

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРОМЫСЛОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ ОБРАТНЫХ ЭМУЛЬСИЙ НА ОСНОВЕ ЭМУЛЬГАТОРА ЭКС-ЭМ

Д. КРЯНЕВ, А. ПЕТРАКОВ, Т. РОГОВА, ОАО «ВНИИнефть»  
А. БИЛИНЧУК, ОАО «Славнефть — Мегионнефтегаз»

*Технологии выравнивания профилей приемистости, перераспределения фильтрационных потоков и снижения обводненности добываемой продукции — одно из направлений повышения технико-экономических показателей разработки месторождений особенно на поздней стадии с отбором большого количества попутной воды. Для решения этой проблемы применяются технологии, направленные на увеличение охвата пласта по толщине и тем самым на выравнивание его профиля приемистости; снижение обводненности продукции добывающих скважин; повышение нефтеотдачи пласта по обрабатываемому участку.*

**М**еханизм действия подобных технологий основан на создании в высокопроницаемых обводненных пропластках продуктивного пласта водоизолирующих и потокоотклоняющих барьеров и перераспределении потоков нагнетаемой воды как по толщине пласта, так и по его простиранию.

Одним из основных факторов, определяющих нефтеотдачу пластов, является соотношение вязкостей пластовой нефти и закачиваемой воды. При вытеснении нефти водой в неоднородных по разрезу пластах происходит преждевременный прорыв воды к добывающим скважинам. Зачастую вытеснение нефти сопровождается

вязкостной неустойчивостью, которая особенно сильно проявляется в неоднородных пластах.

Улучшение соотношения вязкостей и частичное выравнивание профилей приемистости и отдачи, как свидетельствует накопленный огромный лабораторный, промысловый и теоретический материал, позволяют в достаточной мере повысить эффективность разработки нефтяных месторождений и конечную нефтеотдачу пласта.

Наиболее известными в практике являются технологии закачки различных полимерных систем, композиций на основе жидкого стекла, а также обратных эмульсий.

Однако необходимы и новые химреагенты для нужд нефтяной промышленности, их разработка и опытно-промышленные испытания.

В данной статье приведены результаты лабораторных исследований физико-химических и фильтрационных свойств ПАВ-эмульгатора ЭКС-ЭМ, разработанного в ЗАО «Полиэкс» (г. Пермь) и предназначенного для получения обратных эмульсий, а также опытно-промышленных испытаний технологии обработки нагнетательных скважин обратными эмульсиями на его основе.

С целью получения стабильных обратных эмульсий на основе эмульгатора ЭКС-ЭМ в лабораторных условиях выполнена серия опытов по подбору оптимального состава композиции, исследованы реологические характеристики полученных эмульсий, изучено влияние природы растворителя на эмульгирующую способность основного компонента.

Создание обратных эмульсий проводилось на основе маслорастворимого эмульгатора ЭКС-ЭМ, стабилизатора

Табл. 1.

| РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СТАБИЛЬНОСТИ ОБРАТНЫХ ЭМУЛЬСИЙ РАЗЛИЧНЫХ СОСТАВОВ ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ 20, 60 и 80°C |                   |        |                  |       |             |                              |          |          |                            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|--------|------------------|-------|-------------|------------------------------|----------|----------|----------------------------|
| Состав эмульсии и концентрация компонентов, %                                                            |                   |        |                  |       |             | Стабильность при температуре |          |          |                            |
| ПАВ                                                                                                      | CaCl <sub>2</sub> | бензин | керосин / толуол | нефть | Вода 16 г/л | 20°                          | 60°      | 80°      | Примечание                 |
| <b>ПАВ-эмульгатор</b>                                                                                    |                   |        |                  |       |             |                              |          |          |                            |
| 2                                                                                                        | 2                 | 20     | —                | —     | 76          | >10 сут.                     | >6 сут.  | 24 час.  | высоковязкая эмульсия      |
| 2                                                                                                        | 2                 | —      | 15/5             | —     | 76          | >10 сут.                     | >6 сут.  | 24 час.  |                            |
| 2                                                                                                        | 2                 | —      | —                | 20    | 76          | 6 сут.                       | 5 сут.   | 24 час.  |                            |
| 1                                                                                                        | —                 | —      | 15/5             | —     | 79          | 2 сут.                       | 1 сут.   | 4 час.   | выделение 7% углевод. фазы |
| 1                                                                                                        | 1                 | —      | 15/5             | —     | 78          | 4 сут.                       | 3 сут.   | 4,5 сут. |                            |
| 1                                                                                                        | 2                 | —      | 15/5             | —     | 77          | >4 сут.                      | >4 сут.  | 4,5 сут. |                            |
| 1                                                                                                        | 3                 | —      | 15/5             | —     | 76          | 5 сут.                       | 4,5 сут. | >20 час. |                            |
| 2                                                                                                        | 3                 | —      | 15/5             | —     | 75          | >10 сут.                     | >6 сут.  | 28 час.  | высоковязкая эмульсия      |
| 3                                                                                                        | 3                 | —      | 15/5             | —     | 74          | >10 сут.                     | >6 сут.  | 36 час.  |                            |
| 4                                                                                                        | 3                 | —      | 15/5             | —     | 73          | >10 сут.                     | >8 сут.  | 36 час.  |                            |
| 1                                                                                                        | 3                 | —      | —                | 20    | 76          | 3 сут.                       | 2 сут.   | >6 час.  | высоковязкая эмульсия      |
| 2                                                                                                        | 3                 | —      | —                | 20    | 75          | 6 сут.                       | 3 сут.   | >8 час.  |                            |
| 3                                                                                                        | 3                 | —      | —                | 20    | 74          | >10 сут.                     | >6 сут.  | 36 час.  |                            |
| 4                                                                                                        | 3                 | —      | —                | 20    | 73          | >10 сут.                     | >6 сут.  | >48 час. |                            |
| <b>ПАВ-Нефтехим</b>                                                                                      |                   |        |                  |       |             |                              |          |          |                            |
| 2                                                                                                        | —                 | 20     | —                | —     | 78          | 6 час.                       | —        | 0,2 часа |                            |
| 2                                                                                                        | 4                 | 20     | —                | —     | 74          | 3,5 сут.                     | —        | 1,5 часа |                            |
| 3                                                                                                        | 4                 | 20     | —                | —     | 73          | 3,5 сут.                     | 5 час.   | 2 часа   |                            |
| 4                                                                                                        | 4                 | 20     | —                | —     | 72          | 3,5 сут.                     | 20 час.  | 3 часа   |                            |

Табл. 2.

| РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ВЯЗКОСТИ ОБРАТНОЙ ЭМУЛЬСИИ<br>НА ОСНОВЕ ЭМУЛЬГАТОРА ЭКС-ЭМ |                   |       |                |                                            |       |       |
|---------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------|----------------|--------------------------------------------|-------|-------|
| Состав эмульсии, % об.                                                          |                   |       |                | Вязкость эмульсии при температуре, мПа × с |       |       |
| эмульгатор                                                                      | CaCl <sub>2</sub> | нефть | вода<br>16 г/л | 20                                         | 60    | 80    |
| 1                                                                               | 0,5               | 20    | 78,5           | 78,5                                       | 53,5  | 31,5  |
| 1                                                                               | 1                 | 20    | 78             | 94,5                                       | 72,3  | 54,5  |
| 2                                                                               | 1                 | 20    | 77             | 116,5                                      | 108,5 | 68,8  |
| 3                                                                               | 1                 | 20    | 76             | 143                                        | 112   | 79,8  |
| 2                                                                               | 2                 | 20    | 76             | 165                                        | 131,3 | 95,4  |
| 2                                                                               | 3                 | 20    | 75             | 189                                        | 149,8 | 101,6 |
| 3                                                                               | 3                 | 20    | 74             | 235,5                                      | 188   | 136,2 |

обратных эмульсий (хлористый кальций), углеводородной фазы (стабильный бензин, нефть — 2,2 мПахс, смесь керосина с толуолом) и минерализованной воды (16 г/л), а исследование их стабильности и определение реологических характеристик — при температурах 20, 60 и 80°C.

Обратные эмульсии получали путем механического диспергирования входящих в их состав компонентов на пропеллерной мешалке. Оптимальное число оборотов мешалки и время эмульгирования устанавливали после проведения нескольких опытов с конкретной эмульсией и получения стабильных в течение 24 часов эмульсий с одинаковой вязкостью. При сравнительных испытаниях ряда систем различных составов время и скорость перемешивания эмульсии, а также ее объем были одинаковыми. Эксперименты по исследованию фазового поведения обратных эмульсий, определения их термостабильности проводились со свежеприготовленными системами, реологические характеристики систем определялись как сразу же после их приготовления, так и после выдержки в течение 24 часов.

Эмульсия считалась стабильной, если после выдержки в течение 24 часов при температуре 20°C и 8 часов при температуре 80°C система остается однородной или количество отделившейся в статических условиях дисперсионной среды (углеводородной фазы) не превышает 5 — 10% от всего объема эмульсии, при этом полностью исключается из него выделение дисперсной фазы (воды).

Исследование фазового поведения ОЭ при контакте с нефтью и пластовой водой проводилось в статических и динамических условиях. С этой целью в градуированные пробирки помещались равные объемы ОЭ, нефти и пластовой воды с минерализацией 16 г/л. В первом случае растворы в зависимости от плотностей осторожно наслаивались друг на друга, а во втором случае все три раствора

интенсивно перемешивались и помещались на выдержку в термостат при 20, 60 и 80°C. Система считалась достигшей равновесия, если объемы расслоившихся фаз оставались постоянными в течение трех замеров.

Измерение реологических параметров обратных эмульсий проводилось на ротационном вискозиметре «Реомат-30». Пределы изменения скорости сдвига — от 0,0615 до 452<sup>с<sup>-1</sup></sup>. Постоянная температура — 20, 60 и 80°C обеспечивалась специальной термостатируемой ячейкой прибора.

Из данных, представленных в табл. 1, видно, что в исследуемом диапазоне концентраций ПАВ (1 — 4%) и температуре (20 — 80°C) были получены обратные эмульсии, стабильность которых, в зависимости от температуры, изменялась от нескольких часов до нескольких суток. При 20°C понижение концентрации ПАВ в эмульсии существенно не влияет на их стабильность и составляет в среднем 5 — 6 суток, однако с повышением температуры наблюдается понижение стабильности изученных эмульсий в несколько раз и при малых концентрациях ПАВ до 4 — 6 часов. Введение в состав ОЭ незначительных добавок CaCl<sub>2</sub> позволяет увеличить термостабильность обратных эмульсий в несколько раз.

Обратные эмульсии на основе ПАВ - Нефтехим, данные по которым представлены в табл. 1 для сравнения, характеризуются более низкими параметрами стабильности во всем диапазоне температур.

Исследования влияния изменения концентрации ПАВ и стабилизатора в обратной эмульсии (табл. 2) показали, что с их увеличением вязкость эмульсии увеличивается, а с повышением температуры — существенно уменьшается.

Оценка фильтрационных и нефтевытесняющих свойств обратных эмульсий с концентрацией эмульгатора ЭКС-ЭМ 3% проводилась на насыпных моделях пористых сред дли-

ной 25 см с внутренним диаметром 2 см с учетом результатов физико-химических исследований. Проницаемость пористой среды в опытах составляла 0,35 — 0,42 мкм<sup>2</sup>. В качестве пористой среды использовался дезинтегрированный керн пласта Б8 Самотлорского месторождения. Подготовка к опытам осуществлялась по стандартным методикам.

В ходе опытов определялись следующие параметры: пористость, проницаемость, подвижность воды при 100% насыщенности и остаточной нефти, начальная, остаточная и конечная нефтенасыщенность, коэффициент вытеснения нефти водой, изменение подвижности при закачке эмульсии, прирост коэффициента вытеснения нефти, коэффициент изоляции.

Экспериментальные исследования фильтрации жидкостей в пористой среде проводили с соблюдением реальных скоростей движения, которые соответствовали скорости фильтрации в ПЗП. Необходимо отметить, что в лаборатории смоделировать в полной мере условия, близкие к пластовым, достаточно сложно из-за отсутствия точной и полной геологической информации: существующие методы исследования скважин подобную информацию предоставить пока не могут.

При постановке экспериментов исходили также из того, что увеличение приемистости нагнетательной скважины происходит, главным образом, за счет улучшения фильтрационных характеристик небольшого участка пласта, примыкающего к скважине. Насыщенность этого участка остается неизменной при тех высоких градиентах давления, которые существуют в этой зоне. Следовательно, на линейном элементе пласта можно воспроизвести соответствующие условия призабойной зоны как по количеству, так и по распределению остаточной нефти и воды, создав при этом градиенты давления порядка 1 — 2 МПа/м.

Исходя из этих соображений, опыты проводились на линейных образцах пористых сред при постоянной скорости фильтрации, соответствующей реальной. Экспериментальные исследования лаборатории проф. В.Г. Оганджянца показали, что увеличение градиента давления до 0,8 МПа/м и более не оказывает влияния на изменение остаточной нефтенасыщенности, на основании чего в проводимых экспериментах поддерживалась постоянная скорость фильтрации 40 — 80 мл/час.

Другим важным параметром проведения опыта является температура, которая должна поддерживаться на уровне пластовой, поскольку изучае-

мые нами процессы фильтрации с применением физико-химических методов и т.п. более чувствительны к изменению температуры, чем давления.

Эксперименты по исследованию фильтрационных и нефтевытесняющих свойств обратных эмульсий проводились на специальной установке («Core Laboratories»), позволяющей моделировать условия, близкие к пластовым.

Основным узлом является термостатируемый шкаф, в который помещалась модель пористой среды. Температура в ходе опытов поддерживалась на уровне 60 либо 80 + 1°С, рабочие жидкости в модель пласта подавались подогретыми благодаря прохождению через специальные теплообменники. Скорость фильтрации обеспечивалась насосами постоянного расхода, противодавление на выходе из модели поддерживалось регулятором на уровне 5 атм. Перепад давления между входом и выходом из керна регистрировался датчиком дифференциального давления с точностью 0,007 атм. Выходящая из модели жидкость собиралась в мерные цилиндры с ценой деления 0,1 мл.

В качестве рабочих жидкостей использовались модель пластовой воды с общей минерализацией 16 г/л, самотлорская нефть вязкостью 3 спз при 20 °С.

Температура проведения опытов составляла 60 и 80°С, объемная скорость фильтрации 40 — 80 мл/час (10 — 20 м/сут.), объем закачки эмульсионных систем — 1 V<sub>пор</sub>, выдержка в пористой среде при температуре опыта — 16 часов.

Табл. 3.

| РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ИЗОЛИРУЮЩИХ И НЕФТЕВЫТЕСНЯЮЩИХ СВОЙСТВ ЭМУЛЬСИИ НА ОСНОВЕ ЭМУЛЬГАТОРА ЭКС-ЭМ |                         |       |       |       |       |       |       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Параметры                                                                                                     | Ед. измер.              | Опыт  |       |       |       |       |       |
|                                                                                                               |                         | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |
|                                                                                                               |                         | 60°С  | 60°С  | 60°С  | 80°С  | 80°С  | 80°С  |
| Длина модели                                                                                                  | см                      | 25,00 | 25,00 | 25,00 | 25,00 | 25,00 | 25,00 |
| Площадь сечения                                                                                               | см <sup>2</sup>         | 3,20  | 3,20  | 3,20  | 3,20  | 3,20  | 3,20  |
| Объем пор                                                                                                     | см <sup>3</sup>         | 36,20 | 36,40 | 36,10 | 35,00 | 35,70 | 36,30 |
| Пористость                                                                                                    | д.ед.                   | 0,44  | 0,43  | 0,40  | 0,46  | 0,45  | 0,44  |
| Проницаемость по воде при 20°С                                                                                | мкм <sup>2</sup>        | 0,423 | 0,430 | 0,425 | 0,391 | 0,410 | 0,415 |
| Подвижность воды при температуре опыта                                                                        | мкм <sup>2</sup> /МПа*с | 0,072 | 0,070 | 0,071 | 0,075 | 0,071 | 0,22  |
| Начальная нефтенасыщенность                                                                                   | д.ед.                   | 0,65  | 0,63  | 0,67  | 0,62  | 0,64  | 0,61  |
| Остаточная нефтенасыщенность                                                                                  | д.ед.                   | 0,26  | 0,24  | 0,25  | 0,24  | 0,22  | 0,21  |
| Козэф. вытеснения нефти водой                                                                                 | д.ед.                   | 0,600 | 0,619 | 0,627 | 0,613 | 0,656 | 0,660 |
| Подвижность воды при остаточной нефтенасыщенности                                                             | мкм <sup>2</sup> /МПа*с | 0,072 | 0,070 | 0,071 | 0,075 | 0,071 | 0,070 |
| Объем закачки эмульсии                                                                                        | V пор                   | 1,00  | 1,00  | 1,00  | 1,00  | 1,00  | 1,00  |
| Вязкость эмульсии при температуре опыта                                                                       | мПа*с                   | 188,0 | 188,0 | 188,0 | 136,2 | 136,2 | 136,2 |
| Конечная нефтенасыщенность                                                                                    | д. ед.                  | 0,05  | 0,06  | 0,05  | 0,083 | 0,075 | 0,080 |
| Конечный коэфф. вытеснения                                                                                    | д. ед.                  | 0,92  | 0,90  | 0,93  | 0,87  | 0,88  | 0,87  |
| Прирост коэффициента вытеснения                                                                               | д. ед.                  | 0,32  | 0,29  | 0,30  | 0,25  | 0,23  | 0,21  |
| Снижение подвижности при закачке эмульсии                                                                     | раз                     | 4,49  | 4,08  | 4,00  | 3,21  | 3,09  | 3,10  |
| Коэффициент изоляции                                                                                          | д. ед.                  | 2,35  | 2,44  | 2,54  | 2,07  | 1,93  | 1,97  |
| Подвижность воды при конечной нефтенасыщенности                                                               | мкм <sup>2</sup> /МПа*с | 0,031 | 0,029 | 0,028 | 0,036 | 0,037 | 0,04  |

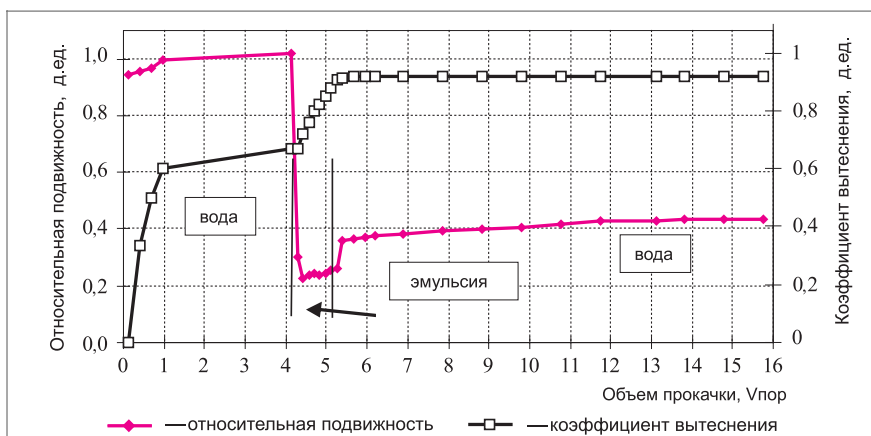


Рис. 1. Изменение подвижности и коэффициента вытеснения от объема прокачки при температуре 60°С

Фильтрационные эксперименты проводились с эмульсионными системами, приготовленными на основе эмульгатора ЭКС-ЭМ, концентрация которого равнялась 3%, нефть — 20%, CaCl<sub>2</sub> — 3%, остальное — минерализованная вода. Эти результаты представлены в табл. 3 и на рис. 1 — 2, из которых видно, что прирост коэффициента нефтевытеснения составляет 0,21 — 0,32. Необходимо отметить, что конечный коэффициент вытеснения нефти рассчитывался с учетом привнесенного в пористую среду углеводорода, находящегося в составе закачиваемой эмульсионной системы.

Коэффициент изоляции (отношение подвижности воды при остаточной нефтенасыщенности к подвижности воды после закачки эмульсии) составляет 1,93 — 2,07 при температуре опытов 80°С и 2,35 — 2,54 — при 60°С,

то есть изоляционные свойства обратной эмульсии в большей степени проявляются при более низких температурах. Аналогичный вывод справедлив и в отношении прироста коэффициента нефтевытеснения, который изменяется в диапазоне 0,29 — 0,32 при температуре 60°С и 0,21 — 0,25 — при температуре 80°С.

Это дает основание предположить, что после обработки нагнетательной скважины подобной эмульсионной системой произойдет перераспределение профиля приемистости в результате снижения подвижности воды в более проницаемых пропластках и подключение низкопроницаемых слоев за счет снижения остаточной нефтенасыщенности и увеличения за счет этого подвижности воды.

Как видно из графиков, основное довытеснение остаточной после

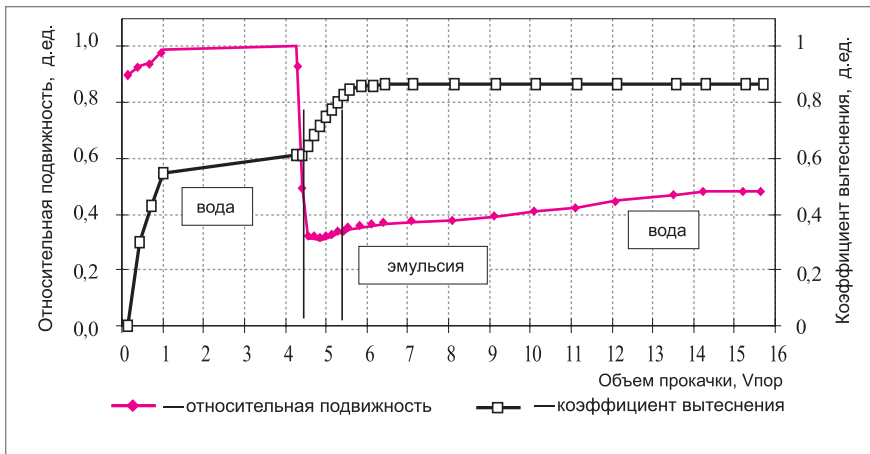


Рис. 2. Изменение подвижности и коэффициента вытеснения от объема прокачки при температуре 80°

заводнения нефти происходит при закачке обратной эмульсии в пористую среду. Последующая фильтрация воды обеспечивает доизвлечение очень незначительного количества нефти.

Снижение подвижности (рост сопротивления) в процессе закачки эмульсии составляет 3,09 — 4,49 раза, что в реальных промысловых условиях может привести к снижению скорости закачки и увеличению срока обработки.

Опытно-промышленные испытания по закачке обратных эмульсий на основе эмульгатора ЭКС-ЭМ проведены на Аганском месторождении, был выбран опытный участок, включающий в себя 5 нагнетательных и 20 добывающих скважин, и составлена соответствующая программа работ, предусматривающая, в соответствии с основными положениями системной технологии, единовременную обработку всех нагнетательных скважин, входящих в опытный участок.

Объем закачки составлял 100 — 200 м<sup>3</sup> на одну нагнетательную скважину при удельной закачке от 10 до 21,7 м<sup>3</sup>/м перфорированной толщины. Обработки выполнены в период с 16 по 24 ноября 2005 г., общий объем закачки обратной эмульсии составил 800 м<sup>3</sup>.

В результате проведенных обработок нагнетательных скважин по окружающим реагирующим добывающим скважинам на 1.03.2006 г. было получено (по методу характеристик вытеснения) дополнительно 5915,8 тонны

нефти, то есть 1183 тонны дополнительной нефти на одну скважино-обработку (7,4 тонны дополнительной нефти на 1 м<sup>3</sup> закачанной обратной эмульсии). Из данных, представленных на рис. 3, видно, что после проведения ОПЗ нагнетательных скважин обратными эмульсиями на основе эмульгатора ЭКС-ЭМ обводненность продукции

окружающих добывающих скважин снизилась с 95,3 до 94,1%, а суммарная добыча по окружающим добывающим скважинам возросла с 8617 до 10 263 тонн нефти в месяц.

**Выводы**

1. На основе эмульгатора ЭКС-ЭМ возможно получение стабильных обратных эмульсий в диапазоне температур до 80°С.
2. Проведенные исследования фильтрационных и нефтевытесняющих свойств показали, что закачка обратной эмульсии в пористую среду с остаточной нефтенасыщенностью приводит к снижению подвижности воды в 2 — 2,5 раза, при этом увеличение коэффициента вытеснения составляет от 20 до 30 %.
3. Опытно-промышленные испытания показали эффективность обратных эмульсий на основе эмульгатора ЭКС-ЭМ. Дополнительная добыча нефти на опытном участке составила 5,9 тыс. тонн (1183 тонны на одну обработку) при одновременном снижении обводненности продукции окружающих добывающих скважин.

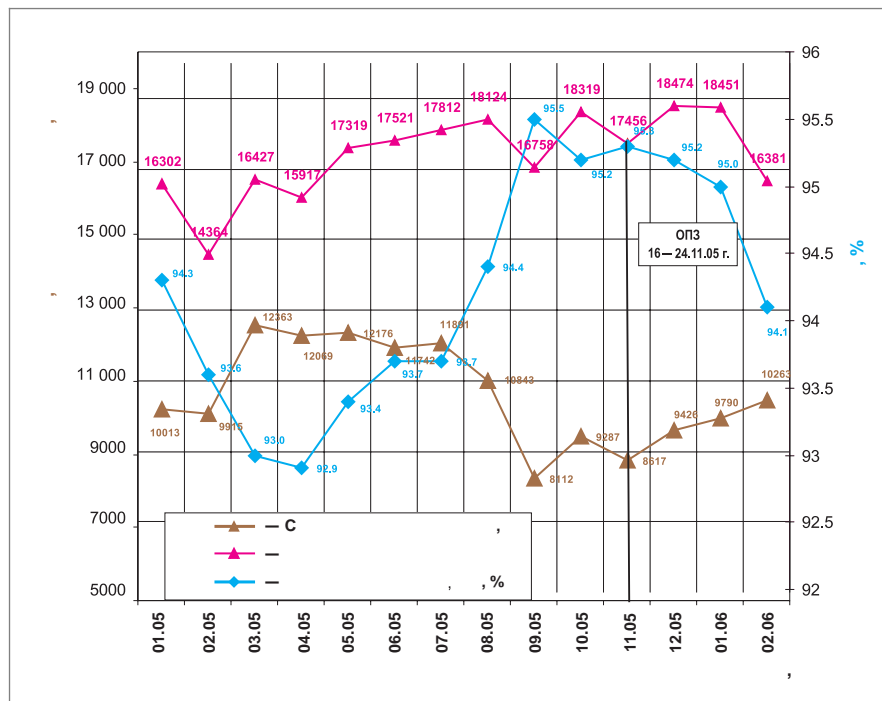


Рис. 3. Динамика технологических показателей добывающих скважин опытного участка

**ТЕХНОЛОГИИ И РЕАГЕНТЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НЕФТЕОТДАЧИ**

<http://polyex.perm.ru>

РОССИЯ, Пермь, 614101, Закамская 2в  
 телефон/факс: (342) 253-01-60, 253-02-12  
 polyex@permonline.ru



**ПОЛИЭКС**