

М.Н.НИКИТИН, аспирант, maratnik1@ya.ru

П.Д.ГЛАДКОВ, аспирант, alland@land.ru

А.В.КОЛОНСКИХ, канд. техн. наук, ассистент, (812)328 84 20

А.В.ПЕТУХОВ, д-р геол.-минерал. наук, профессор, (812)328 84 20

А.И.МИХЕЕВ, канд. пед. наук, доцент, Mikheyevai@rambler.ru

Санкт-Петербургский государственный горный университет

M.N.NIKITIN, post-graduate student, maratnik1@ya.ru

P.D.GLADKOV, post-graduate student, alland@land.ru

A.V.KOLONSKIKH, PhD in eng. sc., assistant lecturer, (812)328 84 20

A.V.PETUKHOV, Dr. in geol. & min. sc., professor, (812)328 84 20

A.I.MIKHEEV, PhD. in ped. sc., associate professor, Mikheyevai@rambler.ru

Saint Petersburg State Mining University

ИЗУЧЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЯЖЕЛОЙ ВЫСОКОВЯЗКОЙ НЕФТИ ЯРЕГСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Представлены результаты экспериментов по определению особенностей реологических свойств дегазированной нефти Ярегского месторождения. Описаны современные методики определения вязкоупругих и тиксотропных свойств нефтей и показаны результаты применения этих методик при исследованиях аномальной нефти. Даны краткая уточненная характеристика нефти Ярегского месторождения и рекомендации относительно расширения спектра методов увеличения нефтеотдачи продуктивного пласта, в том числе физико-химического и волнового воздействия.

Ключевые слова: Ярегское месторождение, аномальная нефть, динамические испытания, вязкоупругость, тиксотропия, вязкость.

ANALYSIS OF RHEOLOGICAL PROPERTIES OF YAREGSKOE FIELD HEAVY HIGH-VISCOSITY OIL

Results of experimental determination of Yaregskoe field degassed oil rheological features are given in the article. Modern methods of visco-elastic and thixotropic properties research are described and results of these methods' application while abnormal oil research are shown. As a result an improved data of Yaregskoe field oil is obtained and there is a recommendation to extend a number of enhanced oil recovery methods, including physicochemical and wave methods application.

Key words: Yaregskoe oil field, abnormal oil, dynamic test, viscous elasticity, thixotropy, viscosity.

Дегазированная нефть Ярегского месторождения относится к классу тяжелых ($0,945 \text{ г/см}^3$), высоковязких ($10000\text{--}12000 \text{ мПа} \cdot \text{с}$ при начальной пластовой температуре 8°C), малосернистых (до $1,1\%$ по массе), малопарафинистых (до $0,5\%$ по массе) [1]. Нефть отличается высоким содержанием смол и асфальтенов и является аномально-вязкой. Газовый фактор нефти составляет $2,5\text{--}3,4 \text{ м}^3/\text{т}$.

Месторождение разрабатывается уникальным термошахтным способом. Помимо запасов высоковязкой нефти, продуктивные песчаники содержат около половины промышленных запасов титановой руды РФ [2], в связи с чем планируется ввод в действие горно-обоганительного комплекса по добыче одновременно высоковязкой нефти и титановой руды. Ярегское месторождение яв-

ляется своеобразным полигоном по отработке новой техники и технологий для повышения нефтеотдачи пластов, применение которых требует полных сведений о коллекторских свойствах продуктивных отложений и реологических свойствах нефти.

В работе представлены результаты исследования реологических свойств дегазированной нефти Ярегского месторождения, проведенные на современном ротационном вискозиметре Rheotest RN 4.1.

Из многих параметров, характеризующих реологические свойства, на практике чаще используются сведения о вязкости нефти. Это обусловлено тем, что вязкость нефти наряду с проницаемостью коллектора определяет фильтрационные сопротивления и, следовательно, дебиты скважин, плотность размещения добывающих скважин, масштабы применения методов воздействия на залежь с целью повышения нефтеотдачи пластов. В связи с этим работы многих исследователей посвящены изучению факторов, от которых зависит вязкость различных нефтей.

Установлено, что при повышении температуры пласта до 90 °С вязкость нефти Ярегского месторождения снижается более чем в 300 раз, что является главной предпосылкой применения тепловых методов воздействия на пласт (рис. 1).

Ярегская нефть представляет собой типично неньютоновскую жидкость. По реологическим характеристикам нефть Ярегского месторождения является вязкоупругой жидкостью.

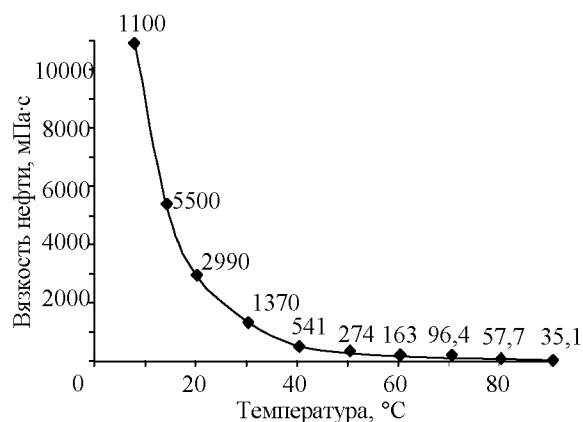


Рис. 1. Зависимость эффективной вязкости дегазированной нефти Ярегского месторождения от температуры

Жидкости, поведение которых не подчиняется закону вязкого трения Ньютона, называются неньютоновскими [3]. Для описания свойств неньютоновских жидкостей применяют понятие эффективной (или кажущейся) вязкости μ_e . Эффективная вязкость нефти при разных скоростях и напряжениях сдвига

$$\mu_e = \tau / \dot{\gamma},$$

где τ – мгновенное значение напряжения сдвига, Па; $\dot{\gamma}$ – мгновенное значение скорости сдвига, 1/с.

Эффективная вязкость есть некоторая условная характеристика, определяемая как отношение напряжения сдвига к скорости сдвига. Этот параметр широко используется в реологии и позволяет рассматривать неньютоновские жидкости как системы с переменной вязкостью, зависящей от скорости (напряжения) сдвига. Такая зависимость вязкости от скорости сдвига носит название аномалии вязкости. Жидкости с переменной вязкостью принято называть аномально вязкими (или аномальными).

Жидкости, для которых при постоянной скорости сдвига напряжение сдвига и эффективная вязкость уменьшаются с течением времени, что связано с постепенным разрушением пространственной структуры, называют тиксотропными.

Жидкости, которые обладают как свойствами жидкости, так и твердого тела, в которых вязкость и упругость являются двумя сторонами способности материала реагировать на приложенное напряжение сдвига – вязкоупругими [3].

Вязкоупругие свойства некоторых нефтей были впервые обнаружены в 1970-х гг. [4]. К тому времени было хорошо известно о вязкоупругих свойствах дисперсных систем и полимеров, но оказалось, что и некоторые тяжелые нефти обладают подобными свойствами. В 1980-х гг. было установлено, что Ярегская нефть также обладает вязкоупругими свойствами. В работе [4] приведены результаты исследований влияния вязкоупругих свойств нефти на процесс фильтрации нефти через пористую среду. Авторы отметили, что при движении нефти через порис-

тую среду, представляющую собой сложную систему каналов нерегулярной формы, в нефти возникают упругие напряжения сдвига, приводящие в конечном итоге к увеличению эффективной вязкости в пористой среде. Исследования газированной вязкоупругой нефти показали, что вязкоупругие свойства газированной жидкости существенно влияют на потери напора. Хотя вдали от скважины это влияние не существенно, дебит скважины может значительно отличаться от рассчитанного без учета вязкоупругих свойств, так как их влияние сказывается в непосредственной близости от скважины.

К сожалению, большинство исследований приостановлено в середине 1990-х гг. Сегодня, когда появились новые техника и технологии исследования свойств неньютоновских жидкостей (новое поколение вискозиметров и установок по фильтрации), возможно дальнейшее детальное исследование реологических свойств тяжелых нефтей, так как они являются определяющими при разработке месторождений высоковязких нефтей и битумов.

В последнее время при изучении вязкоупругих свойств нефти большую популярность приобрел метод, при котором образец подвергают осциллирующим напряжениям сдвига и измеряют его деформацию [5]. Испытания с осциллирующими напряжениями сдвига часто называют динамическими испытаниями. В процессе их проведения, задавшись определенной амплитудой изменения напряжения сдвига и частотой колебаний, определяют угол сдвига фаз δ между напряжением сдвига и деформацией, а также максимальную деформацию γ_0 при угловой скорости вращения цилиндра ω . Используя полученные данные, рассчитывают комплексную вязкость μ^* , которая отражает общее сопротивление динамическому сдвигу:

$$\mu^* = \frac{\mu_0}{\gamma_0 \omega}.$$

Ее можно разложить на запасенную (мнимую) вязкость μ'' (упругая компонента) и динамическую вязкость μ' (вязкая компонента) [4]:

$$\mu' = \frac{\mu_0}{\gamma_0 \omega} \sin \delta; \quad \mu'' = \frac{\mu_0}{\gamma_0 \omega} \cos \delta.$$

Здесь ω – угловая скорость.

Граничное напряжение сдвига, соответствующее началу интенсивного разрушения внутренней структуры нефти и снижения эффективной вязкости нефти, принято называть предельным динамическим напряжением сдвига (ПДНС) [3].

На начальном этапе реологический испытаний нефти при низких скоростях и напряжениях сдвига для тиксотропных сред характерно высокое значение эффективной вязкости, которое соответствует среде с неразрушенной внутренней структурой. Такое значение вязкости нефти с неразрушенной структурой принято обозначать μ_0 .

Для исследования вязкоупругих свойств Ярегской нефти были проведены динамические испытания при различных температурах. Было подтверждено, что Ярегская нефть обладает вязкоупругими свойствами, которые обусловлены высоким содержанием в нефти высокомолекулярных компонентов (смола и асфальтенов).

Изменение угла сдвига фаз от температуры (рис.2) свидетельствует, что с увеличением температуры доля упругой компоненты в эффективной вязкости увеличивается. При температуре 60-70 °С угол сдвига фаз достигает 39°, что говорит о превышении упругой компоненты над вязкой в общей вязкости нефти. Полученные зависимости подтвер-

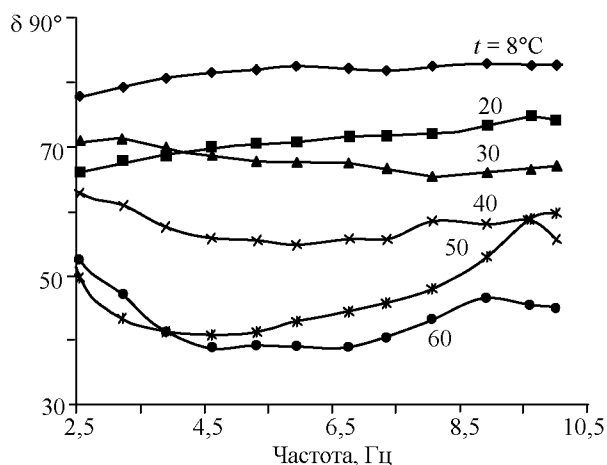


Рис.2. Зависимость изменения угла сдвига фаз, полученная по результатам измерений при различных температурах

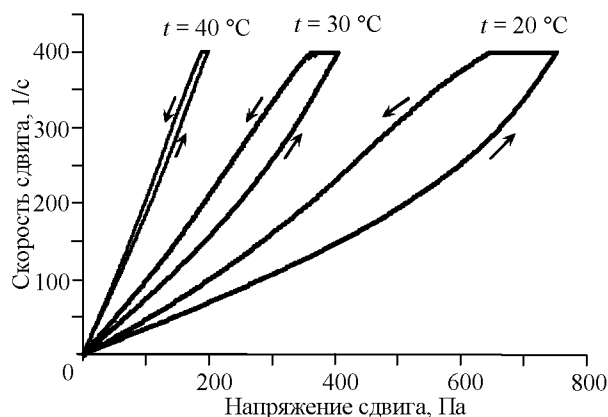


Рис.3. Реологические кривые прямого и обратного хода (петли гистерезиса) Ярегской нефти при различных температурах

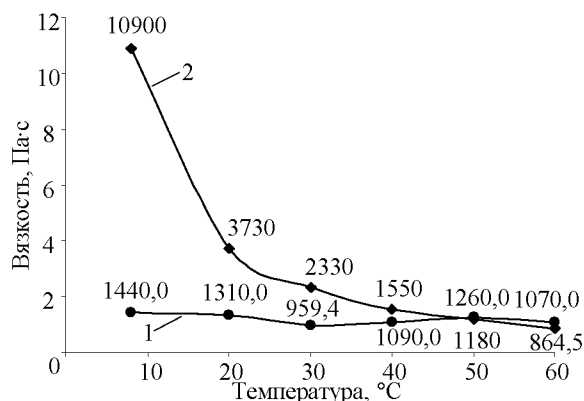


Рис.4. Зависимости упругой (1) и вязкой (2) компоненты вязкости от температуры при частоте переменной нагрузки 6 Гц (для условий неразрушенной структуры нефти)

ждают снижение доли вязкой компоненты при увеличении температуры.

Исследования тиксотропных свойств нефти Ярегского месторождения были проведены по следующей методике. Скорость сдвига плавно увеличивалась до 400 1/с в течение 300 с (прямой ход), затем она выдерживалась постоянной при достигнутом значении в течение 180 с (ожидание полного разрушения внутренней структуры), далее скорость сдвига плавно уменьшалась до нуля за 300 с (обратный ход). В результате получены характерные петли гистерезиса. Тот факт, что линия прямого хода не повторяет линию обратного хода, подтверждает образование в нефти тиксотропной структуры. Площадь гистерезиса, заключенная в пределах единого цикла измерений, характеризует величину механической энергии тиксотропных связей, отнесенную к единице объема нефти (рис.3). Эксперименты показали, что тиксотропные свойства нефти Ярегского месторождения значительно снижаются при увеличении температуры и становятся пренебрежимо малыми при температурах выше 70 °C.

Наличие тиксотропных свойств нефти способствует прекращению фильтрации нефти в зонах пласта, удаленных от скважин, когда значения градиентов давлений оказываются недостаточными для разрушения внутренней структуры в нефти и начала процесса фильтрации. Этот фактор способствует увеличению объема пласта, не вовлеченного в разработку.

Зависимость значений компонент вязкости от температуры при низких переменных скоростях сдвига, а счет чего внутренняя тиксотропная структура нефти оставалась неразрушенной. Как видим, в интервале температур 8-60 °C вязкая компонента снижается по зависимости, близкой к экспоненциальной, а упругая компонента вязкости меняется незначительно и может аппроксимироваться линейной зависимостью (рис.4). Таким образом установлено, что при увеличении температуры нефти Ярегского месторождения, как это происходит при термошахтном способе добычи, основной компонентой вязкости становится упругая.

Эксперименты по определению начального напряжения сдвига (рис.5) выявили, что изучаемая нефть при начальной пластовой температуре обладает начальным напряжением сдвига приблизительно

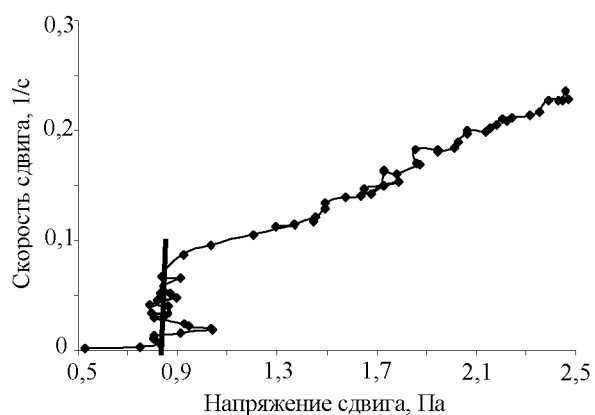


Рис.5 Зависимость скорости сдвига от напряжения сдвига при 8 °C (определение предельного напряжения сдвига τ_0)

0,83 Па. Эффективная вязкость нефти с разрушенной структурой при этом составила примерно 11000 мПа·с.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что нефть Ярегского месторождения представляет собой сложную реологическую систему, обладающую тиксотропными и вязкоупругими свойствами. Выявлено, что при увеличении температуры тиксотропные свойства нефти снижаются, а упругие свойства остаются неизменными. Для снижения вязкоупругих свойств нефти теплового воздействия недостаточно, целесообразно применение физико-химических методов воздействия на пласты, например, закачка совместно с паром растворителей или использование различных физических полей. Влияние последних на вязкоупругие свойства нефти остается малоизученным.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Аметов И.М.* Добыча тяжелых и высоковязких нефтей / И.М.Аметов, Ю.Н.Байдиков, Л.М.Ружин, Ю.А.Спиридонов. М., 1985. 205 с.

2. *Пранович А.А.* Комплексный подход к освоению Ярегского нефтетитанового месторождения / А.А.Пранович, В.И.Власенко // Горный журнал. 2007. № 3. С. 69-70.

3. *Рогачев М.К.* Реология нефти и нефтепродуктов: Учеб. пособие / М.К.Рогачев, Н.К.Кондрашева. Уфа, 2000. 89 с.

4. *Ружин Л.М.* Технологические принципы разработки залежей аномально вязких нефтей и битумов / Л.М.Ружин, И.Ф.Чупров; Под ред. Н.Д.Цхадая. Ухта, 2007. 244 с.

5. *Шрамм Г.* Основы практической реологии и реометрии / Пер. с англ. И.А.Лавыгина под ред. В.Г.Куличихина. М., 2003. 312 с.

REFERENCES

1. *Ametov I.M., Bajdikov Y.N., Ruzin L.M., Spiridonov Y.A.* Exploitation of heavy and high-viscosity oil. Moscow, 1985. 205 p.

2. *Pranovich A.A., Vlasenko V.I.* Complex approach to reclamation of Yaregskoe oil-titanium field // Mining magazine. 2007. N 3. P. 69-70.

3. *Rogachev M.K., Kondrasheva N.K.* Rheology of oil and its products: Study guide. Ufa, 2000. 89 p.

4. *Ruzin L.M., Chuprov I.F.* Technological principles of abnormal viscous oil and asphalts' development / Edited by N.D.Tshadaya. Uhta, 2007. 244 p.

5. *Schramm G.* A practical approach to rheology and rheometry. Moscow, 2002. 312 p.