

ВЛИЯНИЕ ВИБРОВОЗДЕЙСТВИЯ НА ТРАНСФОРМАЦИЮ НЕФТЕЙ И ИХ ВЯЗКОУПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК

А.С.Стреков, А.А.Гаджиев

*Институт геологии НАН Азербайджана,
AZ1143, Баку, просп. Г. Джавида, 29А*

В статье приводятся результаты экспериментальных исследований влияния вибровоздействия в диапазоне низкочастотных колебаний на вязкоупругие характеристики нефтей. Установлено, что вибровоздействие приводит к перестройке надмолекулярной структуры нефтей, которая формируется в соответствии с их углеводородным составом и параметрами вибрации. В результате, у вновь сформированных образцов нефти наблюдается существенное изменение их вязкоупругих характеристик.

Введение

Одним из факторов, определяющих повышение эффективности извлечения нефти из нефтяных коллекторов при применении вибровоздействия, является увеличение её подвижности. Увеличение подвижности нефти при вибровоздействии происходит как за счет его влияния на капиллярно-поверхностные силы, так и на вязкость нефти, насыщающей пласт (Садовский и др., 1986).

Постановка задачи

Изучение влияния вибровоздействия на вязкость жидкостей показало, что она под действием упругих колебаний уменьшается (Гадиев, 1977; Сургучев и др., 1991).

Известно, что наряду с обычными вязкими ньютоновскими жидкостями существуют жидкости, называемые неньютоновскими, для которых характерно проявление как псевдопластических, так и вязкоупругих и неравновесных (релаксационных) свойств. Неньютоновские свойства нефти оказывают существенное влияние на параметры, характеризующие процесс вытеснения нефти из пористых сред (Мирзаджанзаде и др., 1986).

Изучение влияния вибровоздействия на эффективную вязкость неньютоновских жидкостей, проявляющих псевдопластический характер течения, показало, что и для данного класса жидкостей в области частот вибрации 20-100 Гц характерно уменьшение эффективной вязкости (Везиров и др., 1998);

Везиров и др., 1999).

В то же время влияние вибровоздействия, особенно в области низких частот, на реологические характеристики вязкоупругих свойств нефтей изучено недостаточно, что может привести к снижению его эффективности при применении на нефтяных пластах, насыщенных такими нефтями. Поэтому представляет интерес исследование влияния вибровоздействия на вязкоупругие характеристики нефтей в области низких частот вибрации.

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

Экспериментальные исследования влияния вибровоздействия на вязкоупругие характеристики нефтей выполнены на вибростенде ВЭДС-400А и на специально собранной установке, состоящей из следующих элементов: генератор низкочастотных колебаний, регулятор частот и предметный стол, который механически связан с генератором низкочастотных колебаний. При проведении экспериментов на предметный стол крепилась ёмкость объёмом 150 см³ с объёмом исследуемой нефти 100 см³.

Исследования выполнены на нефтях, физико-химические характеристики которых приведены в таблице 1, при частотах вибрации и амплитудах соответственно 6 Гц и 1,06 мм; 10 Гц и 1,67 мм; 12 Гц. и 1,27 мм; 20 Гц и 1,1 мм. Выбор этих частот вибрации, с одной стороны, был связан с тем, что они находятся в диапазоне доминантных частот 1-300 Гц (Боголюбов и др., 2000; Николаевский, 1996),

а с другой стороны, с тем, что при применении вибровоздействия с земной поверхности оптимальными оказываются низкие частоты 10-20 Гц (Симонов и др., 2000; Николаевский и др., 2006). Для получения стабильных, воспроизводимых результатов образцы нефти подвергались вибрации в течение 180 минут.

Реологические характеристики нефтей до и после вибровоздействия замерялись на Реотесте 2.1 в диапазоне скоростей сдвига 5,4-1312 с⁻¹ по стандартной методике.

Полученные экспериментальные данные представлены на рис.1, 2, 3, а проведенные расчеты на их основе сведены в табл.1,2.

На рис.1 приведены кривые течения для исследуемых нефтей, построенные по данным ротационной вискозиметрии, без вибровоздействия (кр.1) и в зависимости от вибровоздействия при частотах вибрации 6 Гц (кр. 2), 10 Гц (кр.3), 12 Гц (кр. 4), 20 Гц (кр. 5). Эти кривые течения были обработаны согласно степенной зависимости Оствальда-Де Вале (Рейнер, 1964):

$$\tau = \kappa \dot{\gamma}^n, \quad (1)$$

где τ – напряжение сдвига, Па; κ – коэффициент консистентности, Па·сⁿ; $\dot{\gamma}$ – градиент скорости сдвига, с⁻¹; n – показатель течения.

Результаты обработки приведены в табл.1. Как видно из табл.1, все исследуемые нефти как до, так и после вибровоздействия обладают псевдопластическими свойствами ($n < 1$), т.е с увеличением скорости сдвига их эффективная вязкость снижается. Однако необходимо отметить, что при вибровоздействии практически для всех исследуемых нефтей псевдопластичность с увеличением частот их вибрации имеет тенденцию к небольшому уменьшению. Например, для нефти из месторождения Бибиэйбат без вибровоздействия показатель течения – 0,6690, а при частоте вибрации 20 Гц он уже имеет значение 0,7244 (см. табл. 1). С увеличением частот вибрации также наблюдается разжижение всех исследуемых нефтей, о чем можно судить по снижению коэффициента консистентности (см. табл. 1).

Таблица 1

Физико-химические показатели нефтей и зависимость их реологических констант от частоты и амплитуды вибрации

Тип нефти	Плотность, кг/м ³	Содержание, % (масс)			Параметры вибрации		Реологические константы	
		смола	асфальтенов	парафина	Частота, Гц	Амплитуда, мм	κ	n
Пираллахы	926	14	0,8	2	0	0	4,1382	0,8639
					6	1,06	3,6125	0,8831
					10	1,67	2,4245	0,8908
					12	1,27	2,3717	0,8770
					20	1,1	2,2564	0,8789
Бибиэйбат	877	6,5	0,12	0,76	0	0	0,3764	0,6690
					6	1,06	0,3333	0,6764
					10	1,67	0,2874	0,6871
					12	1,27	0,2402	0,7078
					20	1,1	0,2102	0,7244

На рис. 2 приведены зависимости эффективной вязкости исследуемых нефтей от скорости сдвига при различных частотах вибрации. Как видно из рисунка, для всех исследуемых нефтей по мере роста частот вибрации наблюдается снижение эффективной вязкости по сравнению с нефтью, не подвергшейся вибровоздействию (ср. кр.1 с кр. 2, 3, 4, 5 на рис. 2 а, б). Причем для нефти с большей эффективной вязкостью эффект снижения эффективной вязкости под действием вибрации оказывается большим, чем для нефти с меньшей эффективной вязкостью. Например, для нефти месторождения Пираллахы эффективная вязкость нефти без вибровоздействия при скорости сдвига $16,2 \text{ с}^{-1}$ составляет $289,8 \text{ мПа}\cdot\text{с}$, а при вибровоздействии на неё при частоте вибрации 20 Гц эффективная вязкость равна уже $159,4 \text{ мПа}\cdot\text{с}$, т.е. эффективная вязкость снижается на $130,4 \text{ мПа}\cdot\text{с}$. В то же время для нефти месторождения Бибиэйбат при тех же скоростях сдвига эффективная вязкость снижается с $15,4 \text{ мПа}\cdot\text{с}$ до $10,5 \text{ мПа}\cdot\text{с}$ при частоте вибрации 12 Гц , т. е. в этом случае эффективная вязкость снижается лишь на $4,9 \text{ мПа}\cdot\text{с}$.

Для оценки вязкоупругих свойств исследуемых нефтей по данным ротационной вискозиметрии воспользуемся методикой, предложенной в работе (Cross, 1968). Согласно этой методике зависимость между касательным напряжением τ_{12} и эффективной вязкостью

μ_3 для ротационной вискозиметрии можно представить в следующем виде:

$$\frac{1}{\mu_3^2} = \frac{1}{\mu_t^2} + \frac{\tau_{12}^2}{4G^2 \mu_t^2}, \quad (2)$$

где μ_t - истинная вязкость исследуемой нефти, $\text{Па}\cdot\text{с}$; G - модуль упругости, Па .

Если μ_t и G постоянны, то $\frac{1}{\mu_3^2}$ и τ_{12}^2 связаны между собой линейной зависимостью. Причем, если полученная зависимость на графике имеет вид прямой и параллельна

оси τ_{12}^2 , то она характеризует вязкое течение. Линейность и нелинейность полученной зависимости на графике соответствует проявлению линейных и нелинейных вязкоупругих свойств.

На рис.3 представлены экспериментальные данные, пересчитанные в координатах $\frac{1}{\mu_3^2} = f(\tau_{12}^2)$. Анализ приведенных на рис. 3 кривых показал, что исследуемые нефти обладают нелинейной вязкоупругостью. Смещение кривых в координатах $(\frac{1}{\mu_3^2}, \tau_{12}^2)$ вверх свидетельствует о снижении вязкости нефти с увеличением частоты вибрации (ср. кр.1 с кр. 2, 3, 4, 5 на рис. 3 а, б).

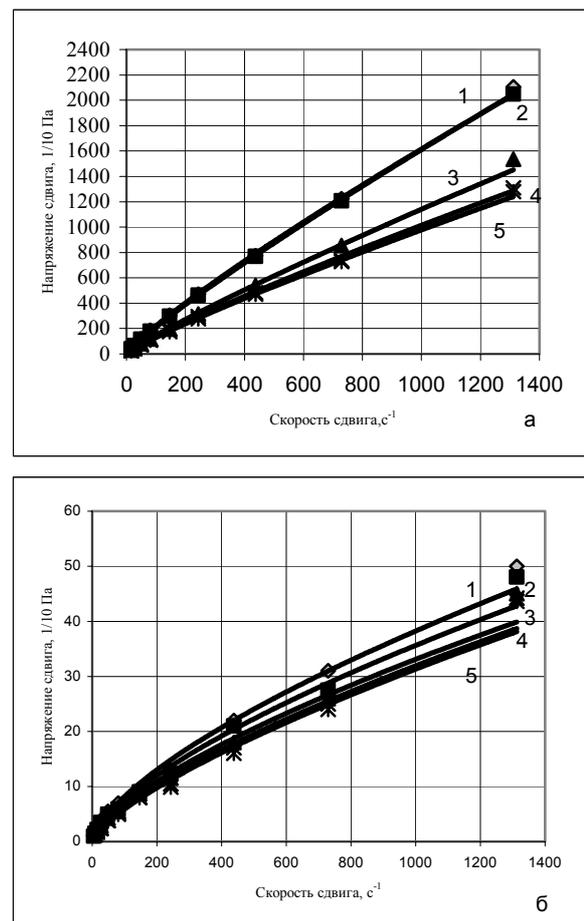


Рис. 1. Кривые течения нефтей м/я Пираллахы (а), Бибиэйбат (б) в зависимости от вибровоздействия при частотах вибрации, Гц: 1- без вибровоздействия; 2 - 6; 3 - 10; 4 - 12; 5 - 20

Как показано в работе (Мирзаджанзаде и др., 1985), полученную в координатах $1/\mu_s^2 = f(\tau_{12}^2)$ кривую можно с достаточной точностью аппроксимировать кусочно-линейной зависимостью, т.е. описать ее рядом линейных максвелловских моделей, после чего по пересечению с осью $1/\mu_s^2$ и наклону прямой определить $1/\mu_i^2$ и $\frac{1}{4G^2\mu_i^2}$, а затем истинную вязкость μ_i , модуль упругости G и время релаксации θ_p для каждого прямолинейного участка.

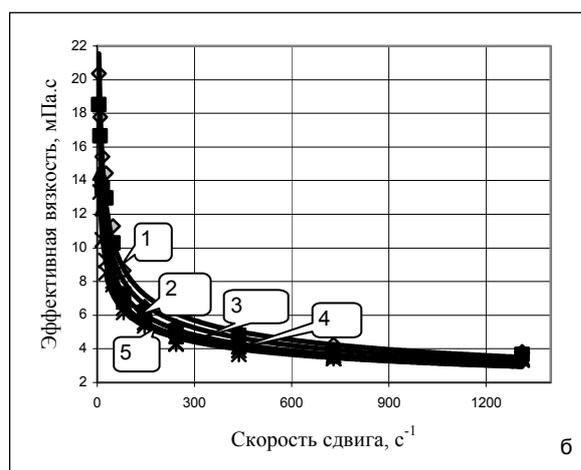
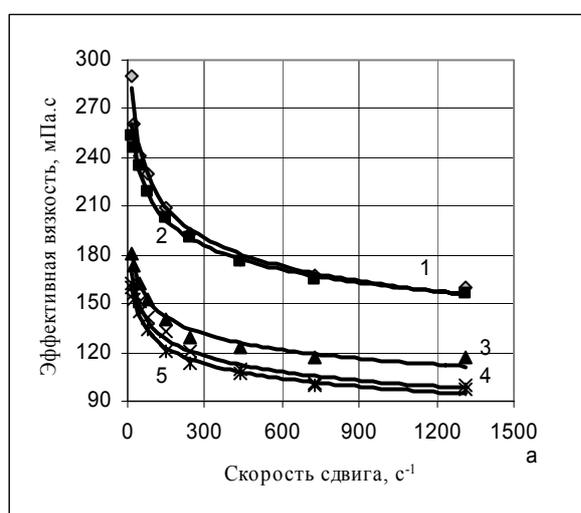


Рис. 2. Зависимость эффективной вязкости нефтей м/я Пираллахы (а), Бибиэйбат (б) от скорости сдвига при различных частотах вибрации, Гц: 1- без вибрации; 2 - 6; 3 - 10; 4 - 12; 5 - 20

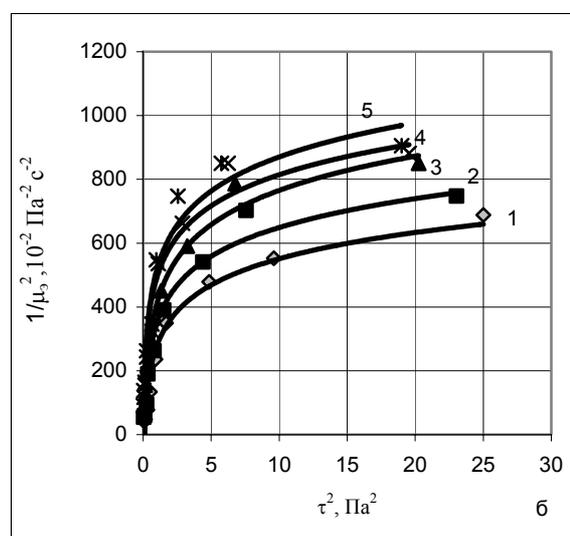
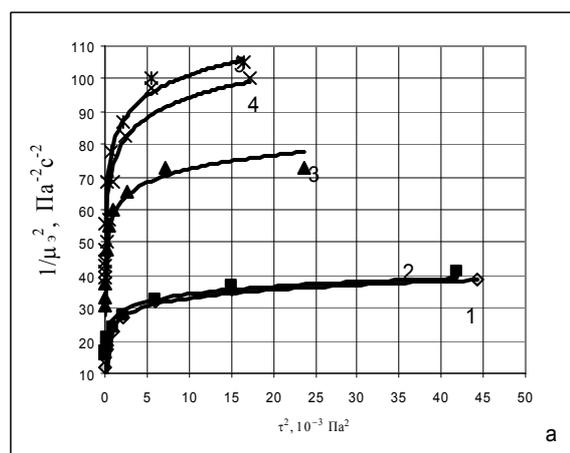


Рис. 3. Зависимость $1/\mu_s^2$ от τ^2 для нефтей м/я Пираллахы (а), Бибиэйбат (б) при частотах вибрации, Гц: 1 - без вибрации; 2 - 6; 3 - 10; 4 - 12; 5 - 20

В табл. 2. приведены рассчитанные по вышеприведенной методике вязкоупругие характеристики исследуемых нефтей в зависимости от параметров вибровоздействия. Разбивка кривых на прямолинейные участки в определенных диапазонах изменений зависимости напряжение сдвига – скорость сдвига позволила для каждой частоты вибрации определить спектр времен релаксации и реологические параметры (модуль упругости, истинную вязкость) исследуемых нефтей. Как видно из табл.2, с одной стороны, с ростом диапазона изменения зависимости напряжение сдвига – скорость сдвига для каждой частоты и амплитуды вибрации наблюдается тенденция уменьшения истинной вязкости,

времени релаксации и роста модуля упругости для исследуемых нефтей. С другой стороны, такое же явление наблюдается и с ростом частот и амплитуд вибрации в исследованном диапазоне их изменения. Причем вязкоупру-

гие характеристики определяются также физико-химическими свойствами нефтей (ср. вязкоупругие характеристики для нефти месторождения Пираллахы и Бибиэйбат).

Таблица 2

Зависимость вязкоупругих характеристик нефтей от параметров вибрации

Тип нефти	Параметры вибрации		Интервал изменения		Истинное значение вязкости, Па·с	Модуль упругости, Па	Время релаксации, с
	Частота, Гц	Амплитуда, мм	Напряжение сдвига, 1/10 Па	Скорость сдвига, с ⁻¹			
1	2	3	4	5	6	7	8
Пираллахы	0	0	46,9-117,4	16,2-48,6	0,292	0,814	0,358
			117,4-305,2	48,6-145,8	0,248	0,977	0,253
			305,2-773,8	145,8-437,4	0,213	1,337	0,159
			773,8-2105,3	437,4-1312	0,177	1,074	0,164
	6	1,06	41,09-114,4	16,2-48,6	0,254	0,734	0,346
			114,4-296,4	48,6-145,8	0,238	0,864	0,275
			296,4-768,1	145,8-437,4	0,206	1,122	0,183
			768,1-2048,4	437,4-1312	0,176	1,189	0,148
	10	1,67	29,3-79,2	16,2-48,6	0,183	1,157	0,158
			79,2-205,4	48,6-145,8	0,163	1,483	0,074
			205,4-540,5	145,8-437,4	0,136	2,795	0,048
			540,5-1536,3	437,4-1312	0,121	2,785	0,043
	12	1,27	26,4-73,3	16,2-48,6	0,163	2,582	0,063
			73,3-193,7	48,6-145,8	0,152	1,241	0,122
			193,7-481,3	145,8-437,4	0,136	1,688	0,08
			481,3-1308,7	437,4-1312	0,108	1,581	0,068
	20	1,1	25,8-70,4	16,2-48,6	0,16	2,631	0,06
			70,4-176,1	48,6-145,8	0,15	1,675	0,089
			176,1-469,6	145,8-437,4	0,121	1,513	0,079
			469,6-1280,2	437,4-1312	0,106	1,646	0,064
Бибиэйбат	0	0	2,5-5,4	16,2-48,6	0,0185	0,183	0,1
			5,4-9,5	48,6-145,8	0,01	0,4099	0,024
			9,5-20	145,8-437,4	0,0067	0,435	0,015
			20-50	437,4-1312	0,0047	0,529	0,0088
	6	1,06	2,2-5	16,2-48,6	0,0157	0,2121	0,074
			5-9	48,6-145,8	0,0125	0,29	0,0431
			9-21	145,8-437,4	0,0064	0,4743	0,0135
			21-48	437,4-1312	0,0042	0,506	0,0083
	10	1,67	2-4,3	16,2-48,6	0,0142	0,2289	0,062
			4,3-8,7	48,6-145,8	0,009	0,3017	0,0298
			8,7-18	145,8-437,4	0,0064	0,4868	0,0132
			18-45	437,4-1312	0,004	0,555	0,0072
	12	1,27	1,7-3,9	16,2-48,6	0,0112	0,2682	0,0417
			3,9-8,1	48,6-145,8	0,0087	0,3742	0,0232
			8,1-17	145,8-437,4	0,0056	0,5456	0,0104
			17-44,2	437,4-1312	0,0037	0,5292	0,0069
	20	1,1	3,8-8	48,6-145,8	0,0083	0,3917	0,2119
			8-16	145,8-437,4	0,0058	0,5724	0,1022
			16-43,6	437,4-1312	0,0036	0,4635	0,0077

Таким образом, построенные зависимости на рис.3, а затем рассчитанные данные в табл.2 позволяют для каждой частоты и амплитуды вибрации определить значение скоростей сдвига, при которых проявляются те или иные вязкоупругие свойства нефтей. Используя полученные значения скоростей сдвига можно для каждого конкретного случая применения вибровоздействия так подбирать параметры вибрации, чтобы можно было бы обеспечить максимально возможный для данного метода коэффициент извлечения нефти.

Наблюдаемый эффект изменения вязкоупругих характеристик можно объяснить протеканием процесса трансформации надмолекулярной структуры и ослаблением межмолекулярного взаимодействия в результате возбуждения в образце нефти возвратно-поступательного движения микромицелл низкочастотным вибрационным полем.

Заключение

Таким образом, исходя из представлений о коллоидной природе нефти, и на основании проведенного цикла исследований можно сделать вывод о том, что при вибровоздействии происходит трансформация надмолекулярной структуры нефти, которая формируется в соответствии с ее углеводородным составом и параметрами вибрации. В результате перестройки надмолекулярной структуры при вибровоздействии каждый раз в зависимости от параметров вибрации создается как бы новый образец нефти, отличный от образца нефти, не подвергнутого вибровоздействию. У образцов нефти, подвергшихся вибровоздействию, происходит ослабление межмолекулярного взаимодействия, в результате чего наблюдается изменение реологических характеристик, а именно, с ростом частоты вибрации наблюдается снижение эффективной (истинной) вязкости нефтей и изменение их упругих свойств.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что одним из механизмов увеличения нефтеотдачи при применении вибровоздействия является изменение вязко-

упругих характеристик нефтей в поле низкочастотных упругих волн. Поэтому, регулируя параметры вибровоздействия на нефтяной коллектор в каждом конкретном случае и тем самым целенаправленно воздействуя на вязкоупругие характеристики нефтей, можно существенно повысить эффективность вибровоздействия, как одного из методов увеличения нефтеотдачи пластов.

ЛИТЕРАТУРА

- БОГОЛЮБОВ, Б.Н., ЛОБАНОВ, В.Н., БРИЛЛИАНТ, Л.С., САШНЕВ, И.А., ПОТАПОВ, Г.А. 2000. Интенсификация добычи нефти низкочастотным акустическим воздействием. *Нефтяное хозяйство*, 9, 80-81.
- ГАДИЕВ, С.М. 1977. Использование вибрации в добыче нефти. Недра. Москва. 159.
- ВЕЗИРОВ, Д.Ш., СТРЕКОВ, А.С., МУЗАФФАРОВ, Г.Э., ЗАЛОВ, И.Д. 1998. Влияние вибровоздействия на реологические характеристики нефтей. *Известия АН Азербайджана. Науки о Земле*, 2, 86-90.
- ВЕЗИРОВ, Д.Ш., МУЗАФФАРОВ, Г.Э., ЗАЛОВ, И.Д. 1999. Влияние вибровоздействия на плотность и вязкость нефтей. В трудах ИПГНГМ: *Вопросы разработки и физикохимии нефтегазоносных пластов*, 137-142.
- МИРЗАДЖАНЗАДЕ, А.Х., МАКСУДОВ, Ф.Г., НИГМАТУЛИН, Р.И., ХАСАЕВ, А.М., и др. 1985. Теория и практика применения неравновесных систем в нефтедобыче. Элм. Баку. 220.
- МИРЗАДЖАНЗАДЕ, А.Х., АМЕТОВ, И.М., ЕНТОВ, В.М., РЫЖИК, В.М. 1986. Реологические проблемы нефтегазоотдачи. ВНИИОЭНГ. Москва. 52.
- НИКОЛАЕВСКИЙ, В.Н. 1996. Геомеханика и флюидодинамика. Недра. Москва. 448.
- НИКОЛАЕВСКИЙ, В.Н., СТЕПАНОВА, Г.С., НЕНАРТОВИЧ, Т.Л., ЯГОДОВ, Г.Н. 2006. Ультразвук определяет отбор нефти при вибровоздействии на пласт. *Нефтяное хозяйство*, 1, 48-50.
- РЕЙНЕР, М. 1965. Реология. Наука. Москва. 224.
- САДОВСКИЙ, М.А., АБАСОВ, М.Т., НИКОЛАЕВ, А.В. 1986. Перспективы вибрационного воздействия на нефтяную залежь с целью повышения нефтеотдачи. *Вестник АН СССР*, 9, 40-43.
- СИМОНОВ, Б.Ф., ОПАРИН, В.Н., КАНИСКИН, Н.А., ЧЕРЕДНИКОВ, Е.Н., КАДЫШЕВ, А.И., МАСЛЕННИКОВ, В.В. 2000. Вибросейсмическое воздействие на нефтяные пласты с земной поверхности. *Нефтяное хозяйство*, 5, 41-46.
- СУРГУЧЕВ, М.Л., ГОРБУНОВ, А.Т., ЗАБРОДИН, Д.П., ЗИСКИН, Е.А., МАЛЮТИНА, Г.С. 1991. Методы извлечения остаточной нефти. Недра. Москва. 347.
- CROSS, M. 1968. Rheology of viscoelastic fluids: Elasticity determination from tangential stress measurement. *Journal of colloid and interface science*, 27,1, 84-90.

Рецензент: член-корр. НАН Азербайджана Г.Г.Кулиев