

УДК 532.135

О ВОЗМОЖНОСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ВЯЗКОСТНОЙ АНОМАЛИИ В ГЕТЕРОГЕННЫХ СМЕСЯХ

А.Х. ШАХВЕРДИЕВ¹,
Г.М. ПАНАХОВ², Э.М. АББАСОВ²,
С.Р. РАСУЛОВА²

¹Институт системных исследований
процессов нефтегазодобычи
(НП ИСИПН),

²Институт математики и механики
НАН АЗЕРБАЙДЖАНА

В работе приводятся результаты исследования проявления аномалии вязкости в нефтеполимерных композициях. Показано наличие аномального значения концентрации водного раствора полиакриламида в нефтеполимерных композициях, связанного с тиксотропным структурированием гетерогенной смеси. Наблюдаемые эффекты позволяют осуществить регулирование реологических характеристик исследуемых композиций в технологических процессах полимерного заводнения, селективной изоляции высокопроницаемых пропластков, ликвидации последствий аварийных разливов нефтепродуктов.

Ключевые слова: аномалия вязкости, нефть, полиакриламид, нефтеполимерная смесь, тиксотропия, растекание, разлив нефтепродуктов.

ВВЕДЕНИЕ

Закачка водных растворов полимеров в нефтяной пласт в значительной степени нивелирует проводимость фильтрационных путей для нефти и воды, выравнивая фронт вытеснения изменением вязкостной неоднородности, продлевая безводный период эксплуатации скважин, что способствует увеличению нефтеизвлечения.

Использование водорастворимых полимеров приводит к образованию нефтеполимерных композиций в виде эмульсий. Направленное изучение нефтеполимерных композиций с заданными свойствами и повышение их качества возможно только на основе исследования закономерностей их физико-химических превращений и фазовых переходов (ФП). Одной из проблем является отсутствие четких представлений

ABOUT POSSIBILITY OF VISCOSITY ANOMALIES CONTROL IN HETEROGENEOUS MIXTURES

A.H. SHAHVERDIEV, G.M. PANANOV,
E.M. ABBASOV, S.R. RASULOVA

Results of the study of the anomaly in oil-polymer compositions viscosity are presented in the paper. The presence of anomalous concentrations of an aqueous solution of polyacrylamide in oil compositions related to the thixotropic structuring of a heterogeneous mixture was shown. The observed effects make it possible to control rheological properties of investigated compositions in polymer flooding processes, the selective insullation of high permeable interlayers, spill of oil products.

KEYWORDS: viscosity anomalies, oil sample, polyacrylamide, oil-polymer mixture, thixotropy, spreading, oil spill.

о специфике физико-химических явлений в сложных многокомпонентных системах, в частности, о фазовых переходах в высокомолекулярных нефтяных дисперсных системах (НДС) [1, 7, 15, 17, 18].

Результаты лабораторных экспериментов показали, что в инструментальных измерениях на нефтеполимерных смесях можно также наблюдать отклонение в реологическом поведении исследуемых образцов. Такое отклонение закономерности течения растворов и смесей от реологии ньютоновских жидкостей принято называть аномалией вязкости [8].

Определяющие соотношения гидродинамики имеют ограниченное применение в реологии, поскольку реальные среды обладают аномалией вязкости, которая зависит, например, от давления, температуры среды и скорости ее течения). Аномалия проявляется также в за-

висимости напряженно-деформированного состояния среды в данный момент времени от всей предыстории напряжений (или деформаций). К аномалии вязкости могут приводить такие явления, как тиксотропия – способность некоторых дисперсных систем (например, коагуляционных структур) обратимо разжижаться при достаточно интенсивных механических воздействиях и отвердевать, теряя текучесть, при пребывании в покое.

Гораздо сложнее обстоит дело с практическим использованием свойств таких систем в реальных физических процессах. Вряд случаев возникает необходимость в повышении вязкости нефти, например, при разливе нефти на твердой и водной поверхностях для предотвращения ее растекания и концентрации в локальных областях. Поэтому регулирование вязкости (в том числе ее повышение) – это важный технологический процесс придания нефтям определенных свойств. Другая сторона этой проблемы состоит в том, что понимание закономерностей роста вязкости позволит предотвратить его в тех случаях, когда это нежелательно.

В нефти, содержащей асфальтены, смолы и парафины, всегда есть микрообласти с локально повышенной вязкостью, независимо от того, какова макроскопическая вязкость системы в целом. Это свойство на отдельных стадиях смешивания помогает улучшить диспергирование наполнителя в нефть. Поиск новых путей практического использования эффекта колебаний вязкости, несомненно, актуальная задача нефтедобывающей отрасли, но она может быть успешно решена только при условии ясного понимания истинных механизмов реологических аномалий в бинарных системах.

ТИКСОТРОПНАЯ ТЕОРИЯ ВЯЗКОУПРУГОСТИ

В. Оствальд [11] высказал предположение, что аномалия вязкости коллоидных растворов обуславливается структурообразованием, и назвал этот эффект структурной вязкостью. Несомненно, что структурообразование является наиболее частой причиной аномалии вязкости.

Все известные теории аномалии вязкости в таких системах условно делятся на группы, различающиеся по физическому подходу к обсуждаемому эффекту:

1. Теория Г. Эйринга и его последователей, связывающих явление аномалии вязкости с влиянием напряжения или скорости сдвига на потенциальный барьер, препятствующего переходу молекулярно-кинетических единиц из одного равновесного положения в другое [20]. Здесь зависимость эффективной вязкости от скорости деформации рассматривается в рамках общей теории абсолютных скоростей реакции, которая может быть выражена следующим образом [18]:

$$v_0 \sim \exp(-E/kT), \quad (1)$$

где: E – энергия активации течения, определяемая вы-

сотой потенциального барьера; T – абсолютная температура; k – постоянная Больцмана.

Процесс перехода молекулярно-кинетических единиц из одного равновесного положения в другое можно рассматривать как одномерное движение, т.е. под действием напряжения изменяется только частота переходов «вперед-назад».

2. Г.М. Бартенев предлагает формулу следующего вида [1, 2]:

$$\eta = \eta_0 \left[\frac{1}{3} zch - shz \right], \text{ где } z = \omega\tau / kT$$

где $z = \omega\tau / kT$ и рассматриваются как однопараметрические зависимости (η/η_0) от z или τ . В отличие от формулы Эйринга, известной под названием формулы Пауэлла-Эйринга, принимается, что жидкость состоит из частиц, которые при любых напряжениях ведут себя как ньютоновский флюид, и из частиц, обуславливающих неньютоновское поведение системы [1]:

$$\eta = \eta_\infty + \eta_1 [arsh(\gamma \Theta_2)] \quad (2)$$

где η_∞ , η_1 , Θ_2 – константы, определяемые из эксперимента.

Формула Пауэлла-Эйринга качественно описывает поведение аномально-вязких жидкостей.

3. В качестве следующего обобщения предложено уравнение Ри-Эйринга, в котором вязкость рассматривается как непрерывное распределение молекулярно-кинетических единиц по временам релаксации, и, следовательно, записывается в виде интеграла [20]:

$$\eta = \gamma^1 \int_0^\infty F(Q) arch(\gamma Q) dQ. \quad (3)$$

Многopараметрические уравнения типа Пауэлла-Ри-Эйринга, а тем более формула, в которую входит непрерывное распределение параметров, могут описывать экспериментальные данные по зависимости эффективной вязкости от напряжений и скоростей сдвига. В этой группе теорий вязкостные свойства не связываются с их вязкоупругостью и высокоэластичностью. Вязкоупругий характер среды на внешнее воздействие означает, что напряжения, действующие в малой окрестности некоторой точки среды в данный момент времени, зависят от предыстории деформации соответствующего элементарного объема [13, 16, 19].

Качественная картина такой среды впервые представлена Дж. Максвеллом. Обобщение реологического уравнения состояния наследственного типа заключается в том, что в переходных, неустановившихся режимах деформации временные эффекты зависят от вида релаксационной функции.

4. Количественная теория реологических свойств жидкости с релаксационным спектром, зависящим от режима деформации, была развита в работах А.И. Леонова, А.Х. Мирзаджанзаде, К.В. Мукука [5, 9, 10].

Согласно этой теории, при возрастании интенсивности внешнего воздействия на систему происходит частичное разрушение структурных связей, что приводит к подавлению медленных релаксационных процессов.

5. Поскольку такой процесс обратим, теория связывает нелинейность вязкоупругих свойств разбавленных систем с тиксотропными явлениями. Согласно концепции, развиваемой П.А. Ребиндером и его школой, эффективная вязкость определяется равновесной степенью разрушения структуры системы, достигаемой по завершении предстационарной стадии деформирования. Эта равновесная степень разрушения структуры определяется в функции напряжения следующим образом [3]:

$$a = [\eta_0 - \eta(\tau)] / (\eta_0 - \eta_\infty). \quad (4)$$

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. Поэтому зависимость γ/τ обычно используется в форме, предлагаемой активационной теорией Эйринга и эффект изменения структуры с физической точки зрения трактуется как искажение оригинальной формы потенциальных барьеров.

Последовательное развитие представлений о течении как о процессе, аналогичном химической реакции, протекающей в прямом (разрушение связей) и обратном (восстановление связей) направлениях, приводит к возможности формулировки соответствующего кинетического уравнения. Приложение внешней нагрузки сдвигает равновесие процесса. Такая трактовка процесса течения в духе идей Г. Эйринга и П.А. Ребиндера [20] связывает эффект аномалии вязкости с тиксотропными превращениями в системе и позволяет дать кинетическую интерпретацию не только режиму установившегося течения, но и предстационарной стадии деформирования.

В тиксотропной теории вязкоупругости принимается, что если упругая энергия достигает некоторого критического значения, то происходит «разрушение» соответствующего структурного элемента, который в дальнейшем перестает участвовать в развитии напряжений.

6. Из этих соображений в теории Денни-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 [14].

Более детально кинетика процесса самопроизвольного тиксотропного разрушения-восстановления связей в структурированной системе может быть описана как [3, 4]:

А.Х. ШАХВЕРДИЕВ, Г.М. ПАНАХОВ,
Э.М. АББАСОВ, С.Р. РАСУЛОВА
О ВОЗМОЖНОСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ВЯЗКОСТНОЙ
АНОМАЛИИ В ГЕТЕРОГЕННЫХ СМЕСЯХ

$$- \frac{dN_t}{dt} = k_1 N_+^n - k_2 N_-^m, \quad (5)$$

где: N_+ , N_- – концентрация неразрушенных и разрушенных связей; k_1 и k_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.

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_a . Тогда:

$$N_+ = [\eta(t) - \eta_\infty] / (\eta_0 - \eta_\infty)$$

и соответственно:

$$N_- = [\eta(0) - \eta(t)] / (\eta_0 - \eta_\infty).$$

Под влиянием деформирования происходит сдвиг динамического равновесия процессов разрушения и восстановления связей, степень разрушения структуры увеличивается. При течении со скоростью сдвига уравнение принимает вид:

$$\frac{1}{\eta_0 - \eta_\infty} \left(- \frac{d\eta}{dt} \right) = k_1 \left(\frac{\eta - \eta_\infty}{\eta_0 - \eta_\infty} \right)^n \gamma^P - k_2 \left(\frac{\eta_0 - \eta}{\eta_0 - \eta_\infty} \right)^m \quad (6)$$

где P – константа, определяющая влияние скорости сдвига на процесс разрушения структурных связей в системе. По достижении установившегося течения должно существовать равновесие между процессами разрушения и восстановления связей в системе. Этому отвечает условие $(d\eta/dt) = 0$. Тогда вязкость в установившемся режиме течения определяется из уравнения:

$$k_1 \left(\frac{\eta - \eta_\infty}{\eta_0 - \eta_\infty} \right)^n \gamma^P = k_2 \left(\frac{\eta_0 - \eta}{\eta_0 - \eta_\infty} \right)^m. \quad (7)$$

Зная константы k_1 , k_2 , n , m , P , η_0 , η_∞ можно оценить зависимость эффективной вязкости от скорости сдвига.

Обилие реологических уравнений ставит перед исследователем проблему выбора адекватного уравнения течения. Во многом этот выбор определяется возможностью наилучшей аппроксимации экспериментальных данных. В ряде случаев определенную сложность вызывает теоретическое обоснование экспериментальных данных известными реологическими моделями сдвигового течения. Приведенные известные модели не всегда могут с достаточно хорошей точностью описать полученные лабораторные результаты. Приводимые ниже результаты лабораторных опытов и наблюдаемые эффекты могут иметь определенное

прикладное и технологическое значение, что позволит наиболее адекватно описать процесс соответствующей реологической моделью.

ЭКСПЕРИМЕНТ

В исследовании рассмотрены некоторые аспекты реологического поведения гетерогенных жидкостей при изменении компонентного состава флюидов и внешних условий течения.

При экспериментальном исследовании релаксационного 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 определенном объемном соотношении водорастворимого полимера (0,1% водный раствор полиакриламида) – 1,0 об.%, 2 об.%, 3 об.%, 4 об.% и 5 об.%, усиливающих релаксационные свойства нефти. Использовались пробы нефти месторождения с физическими характеристиками, представленными в таблице.

В первой серии исследования проводились на реовискозиметре НААКЕ RheoStress- 600 на регулируемых режимах скоростей сдвига и температуре термостатирования, равной 25° С.

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 τ (Па) и оценивалась эффективная вязкость $\eta_{эф}$ (мПа·с).

Результаты экспериментальных работ показали, что равновесное состояние между скоростью и напряжением релаксации устанавливается с некоторым запаздыванием [5, 6, 9, 12].

На рис. 1 и 2 приведены характерные реологические кривые, полученные в результате лабораторных исследований образца нефти (кривая 1, рис. 1) и нефтеполимерной композиции, содержащей 3,0 об.% 0,1%-го водного раствора ПАА (кривая 1, рис. 2). Аналогичные опыты произведены для концентраций 0,1%-го водного раствора полиакриламида в нефти: 1,0; 2,0; 4,0 и 5,0 об.% ПАА.

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 релаксационные процессы.

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

Во второй серии исследований были поставлены эксперименты, позволившие определить характер процесса структурной перестройки в нефтеполимерной композиции при различных концентрациях 0,1%-го водного раствора ПАА в нефти. Исследовалась динамика растекания композиции на твердой поверхности с использованием конуса АзНИИ. Определялась скорость и радиус перемещения границы жидкости в зависимости от процентного содержания полимерных добавок в объеме нефтяной пробы весом 100 г. Предварительно перемешанная смесь заполняла объем конуса и после его мгновенного опорожнения фиксировалась динамика ее растекания по градуированной поверхности.

Полученные зависимости (рис. 3) показали, что реологическое поведение исследуемых нефтеполимерных образцов в определенной степени соответствует тиксотропному характеру. При этом динамика растекания на конусе АзНИИ такова, что изменение концентрации водного раствора ПАА в нефти приводит к немонотонному смещению скорости перемещения границы смеси по твердой поверхности. Если при растекании нефти происходит быстрое разрушение

ТАБЛИЦА.

Физико-химические характеристики использованной в экспериментах нефти

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

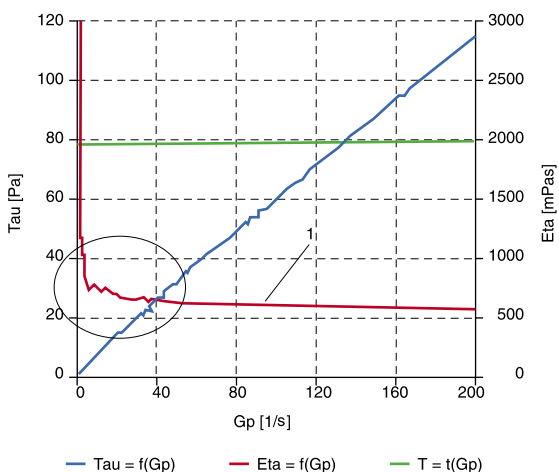


Рис. 1.

Реологические зависимости образцов дегазированной нефти

структуры композиции, то при добавках полимерного раствора вначале (при 1,0 об.% ПАА) вид растекания близок к поведению образца нефти без добавок полиакриламида, а затем (при концентрации, равной 3,0 об.% ПАА) характер растекания приобретает S-образной вид. Это может свидетельствовать о протекании в объеме смеси перестройки полимер-углеводородных связей. Процесс разрушения и восстановления внутренней структуры системы при этом тесно связан с колебаниями вязкости и, в конечном итоге, определяет динамику тиксотропного поведения композиций. При дальнейшем увеличении концентрации ПАА наблюдается тенденция возврата системы в состояние, близкое к исходному характеру динамики растекания (при меньших концентрациях полимерного раствора).

Графическое представление зависимости полученных экспериментальных значений радиуса растекания от концентрации водного раствора ПАА в нефти (при $t = 15^\circ \text{C}$) имеет немонотонный вид с ярко выраженной критической точкой при значении концентрации ПАА, равном 3,0 об.% (рис. 4). Такой характер кривых коррелирует с результатами реологических опытов, в которых при аналогичной концентрации полиакриламида в нефти наблюдаются наибольшие колебания значений вязкости (рис. 2).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Таким образом, флуктуации вязкости нефтеполимерных смесей в определенном диапазоне концентраций полимерного раствора указывают на проявление динамического равновесия в процессе тиксотропного структурирования в гетерогенной композиции. Наличие критического значения концентрации полимер-

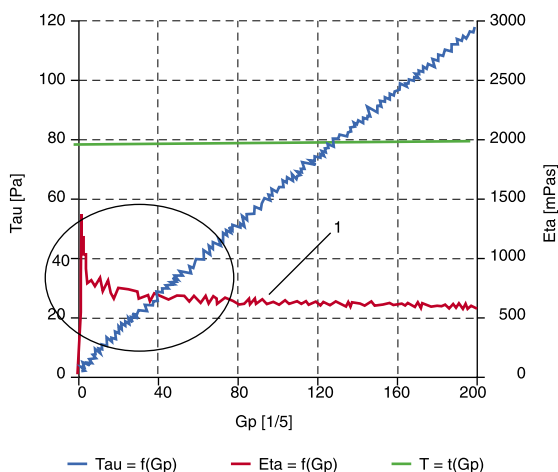


Рис. 2.

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

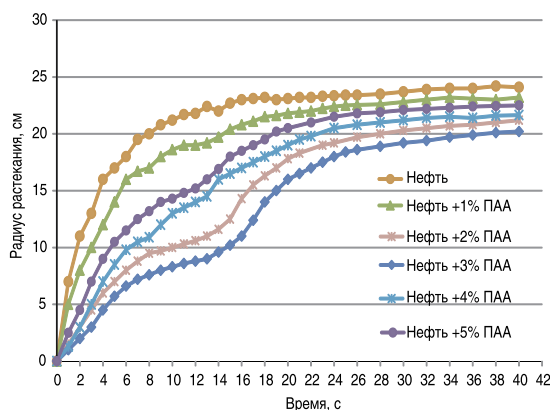


Рис. 3.

Результаты исследований на конусе АзНИИ

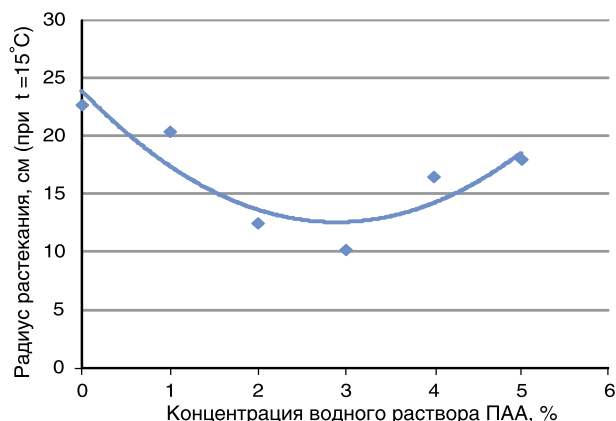


Рис. 4.

Зависимость радиуса растекания от концентрации 0,1% водного раствора ПАА в нефти (при $t = 15^\circ \text{C}$)

ного раствора в исследуемых композициях позволяет реализовать направленное регулирование реологических характеристик таких композиций. Оптимальным значением концентрации полимерных добавок, при которых образуются структурированные нефтеполимерные смеси, является 3 об.% (0,1% водный раствор) полиакриламида.

В наблюдаемых эффектах можно отметить важную прикладную составляющую, связанную с возможностью управления реологическими свойствами технологических композиций, применяемых в процессах повышения нефтеотдачи пластов: селективной изоляции высокопроницаемых пропластков, обводненных участков призабойной зоны, разработке жидкостей гидроразрыва, полимерном заводнении залежи. Кроме того, регулирование структурной устойчивости углеводородных жидкостей может быть использовано для предотвращения катастрофических последствий аварийных разливов нефти.

ЛИТЕРАТУРА

1. **БАРТЕНЕВ Г.М.** Влияние напряжения сдвига на вязкость линейных полимеров // *Высокомолекулярные соединения*. 1964. Т. 6, №12. С. 2155–2162.
2. **БАРТЕНЕВ Г.М., ЕРМИЛОВА Н.В.** К теории реологических свойств твердообразных дисперсных структур // *Коллоидный журнал*, 1967. Т. 29, № 6. С. 771–778.
3. **ВИНОГРАДОВ Г.В., МАЛКИН А.Я.** Реология полимеров. М.: Химия, 1977. 440 с.
4. **ВШИВКОВ С.А., КУЛИЧИХИН С.Г., РУСИНОВА Е.В.** Фазовые переходы в растворах полимеров, индуцированные механическим полем // *Успехи химии*, 1988. Т. 67, № 3. С. 261–273.
5. **ЛЕОНОВ А.И., ВИНОГРАДОВ Г.В.** Реология полимеров. Теория тиксотропии // *ДАН СССР*, 1964. Т. 155, № 2. С. 406–409.
6. **МАНДРИК И.Э., ПАНАХОВ Г.М., ШАХВЕРДИЕВ А.Х.** Научно-методические и технологические основы оптимизации процесса повышения нефтеотдачи пластов. М.: Нефтяное хозяйство, 2010. 288 с.
7. **МАТВЕЕНКОВ В.Н., КИРСАНОВ Е.А., РЕМИЗОВ С.В.** Реология структурированных дисперсных систем. Вестник Моск. ун-та. Сер. 2. Химия, 2006. Т. 47, №6. С. 393–397.
8. **МЕЖИКОВСКИЙ С.М., ВАСИЛЬЧЕНКО Е.И., ШАГИНЯН Ш.А.** Аномалии роста вязкости в бинарных полимерных системах // *Успехи химии*. 1988. Т. 57. № 11. С. 1867–1887.
9. **МИРЗАДЖАНЗАДЕ А.Х., ХАСАНОВ М.М., БАХТИЗИН Р.Н.** Этюды о моделировании сложных систем нефтедобычи: нелинейность, неравновесность, неоднородность. Уфа, Гилем, 1999. 464 с.
10. **МУКУК К.В.** Элементы гидравлики релаксирующих аномальных систем. Ташкент: ФАН, 1980. 115 с.
11. **ОСТВАЛЬД В.** Введение в современную коллоидную химию. М.: Л.: Госхимиздат, 1931.
12. **РОГАЧЕВ М.К., КОЛОНСКИХ А.В.** Исследование вязкоупругих и тиксотропных свойств нефти Усинского месторождения // *Нефтегазовое дело*. 2009. Т. 7, № 1. С. 37–42.
13. **ABIVIN P., HENAUT I., CHAUDEMANCHE J.F.** Argillier, F. Chinesta and M. Moan. Dispersed Systems in heavy crude oils // *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP*, 2009. Vol. 64. N. 5. P. 557–570.
14. **DENNY D.A., BRODKEY R.S., J. APPL.** Kinetic interpretation of non-Newtonian flow // *Phys.*, 1962. V. 33, № 7. P. 2269–2274.
15. **LANGEVIN D., POTEAU S., HÉNAUT I., ARGILLIER J.F.** Crude oil emulsion properties and their application to heavy oil transportation // *Oil & Gas Science and Technology. Rev. IFP*. 2004. Vol. 59. N 5. P. 511–521.
16. **MAMDOUH T.** Ghannam viscoelastic behavior of crude oil–polymer emulsions // *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 2011. № 6. P. 172–180.
17. **FIXMAN M.** Radius of gyration of polymer chains // *J. Chem. Phys.* 1962. V. 36. № 2. P. 310.
18. **QUINTERO C.G., NOÏK C., DALMAZZONE C., GROSSIORD J.-L.** Modelling and characterisation of diluted and concentrated water-in-crude oil emulsions: comparison with classical behavior // *Rheologica Acta*. V. 47, N 4. P. 417–424.
19. **RAJINDER PAL.** Viscoelastic properties of polymer-thickened oil-in-water emulsions. *Chemical Engineering Science*. 1996. V. 51, № 12. P. 3299–3305.
20. **REE T., EYRING H.** Theory of Non-Newtonian Flow: I. Solid Plastic System; II. Solution System of High Polymers // *Journal of Applied Physics*, 1955. V. 26, № 7. P. 793–809.

Шахвердиев Азизага Ханбаба оглы,
д.т.н., генеральный директор Института системных исследований процессов нефтегазодобычи РАЕН

☎ 117105, г. Москва, Варшавское ш., д. 8,
тел.: +7 (915) 199-78-79, e-mail: ah_shah@mail.ru

Панахов Гейлани Минхадж оглы,
д.т.н., руководитель отдела «Механика жидкости и газа» Института математики и механики Национальной академии наук Азербайджана

☎ AZ1141, Азербайджан, г. Баку, ул. Б. Вагабзаде,
тел.: +7 (99412) 539-02-21, e-mail: pan_vniineft@rambler.ru

Аббасов Эльдар Мехти оглы,
к.т.н., в.н.с. Института Математики и Механики Национальной Академии Наук Азербайджана

☎ AZ1141, Азербайджан, г. Баку, ул. Б. Вагабзаде,
тел.: +7 (99412) 539-02-21, e-mail: eldab@yandex.ru

Расулова Севиндж Рамиз гызы,
научный сотрудник Института математики и механики Национальной Академии наук Азербайджана,

☎ AZ1141, Азербайджан, г. Баку, ул. Б. Вагабзаде,
тел.: +7 (99412) 539-02-21,
e-mail: seva.yuzbekova@yahoo.com