

Препринт статьи, опубликованной в журнале:  
*Бурение и нефть*, 2010, №5, с. 26-27.

## **Экспериментальные доказательства отсутствия инверсии в промысловых водонефтяных эмульсиях**

Евдокимов И.Н., Лосев А.П.  
РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина

*Экспериментально установлено, что традиционные представления об инверсии фаз в концентрированных промысловых водонефтяных эмульсиях являются ошибочными. Показано, что промышленные эмульсии остаются эмульсиями типа «вода в нефти» (В/Н) даже при водосодержаниях, превышающих 80 % объема.*

Прогнозирование поведения многофазных потоков нефтяных месторождений становится критически важной задачей при освоении запасов в труднодоступных регионах суши и на шельфах морей. В частности, для проектирования систем сбора, подготовки и транспорта многофазной продукции большое значение имеет фазовое поведение водонефтяных эмульсий, образующихся в скважине и элементах наземной обвязки. В предыдущей публикации [1] было показано, что современные представления об обращении фаз (инверсии) в промысловых водонефтяных эмульсиях основаны на ошибочных заключениях о поведении зависимостей вязкости от содержания воды в эмульсии.

С целью экспериментального доказательства ошибочности существующих представлений нами было проведено подробное исследование реологических и структурных параметров эмульсий корбковской нефти [2, 3]. Нефть была отобрана непосредственно из скважины и не подвергалась обработке поверхностно-активными веществами. Эмульсии с содержанием воды от 4,2 до 82,5% об. готовили в стандартных цилиндрических пробирках методом встряхивания с частотой 2-2,6 с<sup>-1</sup> в течение 10 мин. Кривые течения эмульсий снимали на вискозиметрах Brookfield DV-II+ Pro и Rheotest 2.1 на всем доступном интервале скоростей сдвига. Измерения проводили при атмосферном давлении, при контролируемой температуре 20,0°C. Дисперсность и тип эмульсии оценивали методом оптической микроскопии.

На рис. 1 представлена измеренная зависимость относительной вязкости эмульсии от содержания воды. Кривая имеет гладкий максимум при объемном содержании воды приблизительно 74%. Напомним, что присутствие пологого максимума вязкости на подобных зависимостях ранее рассматривалось как основное свидетельство инверсии промысловых эмульсий [1]. Проведенные же нами микроскопические исследования образцов эмульсии с содержанием воды более 74% об., а

также тесты по т.н. «методу разбавления фаз» показали сохранение обратного типа эмульсии (В/Н) при переходе через максимум вязкости.

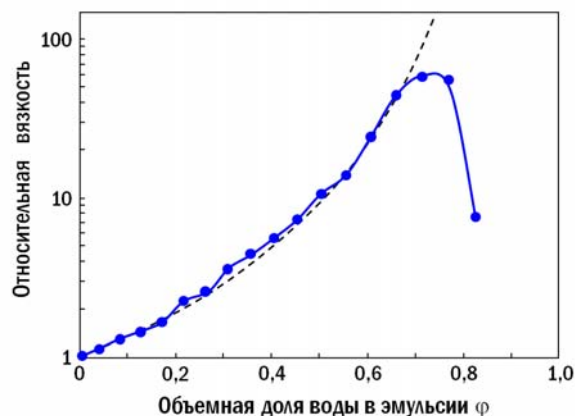


Рис. 1. Зависимость относительной вязкости эмульсии коробковской нефти от содержания воды. Данные соответствуют напряжению сдвига 45 Па. Пунктиром показана теоретическая зависимость по уравнению Муни [4].

Как видно из рис. 1, поведение вязкости при малых содержаниях воды может быть хорошо аппроксимировано реологической моделью Муни ( $R^2=0,999$ ). Причиной отклонения экспериментальной зависимости от модельной при концентрации дисперсной фазы  $\phi > 0,74$  служит изменение распределения капель по размерам, в котором возникают хорошо разделенные пики мелких и крупных капель воды. Данные о появлении крупных (более 500 мкм) капель воды в эмульсиях получены в ходе гранулометрического анализа методом микроскопии. После достижения некоторой критической концентрации воды, при измерениях вязкости в цилиндрическом зазоре вискозиметра нарушается однородность потока. Крупные капли мигрируют, объединяясь в цепочки и макроскопические «ленты», снижая тем самым сопротивление сдвигу. В сдвиговом потоке начинается проскальзывание прослоек крупных капель относительно более вязких слоев эмульсии, обогащенных мелкими каплями.

В качестве подтверждения предложенного механизма, на рис. 2, а представлены фотографии шпинделя вискозиметра Rheotest 2.1 с оставшейся на нем после измерений эмульсией коробковской нефти ( $\phi=0,825$ ). При рассмотрении структуры эмульсии невооруженным глазом видно формирование горизонтальных цепочек крупных капель воды вдоль направления вращения шпинделя. На рис. 2, б представлены фотографии эмульсии ( $\phi=0,7$ ), находящейся в зазоре измерительной системы «конус-плита» в процессе вращения шпинделя [5]. И в этом случае хорошо видно формирование цепочек крупных капель и их объединение в макроскопические прослойки, вытянутые вдоль направления потока.

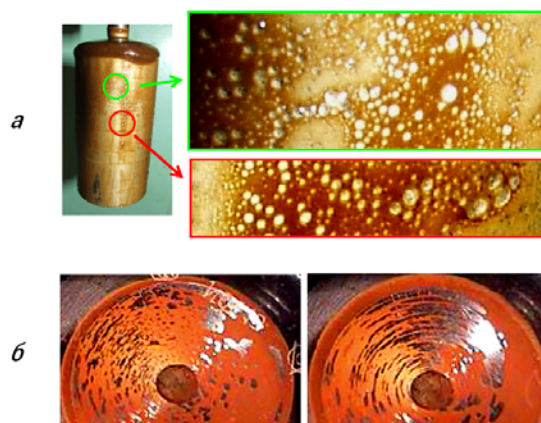


Рис. 2. Формирование цепочек крупных капель воды вдоль направления вращения шпинделя вискозиметра: *а* – эмульсия коробковской нефти (82,5% об. воды) на шпинделе после разбора ячейки; *б* – эмульсия (70% об. воды) в зазоре адаптера «конус-плита» в процессе вращения, адаптировано из [5].

Описанное выше поведение отлично от классического случая катастрофической инверсии, инициируемой избыточным количеством дисперсной фазы [7, 8, 9]. При обращении фаз (превращении эмульсии В/Н в эмульсию Н/В) вязкость должна резко снижаться, приближаясь к вязкости воды, и на измеряемых зависимостях вязкости от водосодержания должен присутствовать резкий «срыв» в точке инверсии. Для промысловых эмульсий природных нефтей такие зависимости никогда не наблюдались. «Срывы» инверсии регистрировались только в битумных эмульсиях и эмульсиях тяжелых нефтей, специально обработанных поверхностно-активными веществами. На рис. 3 представлен пример осуществления инверсии в обработанной эмульсии тяжелой нефти [10]. Как видно из экспериментальной зависимости, даже при незначительном увеличении содержания воды в области концентраций  $\phi \approx 0,72$  происходит резкий срыв вязкости, с трудом фиксируемый измерительным прибором.

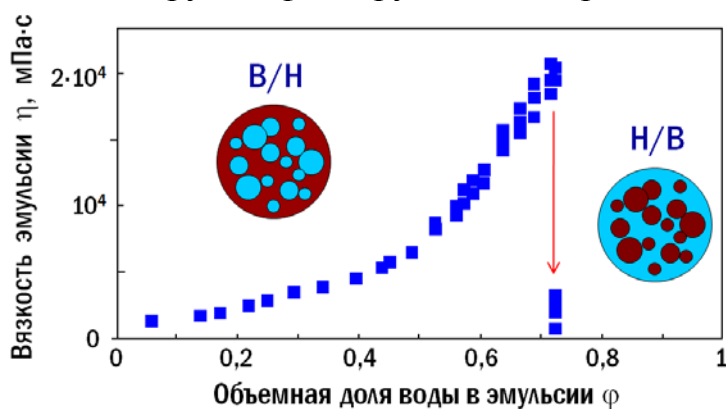


Рис. 3. Пример осуществления инверсии при увеличении содержания воды в водонефтяной эмульсии, обработанной поверхностно-активными веществами [10].

По результатам проведенных нами экспериментов и с учетом данных других авторов [5, 6], можно сделать вывод о том, что традиционное представление об инверсии фаз в промысловых водонефтяных эмульсиях при содержании воды, соответствующем максимуму зависимости вязкости, является ошибочным. Механизм снижения вязкости при высоких концентрация воды связан с появлением в эмульсиях отдельных популяций мелких и крупных капель воды, формирующих в потоке прослойки со значительно различающимися величинами вязкости.

## Литература

1. Евдокимов И.Н., Лосев А.П. Проблема инверсии в промысловых водонефтяных эмульсиях // Бурение и нефть. 2010. №3. С. 16-17.
2. Evdokimov I.N., Efumov Ya.O., Losev A.P., Novikov M.A. Morphological transformations of native petroleum emulsions. I. Viscosity studies // Langmuir. 2008. 24. Pp. 7124-7131.
3. Евдокимов И.Н., Лосев А.П., Новиков М.А. Особенности внутренней структуры природных водонефтяных эмульсий // Бурение и нефть. 2007. №4. С.20-21.
4. Mooney M. The viscosity of a concentrated suspension of spherical particles // J. Colloid Sci. 1951. №6. Pp. 162-170.
5. Ахметов А., Телин А., Корнилов А. Дисперсионные и реологические характеристики обратных водонефтяных эмульсий на основе нефтей Приобского и Мамонтовского месторождений // Научно-технический вестник ЮКОС. 2004. № 9. С. 43-50.
6. Abdul Manan M., Mat H.B., Ling L.J. Rheological Properties of Crude Oil Emulsion // Proceedings of Regional Symposium on Chemical Engineering, Hyatt Regency, Johor Bahru, Johor, Malaysia, October 13-15, 1997.
7. Binks B.P. (Ed.) Modern aspects of emulsion science. – Cambridge: Royal Society of Chemistry, 1998. – 430 p.
8. Alwadani M.S. Characterization and Rheology of Water-in-Oil Emulsion from Deep Water Fields. Master thesis. – Houston TX: Rice University, 2009. – 121 p.
9. Brooks B.W., Richmond H.N. Dynamics of liquid-liquid phase inversion using non-ionic surfactants // Colloids and Surfaces. Vol. 58. Iss. 1-2. 16 September 1991. Pp. 131-148.
10. Orr R. Phase Inversion in Heavy Crude Oil Production // Proceedings of Teknas Conference on Heavy Oil Technology for Offshore Applications. 14-15 May 2009, Stavanger, Norway.