

**На правах рукописи**

**СОЛОВЬЕВ АЛЕКСАНДР ЯКОВЛЕВИЧ**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КАЧЕСТВА БУРОВЫХ ЭМУЛЬСИОННЫХ  
РАСТВОРОВ ПРИМЕНЕНИЕМ РЕАГЕНТОВ КОМПЛЕКСНОГО  
ДЕЙСТВИЯ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**УФА-2003**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы диссертации

В настоящее время, ввиду истощения большинства залежей нефти и газа, начинают активно разбуриваться новые месторождения шельфовой зоны Сахалина, которые разрабатываются системой горизонтальных скважин, имеющих протяженность горизонтальных участков свыше 1000 м. Основными проблемами при бурении этих скважин являются сохранение устойчивости ствола, обеспечение выноса шлама, затяжки и прихваты бурильной колонны. Главная роль в решении данных проблем принадлежит буровым промывочным растворам (БПР), которые должны обладать высокими ингибирующей, смазочной и несущей способностями.

Оптимальным для бурения и вскрытия коллекторов в этих условиях является использование гидрофобно-эмульсионных растворов (ГЭР), которые позволяют практически полностью сохранить проницаемость призабойной зоны пластов, исключить затяжки и прихваты колонн, обеспечить устойчивость стенок скважины и вынос шлама. Однако применение ГЭР сопряжено с необходимостью решения специфических проблем этого типа дисперсных систем, а именно – обеспечения стабильности их свойств во времени и при воздействии агрессивных факторов в скважине, которыми являются: 1) потеря части дисперсионной среды при фильтратоотдаче на границе скважина-пласт; 2) загрязнение пластовой водой и гидрофильной твердой фазой; 3) высокие и низкие температуры.

Традиционно улучшение качества ГЭР достигается применением комплекса реагентов эмульгаторов, стабилизаторов, гидрофобизаторов, загустителей, понизителей фильтрации. Применение большого количества специальных реагентов усложняет управление свойствами и снижает технологичность приготовления ГЭР. Кроме того, промышленно производимые реагенты, предназначенные для получения ГЭР и управления их свойствами, не обладают необходимыми для бурения высокотемпературных скважин качествами. Поэтому актуальной является

разработка новых реагентов комплексного действия (РКД), обладающих улучшенными свойствами и позволяющих заменить собой сразу несколько специальных реагентов. Применение РКД упрощает разработку рецептур за счет снижения числа компонентов и обеспечивает оптимальность принимаемых решений за счет сбалансированного изменения свойств ГЭР, а также повышает технологичность приготовления раствора и управления его свойствами, что в конечном итоге позволит повысить качество выполнения технологических операций.

В этой связи актуальной является задача разработки принципиальных теоретических и практических подходов целенаправленного изменения свойств ГЭР на основе изучения закономерностей взаимосвязи молекулярного агрегирования компонентов дисперсной системы и их химического строения.

### **Цель работы**

Повышение качества гидрофобно-эмульсионных растворов для бурения горизонтальных скважин в условиях высоких температур и загрязнения гидрофильной фазой применением реагентов комплексного действия.

### **Задачи**

1. Разработка методического обеспечения повышения качества ГЭР на основе доступных для оперативного контроля показателей его свойств.
2. Уточнение доминирующих механизмов и разработка средств эффективного повышения термостойкости и термостабильности ГЭР.
3. Разработка новых реагентов, комплексно улучшающих качество ГЭР.
4. Разработка рецептур ГЭР на основе комплексных реагентов для бурения горизонтальных скважин в условиях высоких температур и загрязнения гидрофильной фазой.

### **Научная новизна**

1. Разработана комплексная методика оценки качества эмульсий и оптимизации их рецептур.
2. Реализован принцип повышения термостойкости и термостабильности инвертных эмульсий, основанный на стабилизации реагентами,

предпочтительно образующими не менее трех межмолекулярных связей промежуточного типа, и одновременном повышении работы адсорбции и оптимизации гидрофильно-липофильного баланса этих реагентов.

3. Обосновано применение реагентов на основе дизамещенных эфиров триэтаноламина и высокомолекулярных жирных кислот в смеси с оксипропилированными глицеридами этих кислот и их солями для комплексного повышения качества ГЭР.

### **Основные защищаемые положения**

1. Методика комплексной оценки качества эмульсий и оптимизации их рецептур.
2. Результаты внедрения разработанных РКД в бурение и капитальный ремонт скважин.
3. Обоснование применения дизамещенных триэтаноламиновых эфиров высокомолекулярных жирных кислот в смеси с оксипропилированными глицеридами этих кислот и их солями для комплексного повышения качества ГЭР.
4. Результаты оптимизации состава реагента на основе дизамещенных триэтаноламиновых эфиров высокомолекулярных жирных кислот, их солей и оксипропилированных глицеридов.
5. Результаты исследований свойств ГЭР на основе разработанного РКД СЭТ-1М и оптимизации его рецептуры.

### **Практическая ценность**

1. На основе доступного сырья разработан реагент СЭТ-1М, позволяющий без использования дополнительных реагентов получать ГЭР с термостойкостью до 190°C, глиноемкостью до 30%, фильтратоотдачей при 90°C менее 4см<sup>3</sup>/30мин, эффективной вязкостью при 90°C до 330 мПа\*с.
2. Разработана рецептура ГЭР, превосходящая базовую рецептуру на основе СМАД и Эмультала по высокотемпературным параметрам

глиноемкости, фильтратоотдачи и эффективной вязкости соответственно на 271, 47 и 50%, не содержащая органобентонита.

3. Рассчитаны оптимальные концентрации РКД СЭТ-1М, что позволяет сохранять качество ГЭР в процессе бурения и уменьшить расход реагента относительно базового состава в 2,5 раза.
4. Предложен способ промышленного получения термостойкого эмульгатора-стабилизатора СЭТ-1М, наработана опытно-промышленная партия этого реагента.

### **Внедрение**

Эмульгатор-стабилизатор СЭТ-1М успешно прошел промысловые испытания в качестве эмульгатора-стабилизатора термостойких ГЭР, применяемых Управлением по интенсификации и ремонту скважин ООО "Уренгойгазпром" при глушении высокотемпературных газоконденсатных скважин, а также внедрен как эмульгатор-стабилизатор ГЭР, используемых ОАО "Сахалинморнефтегаз" в качестве буровых растворов для горизонтальных высокотемпературных скважин.

### **Апробация работы**

Основные положения диссертации докладывались на II Международном симпозиуме "Наука и технология углеводородных дисперсных систем" (Уфа, 2000 г.), Российской конференции "Актуальные проблемы нефтехимии" (Москва, 2001г.), II Конференции молодых специалистов и творческой молодежи ООО "ЛУКОЙЛ-БУРЕНИЕ" (Самара, 2002 г.).

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ, в том числе 3 статьи, тезисы четырех докладов, получено 2 патента и 1 свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ, выданное РОСПАТЕНТом.

### **Структура и объем работы**

Диссертация изложена на 241 листах машинописного текста, включая 37 таблиц, 65 рисунков, и состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы из 128 наименований и 3 приложений.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обозначены актуальные проблемы качества ГЭР применительно к бурению глубоких скважин в сложных геолого-технологических условиях, сформулированы цель и задачи исследований.

**В первой главе** представлен анализ опыта применения ГЭР при бурении скважин на шельфах Северных морей и Сахалина, сформулированы актуальные задачи и рассмотрены теоретические предпосылки повышения качества ГЭР. В частности, показано, что основной проблемой ГЭР является нестабильность их свойств в процессе бурения скважин, вызванная увеличением температуры, загрязнением гидрофильными материалами, увеличением водосодержания вследствие поступления пластовых вод. Выявлена недостаточность ассортимента отечественных реагентов-стабилизаторов ГЭР, обосновано применение реагентов комплексного действия для повышения устойчивости ГЭР к совокупному действию перечисленных дестабилизирующих факторов и сформулированы принципы разработки таких реагентов. При этом использовались труды П.А. Ребиндера, А.Б. Таубмана, А.Ф. Корецкого, И.Б. Хейфеца, В.Н. Глущенко, А.В. Мнацаканова, М.Ш. Кендиса, А.В. Казьмина, Г.Д. Ягодина, Л.К. Мухина, К.Ш. Овчинского, В.П. Овчинникова, Г.А. Орлова, Н.К. Адама, В. Клейтона, Е. Кокбейна, которыми установлено, что в общем случае свойства ГЭР являются следствием межмолекулярных химических, промежуточных и физических взаимодействий в системах ПАВ-ПАВ, ПАВ-полярная фаза, ПАВ-неполярная фаза, ПАВ-твердая фаза и определяются, в основном, свойствами ПАВ, которые, в свою очередь, зависят от вида и активности их функциональных групп. Зная структуру молекулы ПАВ, а значит имеющиеся функциональные группы, можно спрогнозировать его функциональное действие в составе ГЭР и, наоборот, изменить структуру молекулы с целью соответствующего изменения функциональных способностей. Функциональные способности оцениваются критериями качества, подразделяемыми нами на группы термостойкости и термостабильности. Термостойкость зависит от межмолекулярных

взаимодействий ПАВ на границе раздела фаз, а термостабильность – в объеме непрерывной фазы ГЭР. В связи с различностью механизмов агрегирования ПАВ на поверхности раздела и в объеме непрерывной фазы ГЭР механизмы и средства повышения термостабильности и термостойкости должны рассматриваться отдельно друг от друга.

На **термостабильность** ГЭР влияют такие характеристики межмолекулярных связей, как устойчивость к повышению температуры и взаимное расположение молекул, необходимое для образования связи. По этим признакам возможно деление межмолекулярных связей на две группы. Первая, группа по нашему мнению, включает "быстрые" связи (полярные, индукционные и дисперсионные взаимодействия), эффективные при значительных межмолекулярных дистанциях (низком объемном заполнении ГЭР) и в условиях динамического сдвига, но не устойчивые к повышению температуры из-за незначительной энергии взаимодействий. Вторая группа – это "медленные" (водородные или Н-связи и электронно-донорно-акцепторные или ЭДА взаимодействия), которые являются противоположностью первых. Реагентами, образующими быстрые связи, являются ионофоры, например, мыла и соли жирных кислот, а медленные связи образуют неионофоры, такие, как эфиры жирных кислот. Ввиду того, что энергия и скорость образования связей реагентами разных групп отличаются, выбор реагента для стабилизации ГЭР зависит от температуры. Нами экспериментально показано существование критической температуры, равной 45°C, которая отделяет область сравнительно более высокой эффективности быстрых связей. При температурах выше 45°C более эффективны реагенты, образующие медленные связи, что подтверждает выдвинутые относительно характера этих связей предположения.

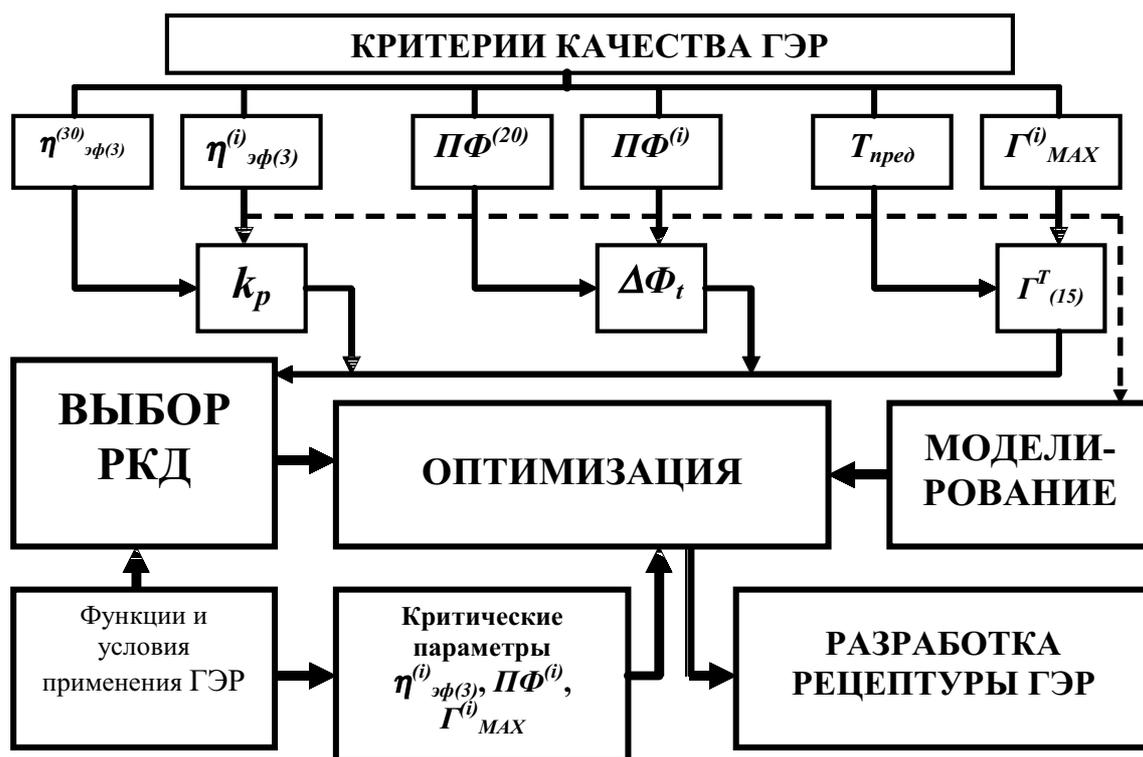
На **термостойкость** ГЭР, по нашему мнению, влияют два основных фактора – ГЛБ (гидрофильно-липофильный баланс) и работа адсорбции ПАВ, которые зависят от присутствующих в его молекуле функциональных групп. Термостойкость ГЭР тем выше, чем больше работа адсорбции и

ближе к оптимальному ГЛБ применяемого в качестве эмульгатора или стабилизатора реагента.

Поскольку температура ГЭР в скважине в один и тот же момент времени различна на разных ее участках, а приоритет между критериями качества в общем случае неизвестен, то стабилизирующий реагент должен быть эффективным одновременно по всем критериям как при низких, так и при высоких температурах. Выполнить данное требование, по нашему мнению, возможно путем интенсификации медленных взаимодействий, что достигается стабилизацией ГЭР реагентами, образующими не менее трех связей на молекулу. С этой точки зрения перспективными реагентами являются эфиры жирных кислот и триэтаноламина, так как присутствующая в таких эфирах имидная функциональная группа, предположительно образует требуемые ЭДА связи со сложноэфирной группой за счет своей неподеленной электронной пары. Количество медленных связей на одну молекулу этих эфиров зависит от степени их замещения, т.е. количества сложноэфирных групп. Поэтому можно предположить, что с увеличением степени замещения эфира будет повышаться термостабильность стабилизированных им ГЭР. С другой стороны, эфирные группы можно непосредственно ввести в молекулу эфира путем оксиэтилирования или оксипропилирования исходных для его получения продуктов, что также должно повысить термостабильность ГЭР. С точки зрения термостойкости также выгодно повышение степени замещения эфира и его оксиэтилирование (оксипропилирование), так как при этом ГЛБ приближается к оптимальному, который у эфиров триэтаноламина значительно смещен в сторону гидрофильности. Совпадение предполагаемых путей повышения термостойкости и термостабильности позволяет заключить, что их реализация позволит комплексно повысить качество ГЭР.

**Во второй главе** описана разработка методического обеспечения повышения качества ГЭР, включающего методику комплексной оценки качества эмульсий и методику оптимизации их рецептур. Выполненный

анализ существующих методик оценки качества ГЭР показал, что они либо не учитывают совокупного действия дестабилизирующих факторов, либо учитывают их влияние только на некоторые параметры ГЭР и требуют для своего применения дорогостоящего нестандартного оборудования. Недоступность необходимого оборудования делает невозможным оперативный контроль качества ГЭР и усложняет разработку их рецептур, что делает актуальной разработку методики оценки качества ГЭР, не использующей сложного и дорогого оборудования. Для условий скважины и пласта нами была разработана комплексная методика оценки качества эмульсий (КМКЭ), которая позволяет получить достаточно полную информацию об основных функциональных способностях раствора с учетом суммарного влияния дестабилизирующих факторов и разрабатывать рецептуры ГЭР, оптимизированные для конкретных условий применения.



Структурная схема предложенной методики представлена на рис.1.

**Рис.1. Структурная схема оценки качества при помощи КМКЭ**

Разработанная методика учитывает следующие функциональные способности ГЭР: 1) агрегативную устойчивость, оцениваемую критериями термостойкости  $T_{пред}$  и глиноёмкости  $\Gamma_{max}^i$ ; 2) несущую, удерживающую способности и прокачиваемость, которые оцениваются критерием

эффективной вязкости при скорости сдвига  $3,1 \text{ с}^{-1} \eta_{\text{эф}(3)}^{(i)}$ ; 3) блокирующую способность, т.е. способность к созданию непроницаемого экрана на границах "скважина-пласт" и "фильтрационный канал-поровое пространство", оцениваемую критерием фильтратоотдачи  $ПФ^{(i)}$ . Критерии  $ПФ^{(i)}$ ,  $\eta_{\text{эф}(3)}^{(i)}$  и  $\Gamma_{\text{max}}^i$  характеризуют термостабильность ГЭР и определяются для максимальной температуры в скважине. Они непосредственно характеризуют качество ГЭР, тогда как термостойкость показывает предельную температуру, при которой показатели термостабильности имеют смысл.

Для определения всех перечисленных критериев применяется несложное доступное оборудование, которое позволяет непосредственно получать значения  $ПФ^{(i)}$ ,  $\eta_{\text{эф}(3)}^{(i)}$  при температуре до  $100^\circ\text{C}$ , а  $T_{\text{пред}}$  и  $\Gamma_{\text{max}}^i$  – до  $230^\circ\text{C}$ . При необходимости оценки качества ГЭР при температурах выше  $100^\circ\text{C}$  значения  $ПФ^{(i)}$ ,  $\eta_{\text{эф}(3)}^{(i)}$  вычисляются путем экстраполяции соответствующих моделей, полученных при вариации температуры в пределах  $20 \div 100^\circ\text{C}$ . Применение моделирования позволяет избежать использования сложного, дорогостоящего оборудования для определения  $ПФ^{(i)}$  и  $\eta_{\text{эф}(3)}^{(i)}$  при высоких температурах и обеспечить возможность оперативного контроля качества ГЭР в условиях промысла.

Для моделирования  $ПФ^{(i)}$ ,  $\eta_{\text{эф}(3)}^{(i)}$  и  $\Gamma_{\text{max}}^i$  требуется большое количество опытов, много времени и вычислительной работы, поэтому методика предусматривает приближенную оценку этих критериев на основе показателей относительной термостабильности  $k_p$ ,  $\Delta\Phi_t$ ,  $\Gamma_{(15)}^T$ , которые характеризуют динамику изменения последней. Данные показатели имеют следующую сущность:

- 1) коэффициент температурного разжижения  $k_p = \eta_{\text{эф}(3)}^{(90)} / \eta_{\text{эф}(3)}^{(30)}$  представляет собой отношение эффективной вязкости ГЭР при  $90^\circ\text{C}$  к ее значению при  $30^\circ\text{C}$ ;

2) температурный градиент изменения фильтратоотдачи

$\Delta\Phi_i = (ПФ^{(90)} - ПФ^{(20)})/7$  равен среднему изменению фильтратоотдачи ( $\text{см}^3/30\text{мин}$ ) в диапазоне температур  $20 \div 90^\circ\text{C}$ , вызванному увеличением температуры на каждые  $10^\circ\text{C}$ ;

3) относительная глиноёмкость  $\Gamma_{(15)}^T = \frac{T_{15}^{nped}}{T_0^{nped}}$  равна отношению термостойкости ГЭР с добавкой 15% глинопорошка ( $T_{15}^{nped}$ ) к ее первоначальному значению без этой добавки ( $T_0^{nped}$ ).

При оценке качества ГЭР по указанным критериям относительной термостабильности действует правило – качество тем выше, чем выше  $k_p$ ,  $\Gamma_{(15)}^T$  и ниже  $\Delta\Phi_i$ . Ввиду того, что для определения каждого показателя относительной термостабильности требуется всего две экспериментальных точки и минимум вычислений, эти показатели используются для экспрессного подбора реагентов комплексного действия при разработке составов ГЭР.

Таким образом, все критерии входящие в КМКЭ, относятся к двум группам: 1) критерии термостойкости и термостабильности, которые непосредственно характеризуют качество ГЭР в условиях скважины; 2) вспомогательные критерии относительной термостабильности, которые позволяют качественно оценить устойчивость ГЭР к дестабилизирующим факторам и предварительно выбрать подходящий реагент. После предварительного выбора реагента уточняется влияние дестабилизирующих факторов на качество ГЭР и разрабатываются рецептуры, для чего используется входящая в КМКЭ методика математического моделирования и оптимизации (ММО), представленная на рис.1 блоками "моделирование" и "оптимизация". Моделирование включает получение эмпирических зависимостей параметров термостабильности от температуры, глиносодержания и концентрации РКД, а оптимизация – вычисление концентрации РКД, необходимой для обеспечения качества ГЭР при заданных критических значениях критериев качества, водосодержания,

минерализации, составе углеводородной фазы, выбор которых обоснован функциями и условиями применения ГЭР.

**В третьей главе** описывается разработка новых комплексных реагентов для получения и управления свойствами ГЭР и даны результаты изучения их свойств и оптимизации составов. Для разработки реагентов с целью повышения термостойкости ГЭР нами обосновано применение методики расчета работы адсорбции ( $\Delta\Omega^{\Delta G}$ ) и ГЛБ молекулы ПАВ. Методика предполагает расчет энергетических параметров адсорбции ПАВ при помощи справочных величин стандартных энергий Гиббса растворения его функциональных групп в полярной ( $\Delta G_B$ ) и неполярной ( $\Delta G_O$ ) фазах ГЭР. Необходимым условием повышения термостойкости является увеличение  $\Delta\Omega^{\Delta G}$ , а достаточным – оптимальность ГЛБ, величину которого предложено характеризовать коэффициентом энергетического баланса  $K_e$ , который равен частному от деления суммарных энергий взаимодействия ПАВ с неполярной и полярной фазами. При расчете используются справочные величины  $\Delta G_B, \Delta G_O$ , скорректированные на реальные фазы ГЭР по изменению его термостойкости при переходе от условий определения справочных величин  $\Delta G_B, \Delta G_O$  к реальным. Величины соответствующих поправок определены нами экспериментально: 1) при переходе от масла к ДТ  $\Delta G_O$  снижается в среднем (для различных функциональных групп) на 15%; 2) с ростом минерализации воды  $\Delta G_B$  возрастает в среднем на 30%. При использовании скорректированных  $\Delta G_B, \Delta G_O$  расчетные параметры адсорбции, как это видно из табл.1, хорошо согласуются с фактически замеренной термостойкостью ГЭР, что показывает корректность введенных поправок и применимость методики расчета.

Представленные в табл.1 результаты показывают, что повышения термостойкости ГЭР, стабилизированных сложными эфирами триэтаноламина (ТЭА), можно добиться следующими путями:

1) использованием высокомолекулярных фракций синтетических жирных кислот (СЖК), входящих в состав кубового остатка производства СЖК

(КСЖК); 2) увеличением степени замещения эфира; 3) связыванием остаточных СЖК, присутствующих в реагенте СЭТ-1Д, с образованием вторичного стабилизатора на основе оксипропилированных глицеридов КСЖК.

**Таблица 1**

**Расчетные параметры адсорбции различных ПАВ и фактическая термостойкость ГЭР на их основе**

Параметр	ПАВ				
	Са-мыло СЖК (С <sub>19</sub> )	моноэфир таллового масла и ТЭА (Эмультал)	моноэфир ТЭА и КСЖК (СЭТ-1)	СЭТ-1М	
				дизамещенный эфир ТЭА и КСЖК (СЭТ-1Д)	оксипропили- рованные глицериды КСЖК
Работа адсорбции $\Sigma\Delta\Omega$ , мДж/м <sup>2</sup>	122	258	352	299	273
Оптимальный к-т энергетического баланса $K_3^{opt}$	3	6,72	9,15	7,77	7
Фактический к-т энергетического баланса $K_3^{\phi}$	3	0,95	2,11	5,77	28
Отношение $K_3^{opt}/K_3^{\phi}$	1	7,07	4,34	1,35	0,25
Термостойкость ГЭР, °С	105	90	146	165	-
				187	

Первый путь реализован нами в реагенте СЭТ-1, в котором использованы более длинные углеводородные радикалы КСЖК, что позволило в сравнении с Эмульталом увеличить  $T_{пред}$  в 1,62 раза за счет увеличения  $\Sigma\Delta\Omega$  в 1,36 раза и снижения отношения  $K_{opt}^3/K_{\phi}^3$  с 7,07 до 4,34. Однако радикального улучшения термостабильности ГЭР на основе этого реагента не было достигнуто.

Второй путь одновременно с первым реализован в разработанном нами реагенте СЭТ-1Д, что позволило за счет оптимизации ГЛБ ( $K_{opt}^3/K_{\phi}^3=1,35$ ), повысить  $T_{пред}$  в 1,83 раза (165°С), а также получить дополнительную ЭДА активную сложноэфирную группу, т.е. обеспечило необходимую для объемного структурообразования термоустойчивую третью связь. Таким образом, показана необходимость и достаточность увеличения работы

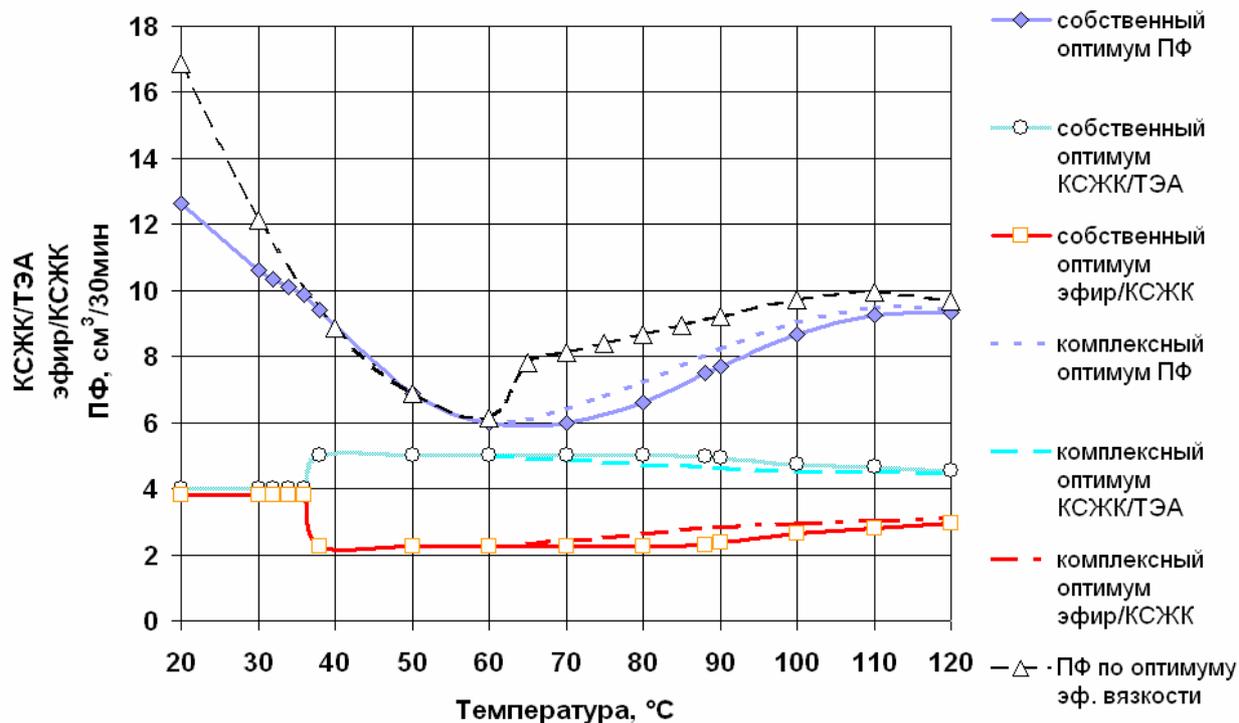
адсорбции реагентов при приближении их ГЛБ к  $K_{opt}^3$  для цели повышения термостойкости и термостабильности ГЭР.

Третий путь реализован в реагенте СЭТ-1М путем сочетания в его составе СЭТ-1Д, т.е. реагента, ГЛБ которого близок к оптимальному, с оксипропилированными глицеридами, имеющими  $K_{\phi}^3 > K_{opt}^3$  (вторичными стабилизаторами), что позволило дополнительно повысить  $T_{пред}$  на 13%.

Достигнутые результаты не являются предельными, так как фактически испытанные реагенты на основе дизамещенных эфиров СЭТ-1Д и СЭТ-1М содержат в своем составе остаточные КСЖК, которые образуют с эфирами соли вида  $\text{RCOO}^- \cdot [\text{N}(\text{C}_2\text{H}_4\text{COOR})_x \text{N}(\text{C}_2\text{H}_4)_{(3-x)}]^+$  (где R-алифатический радикал КСЖК, x-степень замещения эфира), блокирующие образование медленных связей имидной группой. Остаточные КСЖК являются необходимой предпосылкой образования дизамещенных эфиров, а их количество увеличивается с ростом выхода этих эфиров. Эфиры и их соли образуют соответственно медленные и быстрые типы связей, поэтому свойства ГЭР зависят от их соотношения в РКД, а отклонение свойств относительно оптимума – от температуры. Все перечисленные факторы значимо влияют на качество ГЭР в связи с чем актуальна задача оптимизации состава РКД с целью улучшения свойств ГЭР в широком температурном интервале.

Для решения указанной задачи нами выполнена комплексная оптимизация состава РКД СЭТ-1Д, в результате которой было выбрано отношение КСЖК/ТЭА, обеспечивающее наилучшие свойства ГЭР в температурном интервале  $20 \div 120^\circ\text{C}$ . Критерием оптимальности служило одновременное увеличение  $\eta_{эф(3)}^{(i)}$ ,  $T_{пред}$  и снижение  $ПФ^{(i)}$  во всем обозначенном интервале. Выбор критерия оптимальности продиктован соображением сокращения расхода РКД. Поскольку значимы все свойства ГЭР, то сокращение расхода РКД может быть достигнуто только при их одновременной избыточности, достижение чего является задачей

оптимизации. Сложность заключается в том, что оптимальное соотношение компонентов РКД, а значит и отношение  $КСЖК/ТЭА$ , зависит от температуры и оптимизируемого параметра ГЭР, что показано на рис.2.



**Рис. 2. Влияние температуры на фильтратоотдачу ГЭР для оптимизированных различным образом составов РКД**

Влияние температуры на оптимальный состав РКД, обусловленное изменением относительной эффективности связей, прослеживается по кривой собственного оптимума отношения  $КСЖК/ТЭА$ , которая отражает изменение последнего, необходимое для достижения минимума фильтратоотдачи при различных температурах ГЭР. С другой стороны, аналогичный график может быть построен для критерия эффективной вязкости, на котором кривая собственного оптимума отношения  $КСЖК/ТЭА$  будет уже другой, а при ее реализации мы получим значения фильтратоотдачи, обозначенные на рисунке кривой "ПФ по оптимуму эф. вязкости". Здесь же показана кривая собственного оптимума фильтратоотдачи, соответствующая собственному оптимуму отношения  $КСЖК/ТЭА$ . Сопоставление этих двух кривых фильтратоотдачи показывает, что при использовании отношений  $КСЖК/ТЭА$ , определенных для  $\eta_{эф(3)}^{(i)}$ , наблюдается рост  $ПФ^{(i)}$  относительно ее значений для собственного

оптимума отношения  $KСЖК/ТЭА$  до 36%. Аналогичное сопоставление значений  $\eta^{(i)}_{эф(3)}$ , полученных при использовании различных оптимумов отношения  $KСЖК/ТЭА$ , показывает, что в случае его оптимума для  $ПФ^{(i)}$  уменьшение вязкости доходит до 39%. Поскольку в РКД может быть реализовано единственное отношение  $KСЖК/ТЭА$ , то необходимо выбрать его таким образом, чтобы все свойства ГЭР сохранялись на наилучшем уровне. Данная задача решена нами средствами оптимизации методики ММО, реализующими алгоритм нелинейной многокритериальной оптимизации методом "достижения цели". В результате оптимизации определены комплексно-оптимальные отношения  $KСЖК/ТЭА$  для различных температур, которые обозначены на рис.2 пунктиром. На рисунке видно, что при использовании комплексно-оптимальных отношений  $KСЖК/ТЭА$  увеличение  $ПФ^{(i)}$  относительно собственного оптимума сокращается до 9%. Аналогично уменьшается до 9% снижение  $\eta^{(i)}_{эф(3)}$ . Кроме того, нами экспериментально установлено, что термостатирование ГЭР позволяет улучшить его свойства и снизить их отклонения от собственных оптимумов. Это позволило выбрать одно отношение  $KСЖК/ТЭА=4,5$  оптимальное как по температуре, так и по критериям качества ГЭР. Свойства ГЭР на основе РКД СЭТ-1Д, полученного при этом отношении  $KСЖК/ТЭА$ , представлены в табл.2.

Таблица 2

**Значения критериев качества термостатированного ГЭР при  
использовании комплексного оптимума КСЖК/ТЭА=4,5**

ФАКТОРЫ ОПТИМИЗАЦИИ				КРИТЕРИИ ОПТИМАЛЬНОСТИ			
				Первый критерий		Второй критерий	
Собственный оптимум КСЖК/ТЭА по $\eta_{эф(3)}$	Собственный оптимум КСЖК/ТЭА по ПФ	Комплексный оптимум КСЖК/ТЭА	Температура, °С	ПФ по комплексному оптимуму, см <sup>3</sup> /30мин	Отклонение комплексного оптимума ПФ от собственного, %	Отклонение комплексного оптимума $\eta_{эф(3)}$ от собственного, %	$\eta_{эф(3)}$ по комплексному оптимуму, сПа*с
4,53	4,75	4,5	60	6,82	5,64	-0,01	77,9
4,40	4,79	4,5	70	7,07	7,5	-0,46	73,02
4,39	4,80	4,5	80	7,46	7,76	-1,18	69,11
4,38	4,78	4,5	90	7,97	6,44	-1,98	66,17
4,38	4,74	4,5	100	8,61	4,16	-2,8	64,2
4,37	4,67	4,5	110	9,39	1,82	-3,61	63,2
4,37	4,57	4,5	120	10,29	0,26	-4,36	63,17

Из таблицы следует, что хотя отклонения свойств ГЭР от собственных оптимумов не превышают 8%, их ухудшение с ростом температуры остается существенным, что определяет значительную высокотемпературную фильтратоотдачу ГЭР ( $ПФ^{(120)}=10,3$  см<sup>3</sup>/30мин) и низкую  $\eta_{эф(3)}^{(90)}=63,2$  сПа\*с.

Дальнейшее улучшение свойств ГЭР достигнуто модифицированием СЭТ-1Д оксипропилированным глицерином (ОПГ), который образует глицериды с остаточными КСЖК, присутствующими в СЭТ-1Д. Тем самым уменьшается содержание в ГЭР ионоактивных солей, а его стабилизация происходит преимущественно за счет медленных связей эфиров триэтаноламина и оксипропилированных глицеридов, что очевидно, должно приводить к повышению термостабильности ГЭР. Оптимальное соотношение ОПГ и СЭТ-1Д было определено по максимуму термостойкости и составило 1:4,5, что предполагает образование преимущественно оксипропилированных диглицеридов. Свойства ГЭР на основе разработанных РКД представлены в табл.3.

Таблица 3

### Влияние различных реагентов на качество ГЭР

РКД		Температура, °С	$\eta_{эф(3)}^{(i)}$ , сПа*с	$ПФ^{(i)}$ , см <sup>3</sup> /30мин	$T_{пред}$ , °С	$T_{(15)}^{пред}$ , °С	$K_p$	$\Delta\Phi_t$ , см <sup>3</sup> /10°С	$\Gamma^T_{(15)}$
Базовые	РС	20	-	9	95	87	0,24	2,24	0,92
		30	11,97	7,7					
		90	2,84	24,7					
	Эмультал	20	-	14,9	90	74	0,44	1,1	0,82
		30	7,34	16,1					
		90	3,24	22,6					
Разработанные	СЭТ-1Д	20	-	6,3	165	142	0,62	0,33	0,86
		30	23,6	6					
		90	14,54	8,6					
	СЭТ-1М	20	-	0	187	162	0,77	0,37	0,87
		30	35,94	0					
		90	27,6	2,6					

Как видно из табл.3, модифицированный диглицеридами КСЖК СЭТ-1Д, названный нами СЭТ-1М, улучшает качество ГЭР по критериям  $ПФ^{(90)}$  и  $\eta_{эф(3)}^{(90)}$ , соответственно на 70 и 90% при сохранении относительной глиноемкости и на 13% более высокой  $T_{пред}$ , что делает этот реагент предпочтительным для стабилизации ГЭР, используемых для бурения высокотемпературных горизонтальных скважин в глиносодержащих породах.

**В четвертой главе** описана разработка рецептур ГЭР для бурения высокотемпературных горизонтальных скважин на месторождении Одопту-море шельфа Сахалина и глушения высокотемпературных скважин Уренгойского месторождения, приведены результаты промысловых испытаний разработанного РКД СЭТ-1М. При разработке рецептур бурового раствора исходили из следующей системы требований к ГЭР, обоснованной опытом бурения на месторождении Одопту-море:

- 1) предельная глиноемкость  $\Gamma_{max}^{90} > 23\%$ ;
- 2) показатель несущей способности  $n = 399 \text{ с}^{-1}$  или эквивалентный ему по сути критерий  $\eta_{эф(3)}^{(90)} = 193 \text{ мПа*с}$ ;
- 3) высокотемпературная фильтратоотдача  $ПФ^{(90)} < 6 \text{ см}^3/30 \text{ мин}$ ;
- 4) термостойкость  $T_{пред} > 90^\circ\text{С}$ ;
- 5) плотность  $\rho = 1130 \div 1160 \text{ кг/м}^3$ .

При бурении скважин на данном месторождении применяется состав ГЭР на основе нефти, дизельного топлива и воды, стабилизированный композицией СМАД+Эмультал+органоглина, который будем называть

базовым составом. Базовый состав не обладает запасом качества и позволяет бурить скважины в нормальном режиме, когда ГЭР в скважине циркулирует. С учетом максимальной забойной температуры 90°C объемная температура циркулирующего ГЭР не превышает 50÷60°C, что дает возможность применения базового состава. В то же время, при вынужденных остановках циркуляции, например, вследствие аварий с оборудованием, возникают прихваты бурильной колонны, загрязнение продуктивного пласта, обвалы и осыпи стенок скважины, влекущие за собой потерю ствола. Причиной возникновения этих осложнений является недостаточная термостабильность ГЭР, в частности, его низкая глиноемкость и значительное температурное разжижение. Проведенные нами исследования показали, что глиноемкость базового состава при температуре 90°C  $\Gamma_{\max}^{90} = 7\%$ , что почти втрое ниже требуемой. Частично дестабилизация ГЭР под влиянием его загрязнения глиной предотвращается тонкой очисткой раствора на центрифугах, однако исследования показали, что даже при достаточно низком глиносодержании 7% критерии  $\eta^{(90)}_{эф(3)} = 129 \text{ мПа}\cdot\text{с}$  и  $ПФ^{(90)} = 7,5 \text{ см}^3/30 \text{ мин}$ , хуже требуемых значений соответственно на 33 и 25%. Все перечисленное накладывает ограничения на процесс бурения, включающие лимитирование скорости бурения, исходя из ограничения содержания твердой фазы в растворе, проведение СПО с промывкой и вращением бурильной колонны, частый контроль параметров ГЭР. Указанные ограничения удорожают и усложняют бурение скважин, что делает актуальным повышение термостабильности применяемых ГЭР.

Разработанный состав ГЭР на основе РКД СЭТ-1М в сравнении с базовым составом в отсутствие загрязнения обладает на 27% более высокой  $T_{пред}$  при одинаковой  $\eta^{(90)}_{эф(3)}$  и достаточно низкой фильтратоотдаче, но при этом рабочая концентрация РКД в 2,5 раза меньше, что делает разработанный состав предпочтительным ввиду меньшего расхода реагентов. В то же время, из сравнения показателей качества базового и разработанного составов при близком к предельному уровню загрязнения, которые представлены в табл.4, следует, что последний существенно лучше, так как переносит в 3 раза большее загрязнение глинопорошком ( $\Gamma_{\max}^{90} = 26\%$  против

7%) при 4% загрязнении пластовой водой. При этом разработанная рецептура не теряет своего качества при критическом значении глиносождения (23%), о чем свидетельствуют значения критериев  $ПФ^{(90)}$  и  $\Gamma_{max}^{90}$ , удаленные от своих критических значений внутрь области качества на 33% и 13%, соответственно. Эти результаты получены при оптимальной для данного глиносождения концентрации РКД, которая равна суммарной концентрации СМАД и Эмультала в базовой рецептуре, отсутствии органобентонита и использовании дизельного топлива вместо нефти, что позволяет предположить возможность еще большего улучшения качества ГЭР за счет: 1)повышения концентрации РКД сверх оптимальной; 2)введения органобентонита в качестве дополнительного стабилизатора; 3) замены части дизельного топлива на нефть.

**Таблица 4**

**Показатели качества базового и разработанного составов ГЭР при предельном загрязнении глинопорешком**

Состав ГЭР (исходное отношение углеводород/вода=60:40)			Значения критериев качества (КМКЭ)		
Базовый+7%ГП+4%ПВ			Фактические		
Компонент	%, масс.	%, об.	$ПФ^{(90)}$ , см <sup>3</sup> /30мин	$\Gamma_{max}^{(90)}$ , %	$\eta_{эф(3)}^{(90)}$ , сПа*с
Нефть	14	18,8	7,5	7	12,9
Вода+CaCl <sub>2</sub>	34,5	32,8			
Пластовая вода (ПВ)	4,3	4,7			
ДТ	22,7	31	Критические		
СМАД-1М	2,8	3,8	6	23	19,3
Эмультал	1,6	1,9			
СаО	0,8	0,3			
Барит	11,1	3			
VG-Plus	0,8	0,4			
Глинопорешок (ГП)	7,4	3,4			
Разработанный+23%ГП+4%ПВ			Фактические		
Диз. топливо	35	47,8	4	26	19,3
Вода+CaCl <sub>2</sub>	33	31,6			
Пластовая вода (ПВ)	4,1	4,5			
СЭТ-1 М	4,6	5,4			
СаО	0,2	0,1			
Глинопорешок (ГП)	23,1	10,6			
Барит	0	0			

При увеличении глиносодержания разработанного состава ГЭР от нуля до значения глиноемкости необходимая концентрация РКД возрастает с 2 до 4,6%. Практически при бурении будет происходить постепенная наработка раствора глиной, и соответствующая ей оптимальная концентрация РКД будет принимать промежуточные значения. Если изменение оптимальной концентрации не учитывать, то она должна быть принята равной своему значению для предельного глиносодержания, т.е. 4,6%. В этом случае перерасход РКД на начальном этапе бурения, когда глиносодержание незначительно, составит 2,5%, что существенно повысит стоимость раствора. Для сокращения расхода РКД нами рассчитаны его оптимальные концентрации для различных значений глиносодержания исходя из удовлетворения критериев качества ГЭР требуемым значениям. Глиносодержание задавалось как непосредственно в процентах от веса ГЭР, так и через его плотность. Для оптимизации применялась методика ММО, по которой первоначально были получены эмпирические зависимости  $PF^{(90)}$ ,  $T_{пред}$  и  $\eta^{(90)}_{эф(3)}$  от концентрации РКД и глиносодержания, а затем по этим моделям выполнена комплексная оптимизация. По вычисленным значениям оптимальных концентраций РКД получена их эмпирическая зависимость от глиносодержания в виде  $C_{СЭТ-1М} = 4,691 \cdot (1 + 3,937 \cdot e^{-0,265(C_{ГП} - 8,795)})^{-0,254}$ , где  $C_{ГП}$  – концентрация глинопорошка (% , масс.), которая позволяет установить рациональное количество РКД для обработки ГЭР в процессе бурения.

Разработанный состав ГЭР на основе РКД СЭТ-1М является предпочтительным для использования в качестве бурового раствора при высоких забойных температурах, высоком уровне загрязнения выбуренной породой и пластовой водой при бурении горизонтальных скважин на месторождении Одопту-море, так как позволяет: 1)обеспечить стабильность ГЭР на забое скважины при длительной остановке циркуляции за счет повышения его термостабильности; 2)повысить технологичность приготовления ГЭР, упростить управление его свойствами и разработку рецептур за счет замены нескольких специальных реагентов одним РКД;

3) снизить затраты на буровой раствор за счет снижения рабочей концентрации РКД; 4) увеличить интервал времени между химическими обработками ГЭР и замерами его параметров; 5) отказаться от использования дорогостоящего органобентонита VG-Plus.

Разработанный реагент СЭТ-1М успешно прошел опытно-промышленные испытания в качестве эмульгатора-стабилизатора ГЭР, применяемых Уренгойским управлением интенсификации и ремонта скважин при КРС и внедрен в процесс бурения скважин ОАО "НК Роснефть-Сахалинморнефтегаз". Суммарный объем внедрения реагента составил 120т.

### **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ**

1. Предложена классификация межмолекулярных взаимодействий, разделяющая их по особенностям функционального действия в составе ГЭР на "быстрые" и "медленные", и установлено, что для комплексного повышения качества ГЭР по показателям термостойкости и термостабильности эффективно применение ПАВ, образующих преимущественно медленный тип связей.
2. Разработана комплексная методика оценки качества и оптимизации рецептур эмульсий, позволяющая получать полную оценку их основных функциональных способностей за счет учета совокупного влияния дестабилизирующих факторов, а также принимать точные количественные рецептурные решения по корректировке качества за счет применения математических методов многокритериальной оптимизации и системы критериев качества, допускающих применение этих методов.
3. Разработан и рекомендован к промысловым испытаниям реагент комплексного действия СЭТ-1М, который позволяет существенно улучшить термостабильность и термостойкость ГЭР и исключить применение с этой целью дополнительных реагентов.
4. Разработан ГЭР на основе СЭТ-1М для бурения пологих и горизонтальных высокотемпературных скважин, который за счет

высоких показателей термостойкости и термостабильности позволяет сократить расход реагентов, увеличить интервал времени между химическими обработками ГЭР и замерами его параметров, отказаться от использования дорогостоящего органобентонита.

5. СЭТ-1М успешно прошел промысловые испытания в качестве реагента для получения термоустойчивых инвертных эмульсий, используемых при капитальном ремонте высокотемпературных газоконденсатных скважин Уренгойского ГКМ.
6. Нарботана опытно-промышленная партия СЭТ-1М, выполнено внедрение данного реагента для бурения скважин ОАО «НК Роснефть-Сахалинморнефтегаз»

**ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ  
ПУБЛИКАЦИЯХ**

1. Соловьев А.Я., Конесев Г.В., Янгиров Ф.Н. и др. Исследование высокотемпературной стабильности гидрофобно-эмульсионных растворов //Башкирский химический журнал. - Уфа: Реактив, 2002. -Т.9. №3. - С.54-56.
2. Соловьев А.Я., Конесев Г.В., Янгиров Ф.Н. Исследование синтеза и свойств соединений жирных кислот и триэтаноламина как стабилизаторов буровых промывочных жидкостей на основе инвертных эмульсий //Башкирский химический журнал. - Уфа: Реактив, 2002. -Т.9. №3. - С.57-61.
3. Спивак А.И., Истомина Н.Н., Юнусов М.С., Конесев Г.В., Соловьев А.Я., Лиштаков А.И., Галяутдинов А.И., Шерешовец В.В., Мулюков Р.А., Докичев В.А., Байбулатова Н.З., Султанова Р.М., Сафиканов Р.М. Разработка реагентов для стабилизации гидрофобных промывочных растворов в буровой технологии//Труды Стерлитамакского филиала Академии наук Республики Башкортостан. –Уфа: Гилем, 2001.- С.130-131.
4. Алексеев Л.А., Ханипов Р.В., Алексеев Д.Л., Соловьев А.Я. Методические основы исследований взаимосвязи износа обсадных колонн с работой сил трения // Сб. науч. тр. III Конгресса нефтегазопромышленников России.- Уфа: Реактив, 2001. - С. 49-52.
5. Соловьев А.Я., Байбулатова Н.З., Голубев Г.О. Оптимизация состава инвертных эмульсий для первичного вскрытия продуктивных пластов// Сб. науч. тр. III Конгресса нефтегазопромышленников России.- Уфа: Реактив, 2001. – С. 56-57.
6. Конесев Г.В., Ханипов Р.В., Соловьев А.Я., Алексеев Д.Л. Исследование процессов трения и изнашивания обсадных колонн при бурении,

- эксплуатации и ремонте // Сб. науч. тр. III Конгресса нефтегазопромышленников России.- Уфа: Реактив, 2001. – С. 54-56.
7. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2002610301. Meval ver. 1.0/ Латыпов А.Ф., Алексеев Д.Л., Соловьев А.Я., Алексеев Л.А., Санников Р.Х./ - М.: Роспатент, 01.03.2002.
  8. Спивак А.И., Конесев Г.В., Мулюков Р.А., Соловьев А.Я., Юнусов М.С., Шерешовец В.В., Докичев В.А., Байбулатова Н.З., Султанова Р.М., Истомин Н.Н., Лиштаков А.И., Галяутдинов А.И., Сафиканов Р.М. Управление свойствами инвертных эмульсий при бурении скважин // Наука и технология углеводородных дисперсных систем: Материалы II Международного симпозиума. В 2 т. – Уфа, 2000. -Т.1. - С. 78.
  9. Юнусов М.С., Шерешовец В.В., Иванов Г.Е, Конесев Г.В., Соловьев А.Я. Разработка инвертной эмульсии на синтетической основе // Наука и технология углеводородных дисперсных систем: Материалы II Междунар. симп.: В 2 т. – Уфа, 2000.-Т. 1. - С. 79.
  10. Патент №2183660 РФ, 7 С10М 141/08//(С 10 М 141/08, 135:04, 133:22, 129:74), С 10 N 30:06. Смазка для опор шарошечных долот с герметизированными опорами / Конесев Г.В., Мулюков Р.А., Докичев В.А., Иванов Г.Е., Смолин А.В., Матвеев Ю.Г., Кондрашов Д.В., Самоходов Ю.И., Янгиров Ф.Н., Шерешовец В.В., Латыпов А.Ф., Юнусов М.С., Соловьев А.Я. (РФ).-№2000107556/04; Заявлено 27.03.2000; Оpubл. 20.06.2002; Приоритет 27.03.2000; //БИПМ.-2002.-№17.
  11. Патент №2201950 РФ, С1 7С 09 К7/06. Способ получения эмульгатора-стабилизатора гидрофобно-эмульсионных буровых растворов/ В.А. Докичев, В.Г. Конесев, Р.А. Мулюков, М.С. Юнусов, А.Н. Греков, А.А. Ахметов, Н.З. Байбулатова, Г.А. Киряков, Р.М. Султанова, А.Ф. Хабибуллина, Ф.Н. Янгиров, А.Я. Соловьев, Р.Т. Шайхутдинов, Н.Н. Истомин, А.А. (РФ).-№2002105472/03; Заявлено 28.08.2002; Оpubл. 10.04.2003; Приоритет 28.02.2002; //БИПМ.-2003.-№10.