч. 2. С. 31-37.

2 Виноградов Г. В., Малкин А. Я. Реология полимеров. М.: Химия, 1977. 440 с.

3 Добыча тяжелых и высоковязких нефтей / И. М. Аметов, Ю. Н. Байдинов, Л. М. Рузин и др. М.: Недра, 1985. 205 с.

4 Матвеев В. Н., Кирсанов Е. А., Ремизов С. В. Реология структурированных дисперсных систем // Вестник МГУ. 2006. Сер. 2. Химия. Т. 47, № 6. С. 393-397.

5 Оствальд В. Введение в современную коллоидную химию. М.-Л.: Госхимиздат, 1940. 275 с.

6 Урьев Н. Б. Текучесть и растекание структурированных дисперсных систем // Коллоидный журнал. 2006. Т. 68, № 4. С. 539-549.

7 Мирзаджанзаде А. Х., Галлямов М. Н., Шагиев Р. Г. Технические особенности добычи неньютоновской нефти в Башкирии. Уфа. 1978. 176 с.

8 Шадрин Н. Х. О сдвиговых течениях тиксотропной жидкости // ПИММ. 1978. Т.42, №5. С. 856-865.

9 Guo Yanqin, Li Wenhui, Chen Quanhong, Cao Hongxia, Zhang Daofeng Geochemical behaviors of oil and oil-source correlation in Yanchang Yan'an Formations in Ansai-Fuxian area, Ordos basin // Oil & Gas Geology. 2006 Vol.27 (2): 218-224.

10 Матвеев В. Н., Кирсанов Е. А. Вязкость и структура дисперсных систем // Вестник МГУ. 2011. Сер. 2. Химия. Т. 52, № 4. С. 243-276.

11 Denny D. A., Brodkey R. S., J. Appl. Phys. 1962. V.33. № 7. pp. 2269-2274.

12 Green H. Weltmann R. Ind. Eng. Chem. (anal. Ed). 1949. 15. № 3. pp. 1122.

13 Губин В. Е., Губин В. В. Трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. М.: Недра.1982.155 с.

14 Зверева Т. Н., Челинцев С. Н., Яковлев И. Н. Моделирование трубопроводного транспорта нефтехимических производств. М. 1987.176 с.

15 Titkova L. V., Yanovsky Yu. G. Progress and Trends in Rheology. N.Y., 1988. pp. 305.

16 Denny D. A., Brodkey R. S., J. Appl. Phys. 1962. V.33. № 7. pp. 2269-2274.

17 Байков В. А., Бахтизин Р. Н. Распространение нелинейных волн возмущений в смолосодержащих нефтях // Инженерно-физический журнал.1986. Т. 51, № 2. С. 240-242.

18 Abivin P., Henaut I., Chaudemanche J. E. Argillier, F. Chinestaand M. Moan. Dispersed system sinheavy crude oils Oil&Gasscience and technology - Rev. Ifp, 2009. Vol. 64. № 5. pp. 557-570.

19 Саттаров П. М. Распространение волн возмущений в реологически сложных жидкостях // Журнал прикладной механики и технической физики. М.: Наука. Сиб. отд., 1985. С.106-112.

20 Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974. 711 с.

21 Wissler E.H. Visco-elastic effects in the low of non-Newtonian fluids thorough a porous medium. *Ind Eng. Chem. Fundamentals*, 1971. V.10. № 3. 71.

22 Мирзаджанзаде А. Х., Хасанов М. М., Бахтизин Р. Н. Этюды моделирования сложных систем нефтедобычи. Уфа: Гилем, 1999. 464 с.

23 Мидлман С. Течение полимеров. М.: Мир, 1971. 240 с.

24 Нетребко Н. В., Орлова И. В., Регирер С. А. Квазистационарное пульсирующее течение тиксотропной жидкости в цилиндрической трубке // *Механика жидкости и газа*, 1987. № 1. С. 3-9.

25 Моисеева И. Н., Регирер С. А., Юзбашева Н. В. О нестационарных течениях тиксотропной жидкости: отчет / Ин-т механики МГУ. 1979. № 2191. 52 с.

26 Barnes H. A., Walters K. *Rheol. Asta*. 1985. 24. № 4. pp. 323.

27 Barnes H.A. *Theoretical and applied rheology*. Brussels, 1992, 2. pp. 576.

28 Астаритта Д., Маруччи Д. Основы механики неньютоновских жидкостей. М.: Мир, 1978.

29 Михайлов Н. В., Лихтгейма М. Исследование полных реологических кривых и формулы для расчета эффективной вязкости структурированных жидкостей с молекулярно-кинетической интерпретацией входящих в них членов // *Коллоидный журнал*. 1955. Т.17, № 5. С. 364-378.

30 Стебновский С. В. Экспериментальное исследование изменения структуры текучих сред при постоянном сдвиговом нагружении // *ПМТФ* 2010. Т.51, № 4. С.106-115.

31 Барбашов Е. Д., Гликман Б. Ф., Казаков А. А. Экспериментальное и теоретическое определение акустических характеристик потока в цилиндрической трубке // *Акустический журнал*. 1999. Т. 45, № 6. С. 735-741.

32 О возможности регулирования вязкостной аномалии в гетерогенных смесях / А. Х. Шахвердиев, Г. М. Панахов, Э. М. Аббасов, С. Р. Расулова // *Вестник Рос. Акад. естественных наук*. 2014. Т. 14, № 1. С.28-33.

33 Mamdough T. Ghannam viscoelastic behavior of crude oil-polymer emulsions // *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, №6. 2011. pp. 172-180.

34 Бескачко В. П., Головня О. А., Коренченко А. Е. Течение жидкости в цилиндре, возбуждаемое его крутильными колебаниями: сравнение численных и аналитических расчетов // *Математическое моделирование и краевые задачи*. 2007. Ч. 2. С. 21- 25.

REFERENCES

1 German A. M., Ivanushkin S. G. *Sopryazhennyy teploobmen pri pul'siruyushem techenii nelineinovyazkoplastichnykh zhidkosti v krugloi trube. Teploobmen VII*. [Conjugated heat transfer in pulsating flow nonlinear viscous-plastic fluids in a circular pipe. Heat Transfer (VII)]. Minsk, 1984. Vol. 5, p. 2, pp. 31-37. [in Russian].

2 G. Vinogradov, Malkin and j. *Reologiya polimerov*. [Polymer Rheology]. Moscow, Chemistry Publ., 1977. 440 p. [in Russian].

3 Ametov I. M., Bajdikov Y. M., L. M. Ruzin, etc. *Dobycha tyazhelykh i vysokovyazkiykh neftei* [Production of heavy and high-viscosity oil]. Moscow, Nedra Publ., 1985. 205 p. [in Russian].

4 Matveenko V. N., Kirsanov E. A., Remizov S. V. Rheology of disperse systems of structured. *Vestnik MGU.- Vestnik MGU* 2006. Ser. 2. Chemistry Publ., Vol. 47, no. 6. pp. 393-397. [in Russian].

5 Ostval'd V. *Vvedenie v sovremennuyu kolloidnuyu himiyu*. [Introduction to modern colloidal chemistry]. Moscow - Leningrad: Goshimizdat Publ., 1940. 275 p. [in Russian].

6 Ur'ev N. B. structured fluidity and disperse systems *Kolloidnyi Zhurnal*. 2006. T. 68. No. 4. pp. 539-549. [in Russian].

7 Mirzadzhanzade A. H., Gallyamov M. N., Shagiev R. G. *Tekhnicheskie osobennosti dobychi nen'yutonovskoi nefii v Bashkirii*. [Technical features the extraction of non-Newtonian crude oil in Bashkiria]. Ufa, 1978, 176 p. [in Russian].

8 Shadrina N. H. On the shear flow tixotropnoj liquid. *PMM*, 1978. Vol. 42, no. 5. pp. 856-865. [in Russian].

9 Guo Yanqin, Li Wenhou, Chen Quanhong, Cao Hongxia, Zhang Da of eng Geochemical behaviors of oil and oil-source correlation in Yanchang Yan'an Formations in Ansai-Fuxian area, Ordos basin. *Oil & Gas Geology*. 2006 Vol.27 (2): pp. 218-224.

10 Matveenko V. N., Kirsanov E. A. Viscosity of dispersed systems *www. Vestnik MGU*. 2011. Ser. 2. Chemistry. Vol. 52, no. 4. pp. 243-276. [in Russian].

11 Denny D. A., Brodkey R. S., J. Appl. Phys. 1962. V.33. № 7. pp. 2269-2274.

12 Green H. Weltmann R. // *Ind. Eng. Chem. (anal. Ed)*. 1949. 15. № 3. pp. 1122.

13 Gubin V. E., Gubin V. V. *Truboprovodnyi transport nefii i nefteproduktov* [Pipeline transportation of crude oil and petroleum products]. Moscow, Nedra Publ., 1982. 155 p. [in Russian].

14 Zvereva T. N., Chelincev S. N., Yakovlev I. N. *Modelirovanie truboprovodnogo transporta neftehimicheskikh proizvodstv*. [Modeling of pipeline transportation of petrochemical plants.]. Moscow, 1987. 176 p. [in Russian].

15 Titkova L. V., Yanovsky Yu. G. *Progress and Trends in Rheology*. N.Y., 1988. pp. 305.

16 Denny D. A., Brodkey R. S., J. Appl. Phys. 1962. V.33. № 7. pp. 2269-2274.

17 Baikov V. A., Bahtizin R. N. Distribution of nonlinear waves perturbations in oil smolosoderzhashih. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal- Engineering Physics Magazine*. 1986, Vol. 51, no. 2, pp.240-242. [in Russian].

18 Abivin P., Henaut I., Chaudemanche J. E. Argillier, F. Chinestaand M. Moan. Dispersed system sinheavycrudeoils Oil&Gasscience and technology - Rev. Ifp, 2009. Vol. 64. no.5. pp. 557-570.

19 Sattarov R. M. Propagation of disturbances in the rheologicaly complex fluids *Zhurnal Prikladnoi mehaniki i tehniceskoi fiziki.- Journal of applied mechanics and technical physics*. Novosibirsk- Moscow, Science Publ., Nib. Wing, 1985, pp. 106-112. [in Russian].

20 Shlihting G. *Boundary layer theory*. Moscow, Science Publ., 1974. 711 p. [in Russian].

21 Wissler E.H. Visco-elastic effects in the low of non-Newtonian fluids thorough a porous medium. *Ind .Eng. Chem. Fundamentals*, 1971. V.10. no.3. 71 p.

22 Mirzadzhanzade A. H., Hasanov M. M., Bahtizin R. N. *Etyudy modelirovanii slozhnykh sistem neftedobychi*. [Etudes simulations of complex systems of oil production]. Ufa, Gilles Publ., 1999, 464 p. [in Russian].

23 Midlman S. *Technie polimerov*. For polymers. Moscow, Mir, Publ., 1971. 240 p. [in Russian].

24 Netrebko N. V., Orlova I. V., Regirer S. A. Квазистационарное пульсирующее течение тиксотропной жидкости в цилиндрической трубке. *Mekhanika zhidkosti i gaza- Mechanics of liquid and gas*, 1987. no 1. pp. 3-9. [in Russian].

25 Moiseeva I. N., Regirer S. A., Yuzbasheva N. V. On the unsteady flow tixotropnoj liquid. *Report of the Institute of mechanics*, 1979. no 2191. 52 p. [in Russian].

26 Barnes H. A., Walters K. *Rheol. Asta*. 1985. 24. № 4. pp. 323.

27 Barnes H.A. *Theoretical and applied rheology*. Brussels, 1992, 2. pp. 576.

28 Astaritta D., Maruchchi D. The basics of mechanics of non-Newtonian fluids. Moscow, Mir, Publ., 1978. [in Russian].

29 Mihailov N. V., Lihtgeima M. Study on rheological full curves and equations for calculating the effective viscosity of structured liquids from molecular-kinetic interpretation of their constituent members. *Colloidal journal*, 1955. Vol. 17, no. 5. pp.364-378. [in Russian].

30 Stebnovskii C. V. Experimental study of changes in the structure of flowing Wednesday at constant shear loading. *PMTF*.

2010 ,Vol. 51, no. 4. pp.106-115. [in Russian].

31 Barbashov E. D., Glikman B. F., Kazakov A. A. Experimental and theoretical determination of the acoustic characteristics of the flow in the cylindrical pipe. *Akusticheskii zhurnal-Acoustical Physics*, 1999. Vol. 45, no. 6. pp. 735-741. [in Russian].

32 Shahverdiev A. H., Panahov G. M., Abbasov E. M. Rasulova S. R. On the possibility of regulating viscosity also abnormalities in heterogeneous mixtures *Vestnik Rossiiskoi Akademii Estestvennyh nauk*

33 Mamdough T. Ghannam viscoelastic behavior of crude oil-polymer emulsions. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, no.6, 2011. pp. 172-180.

34 Beskachko V. P., Golovnya O. A., Korenchenko A. E. For the liquid in the cylinder, brought his krutil'nyymi variations:

comparison of numerical and analytical calculations. *Matematicheskoe modelirovanie i kraevye zadachi.- Mathematical modeling and boundary value problems*. 2007. P.2. pp. 21-25. [in Russian].

Панахов Г. М., д-р техн. наук, руководитель отдела Института Математики и Механики Член-корреспондент НАН Азербайджана,

г. Баку, Республика Азербайджан

G. M. Panahov, Doctor of Engineering Sciences, Head of the Department Institute of Mathematics and Mechanics of the Azerbaijan National Academy of Sciences, Corresponding Member of NAS of Azerbaijan, Baku, Republic of Azerbaijan e-mail: pan_vniineft@rambler.ru

Аббасов Э. М., Институт Математики и Механики НАН Азербайджана г. Баку, Азербайджан

E. M. Abbasov, Institute of Mathematics and Mechanics of the Azerbaijan National

Academy of Sciences, Baku, Republic of Azerbaijan

Юзбашиева А. О., Институт Математики и Механики НАН Азербайджана г. Баку, Азербайджан

A. O. Yuzbashiyyeva, Institute of Mathematics and Mechanics of the Azerbaijan National Academy of Sciences, Baku, Republic of Azerbaijan

Расулова С. Р., Институт Математики и Механики НАН Азербайджана г. Баку, Азербайджан

Rasulova Sevinj I, Institute of Mathematics and Mechanics of the Azerbaijan National Academy of Sciences, Baku, Republic of Azerbaijan

Гусейнов В. Г. Институт Математики и Механики НАН Азербайджана г. Баку, Азербайджан

V. G. Guseynov, Institute of Mathematics and Mechanics of the Azerbaijan National Academy of Sciences, Baku, Republic of Azerbaijan