

**ЕМЕЛЬЯНОВ АНАТОЛИЙ ВИТАЛЬЕВИЧ**

**ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ И РЕСУРСА ПРОМЫСЛОВОГО  
ОБОРУДОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ  
МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ И ОТЛОЖЕНИЯ СОЛЕЙ**

Специальность 05.26.03 – «Пожарная и промышленная безопасность»  
(нефтегазовая отрасль)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре «Материаловедение и защита от коррозии» Уфимского государственного нефтяного технического университета и в ООО «Инжиниринговая компания (ИК) «Инкомп-Нефть».

Научный руководитель доктор технических наук, профессор  
Бугай Дмитрий Ефимович.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, доцент  
Шарафиев Роберт Гарафиевич;  
кандидат технических наук  
Ишмуратов Равхат Гадеевич.

Ведущее предприятие ООО «Нефтегазодобывающее управление (НГДУ) Октябрьскнефть».

Защита состоится «29» декабря 2003 года в 14-00 на заседании диссертационного совета Д 212.289.05 при Уфимском государственном нефтяном техническом университете по адресу: 450062, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Автореферат разослан «28» ноября 2003 года

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Ибрагимов И.Г.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность проблемы**

В соответствии с Федеральным законом № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.1997 г. трубопроводы систем поддержания пластового давления (ППД) и сбора скважинной продукции относятся к опасным производственным объектам. Опыт эксплуатации нефтяных и газовых месторождений на поздней стадии разработки показывает, что одним из негативных факторов, существенно снижающих промышленную безопасность этих объектов, является отложение на внутренней поверхности труб неорганических солей и механических примесей. Оно наблюдается как при добыче и транспортировке нефти и газа, так и при их дальнейшей подготовке.

Мероприятия, направленные на устранение или снижение пагубного воздействия этого фактора, как правило, малоэффективны, не решают проблему в целом, а также требуют значительных материально-технических затрат. В результате имеют место удорожание добычи нефти и нарушение экологического равновесия в окружающей среде.

Несмотря на повышенный интерес ученых к данной проблеме, до настоящего времени не найдено ее приемлемого решения, так как наиболее пристальное внимание обращается на вопросы совершенствования уже существующих достижений, а не на поиск инновационных альтернатив.

Выходом из сложившегося положения может служить разработка новых принципов, способов и средств, позволяющих более рационально и эффективно предотвращать указанные осложнения.

В диссертации исследуется возможность повышения безопасности и ресурса промыслового оборудования путем удаления из флюидов механических примесей и уменьшения солеотложения, достигаемых воздействием на промысловые жидкости магнитным полем, которое создается техническими устройствами принципиально новой конструкции.

## **Цель работы**

Разработка и техническая реализация новых принципов, позволяющих посредством воздействия магнитного поля на промышленные жидкости существенно интенсифицировать удаление из них механических примесей и снижение солеотложения на металле, повышая тем самым промышленную безопасность и ресурс добывающих скважин и трубопроводов.

В диссертации решались следующие задачи:

1. Оценка агрессивности промышленных сред ряда месторождений Западной Сибири и Урало-Поволжского региона, а также анализ статистических данных по аварийности трубопроводов, масштабам, особенностям и последствиям их разрушения.

2. Исследование влияния состава и свойств природных сред, состава и концентрации механических примесей, а также особенностей структуры сформированных ими отложений на характер коррозии металла внутренней поверхности труб.

3. Обоснование целесообразности применения магнитной обработки промышленных жидкостей с целью коагуляции и последующего удаления ферромагнитных частиц механических примесей, а также разработка соответствующего технического устройства и его внедрение в нефтегазовой отрасли.

4. Определение режимов магнитной обработки скважинной продукции, при которых достигается значительный эффект снижения солеотложения на металле.

5. Разработка устройства для магнитной обработки промышленных жидкостей, расчет его параметров и внедрение на нефтяном и газовом месторождениях с целью снижения интенсивности солеотложения.

## **Научная новизна**

1. Установлено, что основным фактором, негативно влияющим на промышленную безопасность трубопроводов из стали 20 месторождений Урало-Поволжского региона, является вызываемая механическими примесями локальная коррозия металла, поскольку при наличии в промышленных средах не

менее 250 г/л ионов  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ , не более 20 и 0,1 мг/л сероводорода и кислорода соответственно скорость общей коррозии не превышает значений, регламентируемых ГОСТ 9.908-90 (сталь стойкая). Показано, что стойкость стали 20 к общей коррозии обеспечивается экранирующим эффектом, проявляемым образующейся на поверхности фазовой пленкой хлорида натрия.

2. Для случая движущихся в расслоенном режиме промышленных сред с минерализацией не более 30 мг/л и содержанием менее 0,5 мг/л сероводорода (условия месторождений Западной Сибири) получен критерий концентрации механических примесей ( $C_{\text{мп}} \leq 58,5$  мг/л), позволяющий проводить диагностику вида коррозии металла и ее интенсивности без вскрытия трубопровода и, тем самым, определять превентивные меры по повышению его промышленной безопасности.

3. Предложен принцип повышения эффективности очистки промышленных сред от компонентов, вызывающих локальную коррозию металла труб и забивание призабойной зоны пласта, заключающийся в коагуляции ферромагнитных частиц механических примесей на поверхности постоянных магнитов.

4. Показано, что в нефтяных и газовых скважинах существенное снижение (в 1,8-1,9 раза) количества сульфатных и хлоридных отложений наблюдается при непродолжительном (не более 0,5 с) воздействии на продукцию постоянного магнитного поля напряженностью не менее 40 кА/м.

### **Практическая ценность**

1. С целью повышения эффективности существующих методов удаления механических примесей из промышленных флюидов разработано и внедрено в ООО «НГДУ «Уфанефть» устройство для коагуляции ферромагнитных частиц механических примесей (Пат. № 32485, Б.И. № 26, 2003), позволившее в случае фильтров тонкой очистки увеличить среднее значение коэффициента фильтрации на 19,0 %.

2. Разработана и внедрена в газопромысловом управлении (ГПУ) ООО «Оренбурггазпром» и ООО «ИК «Инкомп-Нефть» методика «Оценка эффективности воздействия магнитного поля на образование отложений хлористого натрия». Методика используется в ООО «Оренбурггазпром» и ООО «ИК

«Инкомп-Нефть» при проведении исследований влияния магнитного поля на солеотложение в промышленном оборудовании.

3. Разработано и внедрено в ООО «НГДУ «Арланнефть» и ГПУ ООО «Оренбурггазпром» устройство для магнитной обработки промышленной жидкости, снижающее интенсивность солеотложения в насосно-компрессорных трубах. Его установка в скважине № 137 ООО «НГДУ «Арланнефть» позволила увеличить ее межочистной период в среднем в 2 раза.

#### **Апробация работы и публикация результатов**

Основные результаты работы доложены и обсуждались на производственных совещаниях ОАО «Белкамнефть» (Ижевск, 2001, 2002); 1-й научно-практической конференции «Проблемы нефтегазового комплекса Западной Сибири и пути повышения его эффективности» (Когалым, 2001); Международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию ИжГТУ (Ижевск, 2002); 53-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ (Уфа, 2002); Всероссийской научно-практической конференции «Разработка, производство и применение химических реагентов для нефтяной и газовой промышленности» (Москва, 2002); IV Конгрессе нефтегазопромышленников России (Уфа, 2003).

По результатам работы опубликовано 12 трудов: 7 статей и 4 тезиса докладов; получен 1 патент РФ.

#### **Объем и структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов и приложений. Объем диссертации 176 с. машинописного текста; приводятся 32 таблицы, 69 иллюстраций, 14 приложений. Список литературы содержит 118 наименований.

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во введении приведена общая характеристика диссертации, сформулированы цель и задачи исследований.

**Первая глава** посвящена оценке агрессивности перекачиваемых сред и анализу статистических данных по аварийности промышленных трубопроводов, масштабам, особенностям и последствиям их разрушения (на примере

Ватьеганского и Южно-Ягунского месторождений, а также Вятской и Абдрахмановской площадей Арланского и Ромашкинского месторождений).

В последнее десятилетие на Ватьеганском и Южно-Ягунском месторождениях наблюдается прогрессирующий рост обводненности добываемой продукции. На Ватьеганском месторождении она увеличилась в среднем на 50 %, на Южно-Ягунском – на 30 %, достигнув на обоих месторождениях около 74 %. Хотя средняя обводненность продукции на Вятской площади увеличилась всего на 5 %, ее среднегодовой уровень почти на 20 % выше. Интенсификация добычи нефти и закачки воды на Абдрахмановской площади в начале 70-х годов также привели к значительному росту обводненности продукции. Комплекс работ по совершенствованию систем заводнения позволил замедлить темп роста обводненности, однако ее значение остается на высоком уровне и составляет около 93 %.

Пластовые и сточные воды Вятской и Абдрахмановской площадей характеризуются высокой минерализацией (до 260 г/л), главным образом за счет ионов хлора, а концентрация в них сероводорода достигает 20-50 мг/л. Воды же всех пластов Ватьеганского и Южно-Ягунского месторождений имеют на порядок меньшее значение минерализации и, в отличие от сред Вятской и Абдрахмановской площадей, содержат большое количество бикарбонат-ионов (741–997 мг/л). В попутной воде, отделяемой от нефти Ватьеганского и Южно-Ягунского месторождений, обнаруживается от 0,1 до 0,5 мг/л сероводорода, что не должно значительно увеличивать ее коррозионную активность. В последние годы в сточной воде системы ППД обоих месторождений отмечается присутствие до 14 мг/л сульфат-ионов, что, в частности, можно связать с интенсификацией процесса сульфатредукции в заводняемых пластах.

Прокачка больших объемов воды по наиболее проницаемым пропласткам привела к охлаждению запасов выше- и нижележащих интервалов, причем восстановление температуры до значения первоначальной пластовой происходит очень медленно. Невысокие значения температуры (в пределах 30–40 °С) являются одним из условий роста и развития сульфатвосстанавли-

вающих бактерий (СВБ), которые обнаружены во всей технологической цепи добычи, подготовки и транспортировки нефти и воды, в том числе в призабойных зонах пласта нагнетательных скважин рассматриваемых месторождений, за исключением Вятской площади. Содержание СВБ в средах Абдрахмановской площади составляет  $10^4$ - $10^6$ , а Ватьеганского и Южно-Ягунского месторождений -  $10^5$ - $10^6$  клеток/мл.

Многokратные флуктуации температуры и пластового давления с амплитудой до 7,0 МПа послужили, в частности, причиной разрушения породы коллекторов, которая выносится добываемой жидкостью в трубопроводные коммуникации системы сбора, а при плохом качестве подготовки сточных вод - в трубопроводы системы ППД. Породообразующие компоненты и продукты коррозии являются основными составляющими механических примесей, содержащихся в перекачиваемых средах данных месторождений.

Указанные факторы способствуют увеличению коррозионной активности перекачиваемых сред, что, в свою очередь, создает благоприятные условия для роста аварийности трубопроводов систем нефтесбора и ППД. Из общего числа нарушений герметичности трубопроводов доля отказов по причине коррозии составляет на Абдрахмановской площади 97,5 %, на Вятской - 98,4 %. Из них на Абдрахмановской площади вследствие коррозии наружной поверхности труб произошло 27,0 % отказов, внутренней - 70,5 %. Для Вятской эти значения составляют 74,4 и 24,0 % соответственно.

Более 90 % отказов по причине коррозии наружной поверхности труб приходится на внутриплощадочные нефтепроводы, для которых характерна язвенная коррозия. Наибольшая удельная аварийность по причине внутренней коррозии наблюдается на низконапорных водоводах и нефтесборных трубопроводах (таблица 1). Коррозия имеет локальный характер и развивается по нижней образующей труб, что является следствием формирования в этой области отложений механических примесей, работы макрогальванопар «металл трубы - отложения», а также роста и развития СВБ под пленками отложений, скопления их метаболитов.



Таблица 1 - Средние значения удельной аварийности трубопроводов по причине внутренней коррозии

Назначение трубопровода	Удельная аварийность по месторождению, шт./год·км		
	Ватьеганское	Южно-Ягунское	Абдрахмановская площадь
Нефтеборные	0,070	0,074	0,065
Напорные нефтепроводы	0,020	0,026	
Низконапорные водоводы	0,060	0,084	0,054
Высоконапорные водоводы	0,010	0,017	0,015

Общий ущерб от аварий нефтепроводов на Южно-Ягунском месторождении в период с 1995 по 2001 гг. превысил 1,5 млн. руб., а затраты на ликвидацию аварий в системе нефтебора Ватьеганского месторождения в период с 1991 по 2001 гг. составили 10,3 млн. руб. (в ценах 2002 г.).

На примере Южно-Ягунского и Ватьеганского месторождений показано также, что каждая авария приводит к загрязнению в среднем 25-50 м<sup>2</sup> территории, а в результате 40 % аварий загрязняется до 100 м<sup>2</sup> и более (рисунок 1).

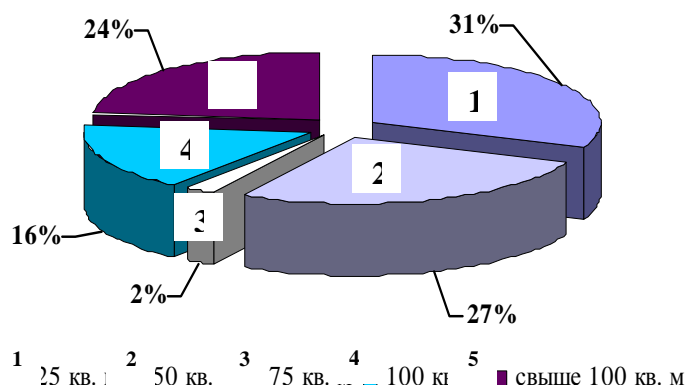


Рисунок 1 - Доли аварий трубопроводов, приводящие к различной площади загрязнения территории

**Во второй главе** рассмотрена зависимость проявлений коррозии, наблюдаемых на Вятской площади Арланского месторождения, от состава и свойств природных сред. Исследовано также влияние состава механических примесей на коррозию нефтепромысловых трубопроводов.

Среды Вятской площади содержат сероводород в количестве, не превышающем 20 мг/л, вследствие чего на поверхности металла образуются защитные фазовые пленки полисульфидов железа, состоящие из троилита и пирита.

Содержание кислорода в этих средах также незначительно (от 0,05 до 0,1 мг/л), в силу чего он не может вызвать активного усиления коррозии.

Причиной малого содержания сероводорода и кислорода в средах Вятской площади является их высокая минерализация (до 260 г/л), уменьшающая растворимость газов. Кроме того, на содержание кислорода влияет отсутствие подпитки сточных вод пресными, за исключением канализационных стоков. Известно, что высокая минерализация сред приводит также к снижению скорости коррозии металла за счет замедления диффузионных процессов подвода деполяризатора к металлической поверхности и падения скорости разряда молекул кислорода.

Степень минерализации сред Вятской площади определяется преимущественно наличием хлорид-ионов (около 160 г/л), а также одновалентных (более 83 г/л) и двухвалентных (более 13 г/л) катионов солей. Хлорид ионы при такой концентрации могут ингибировать коррозию даже при образовании на поверхности металла рыхлой пленки полисульфидов железа (за счет блокирования активных участков поверхности). Одно- и двухвалентные катионы способствуют снижению скорости коррозии металла в сероводородсодержащих средах вследствие повышения рН при гидролизе их солей, а также по причине высокой степени гидратации двухвалентных катионов, что снижает растворимость сероводорода.

Количество углекислоты в пластовых и сточных водах Вятской площади незначительно и не приводит к ускорению коррозии металла труб.

Исследование содержания СВБ в перекачиваемых средах показало отрицательный результат.

Изучение особенностей коррозии промышленных трубопроводов Вятской площади проводили в лабораторных и натуральных условиях. Определяли скорость коррозии металла образцов из углеродистой стали 20.

Лабораторные испытания выполняли тремя отличными по подходу методами: гравиметрическим в U-образной ячейке, потенциодинамическим с помощью потенциостата ЕР 20А и методом поляризационного сопротивле-

ния, используя коррозиметр «Монитор-1М», в водной фазе натурной водо-нефтяной эмульсии. Стендовые испытания по определению скорости общей коррозии стали 20 осуществляли с помощью установки «Монитор-стенд». Коррозионной средой служила сточная вода системы ППД. Скорость коррозии металла труб в натуральных условиях оценивали гравиметрическим методом с привлечением узлов контроля, монтируемых посредством лубрикатора.

Суммарная погрешность гравиметрического метода составила 5,24 %, потенциодинамического – 8,03 % и метода поляризационного сопротивления – 12,74 %. Погрешности определены для доверительной вероятности  $P = 0,95$ .

Результаты испытаний представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Скорость коррозии металла образцов, определенная в различных условиях

Условия испытаний	В лаборатории		На стенде	Натурные испытания
	реальная пластовая вода	модельная пластовая вода		
Скорость коррозии, мм/год	0,093	0,087	0,024	0,010

Невысокие значения скорости коррозии стали могут быть также связаны с наличием в среде некоторого остаточного количества применяемого на Вятской площади ингибитора коррозии. Для проверки этого предположения в лабораторных условиях определяли скорость коррозии стали в модельной среде, имитирующей по составу реальные среды рассматриваемого месторождения. Оказалось (см. таблицу 2), что скорость коррозии стали в реальной и модельной средах практически одинакова. Данный факт свидетельствует об отсутствии ингибитора в пластовой воде на выходе из скважины.

С целью дальнейшего установления причины невысокого значения скорости коррозии стали 20 был проведен качественный рентгенофазовый анализ металла образцов-свидетелей до и после (рисунок 2) экспозиции в коррозионной среде системы нефтесбора. Анализ осуществляли методом шагового сканирования на дифрактометре ДРОН-3М в  $\text{Cu-K}\alpha$  - излучении с использованием плоского графитового монохроматора на дифрагированном пучке.

На рентгенограмме металла образца, экспонированного в коррозионной среде, при малых углах дифракции идентифицированы две реперные линии отражения кристаллического хлорида натрия, что свидетельствует о его образовании на поверхности металла в ходе выдержки в электролите.

По-видимому, образовавшаяся фазовая пленка хлорида натрия вносит значительный вклад в замедление коррозии, играя роль барьера на границе раздела «металл – электролит».

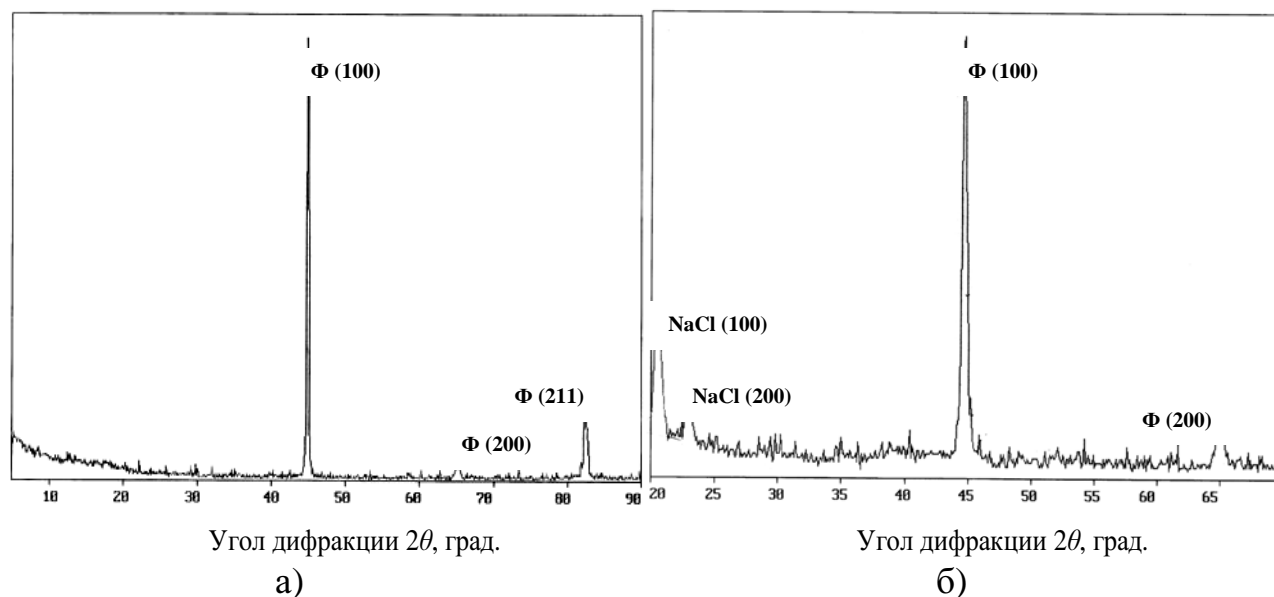


Рисунок 2 - Рентгенограммы металла образцов-свидетелей до (а) и после (б) экспозиции в коррозионной среде

Однако на участках трубопроводов, характеризующихся высокой скоростью движения перекачиваемой среды ( $>1,2$  м/с), происходит эрозионное разрушение этой пленки под воздействием механических примесей, и, как следствие, коррозионно-эрозионный износ металла (рисунок 3).

Рентгенофазовым и физико-химическим анализами установлено, что в составе механических примесей сточных вод системы ППД Вятской площади Арланского месторождения преобладают соединения железа в виде гематита  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , магнетита  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  и маггемита  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ , а также кварц  $\text{SiO}_2$  и различные модификации оксида алюминия, из которых 68,7 % имеют размер частиц не более  $50 \times 10^{-6}$  м, а их концентрация изменяется снизу вверх по сечению трубы от 712 до 275 мг/л.



Рисунок 3 – Образцы-свидетели с коррозионно-эрозионным износом металла

На примере системы ППД Южно-Ягунского месторождения методом парной регрессии получена аналитическая зависимость отношения скоростей локальной и общей коррозии металла от концентрации механических примесей в средах при расслоенном режиме течения. Данная зависимость описывается следующим уравнением регрессии:

$$Y = 1,71 \cdot X, \quad (1)$$

где  $Y$  – отношение скоростей локальной и общей коррозии металла, %;

$X$  – концентрация механических примесей, мг/л;

$1,71$  – коэффициент регрессии.

Из (1) следует, что при равенстве скоростей общей и локальной коррозии концентрация механических примесей в промышленной жидкости составляет 58,5 мг/л. Следовательно, для промышленных жидкостей месторождений Западной Сибири во избежание локальной коррозии металла внутренней поверхности труб необходимо соблюдение критерия  $C_{\text{мп}} \leq 58,5$  мг/л.

Таким образом, одним из наиболее негативных факторов, приводящих к существенному снижению промышленной безопасности и ресурса трубопроводных коммуникаций, является воздействие на металл внутренней поверхности труб коррозионных сред, содержащих механические примеси. Это служит веским основанием для проведения работ по повышению эффективности их удаления из перекачиваемой жидкости.

В третьей главе рассмотрен способ магнитной коагуляции механических примесей, позволяющий повысить эффективность их удаления из промышленных сред. Приведены результаты внедрения устройства, разработанного для осуществления магнитной коагуляции механических примесей.

Значительная часть механических примесей, содержащихся в сточных водах и эмульсиях месторождений Западной Сибири (15-25 %) и Урало-Поволжского региона (45-65 %), относится к магнитным соединениям, что предопределяет целесообразность исследования возможности их коагуляции в магнитном поле.

Если некоторый объем жидкости  $v$  перемещать вдоль расположенных определенным образом постоянных магнитов (вдоль оси  $x$  на рисунке 4), то на содержащиеся в ней ферромагнитные частицы механических примесей будут действовать силы тяжести  $\vec{G}$  и сопротивления обтеканию  $\vec{W}$ , «архимедова» сила  $\vec{R}$  и сила, действующая со стороны магнитного поля  $\vec{F}$ .

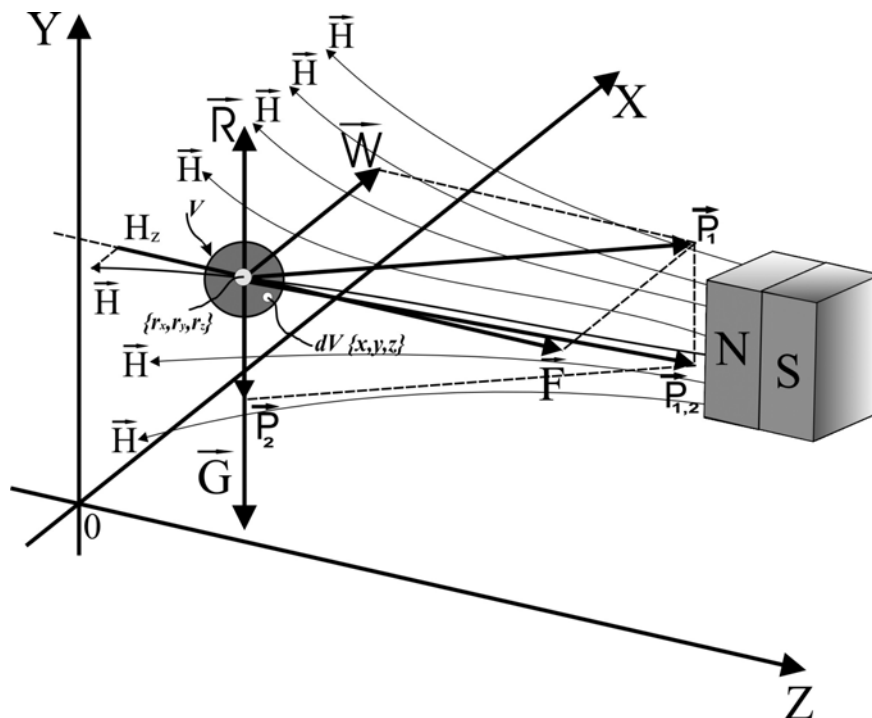


Рисунок 4 – Схема действующих на частицу сил

Если создать условия, при которых результирующая сила  $\vec{P}_{1,2}$  направлена к поверхности магнита, то частицы будут притягиваться к поверхности из жидкости. Осевшие таким образом мелкодисперсные частицы также способ-

ны притягивать к себе другие ферромагнитные частицы, коагулируя до размеров, обеспечивающих их отрыв потоком жидкости. Коагулированные скопления частиц сохраняются в потоке вследствие действия сил остаточной намагниченности и связующих свойств веществ, присутствующих в жидкости (например, смол, парафинов и асфальтенов).

Данный способ коагуляции реализован в специально разработанном устройстве (Пат. № 32485, Б.И. № 26, 2003), схема которого приведена на рисунке 5.

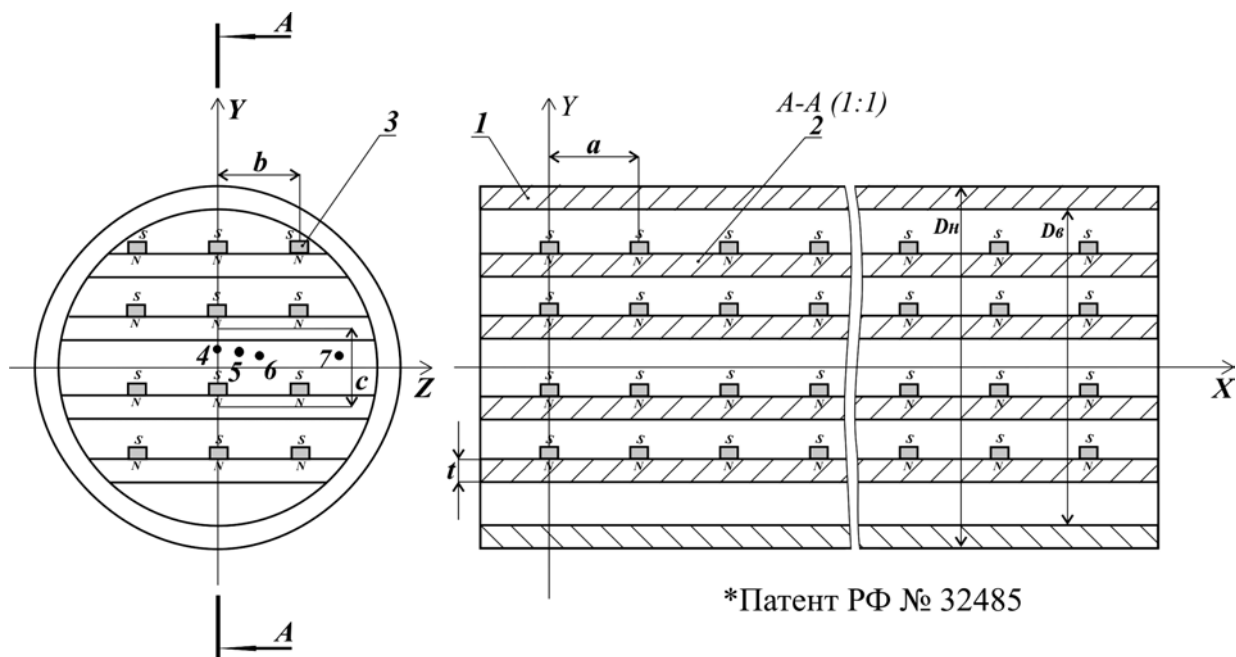


Рисунок 5 - Схема устройства для коагуляции ферромагнитных частиц (УКФЧ) механических примесей: 1 – корпус; 2 – пластина; 3 - постоянный магнит;  
 4  $\{-0,1; 0,009; 0\}$ , 5  $\{-0,1; 0,008; 0,01\}$ , 6  $\{-0,1; 0,005; 0,02\}$ ,  
 7  $\{-0,1; 0,005; 0,06\}$  – точки начала движения частицы в устройство

Значительную сложность при расчете и проектировании этого устройства представляет определение значения силы  $\vec{F}$ , так как необходимо знать величины напряженности и градиента магнитного поля, которое создается системой постоянных магнитов и намагниченным металлом узлов устройства. Кроме того, намагничивание элемента объема металла происходит как вследствие воздействия поля системы постоянных магнитов, так и поля других элементов объема металла.

Для решения проблемы были разработаны алгоритм и программа расчета параметров магнитного поля, позволяющие вычислять его напряженность,

градиент напряженности и силу в любой точке пространства внутри проектируемого устройства при различном расположении конструктивных элементов, а также рассчитывать траекторию движения взвешенных частиц с учетом их магнитных свойств и вязкости жидкости.

Задача расчета напряженности магнитного поля разбивается на две части: 1) расчет суммарного поля системы постоянных магнитов; 2) расчет распределения намагниченности металла узлов устройства и создаваемого им магнитного поля.

Проекцию напряженности  $H_z$  магнитного поля, создаваемого системой постоянных магнитов, на требуемое направление можно найти, направив ось  $z$  декартовой системы координат вдоль этого направления (см. рисунок 4) и затем вычислив интеграл по объему ферромагнитной частицы  $V$ .

$$H_z = \int_V \frac{3z \cdot [I_x(x,y,z)(r_x-x) + I_y(x,y,z)(r_y-y) + I_z(x,y,z)(r_z-z)] - I_z(x,y,z)[(r_x-x)^2 + (r_y-y)^2 + (r_z-z)^2]}{4\pi \cdot [\sqrt{(r_x-x)^2 + (r_y-y)^2 + (r_z-z)^2}]^5} dV, \quad (2)$$

где  $I_x, I_y, I_z$  - компоненты вектора намагниченности  $\vec{I}$ , А/м;

$x, y, z$  - координаты элемента объема ферромагнетика  $dV$ , м;

$r_x, r_y, r_z$  - координаты точки, в которой производится расчет магнитного поля, м.

Расчет поля системы постоянных магнитов проводили методом Монте-Карло, позволяющим вычислять интеграл по сложной трехмерной области.

Расчет распределения намагниченности металла узлов устройства и вычисление создаваемого им поля также осуществляли методом Монте-Карло совместно с модифицированным нами вариантом метода релаксации.

Проекцию силы  $\vec{F}$  на ось  $z$  определяли по формуле

$$F_z = \mu_0 \cdot H_z \cdot M \cdot \nabla, \quad (3)$$

где  $M$  - магнитный момент частицы, А·м<sup>2</sup>;

$\nabla$  - векторный дифференциальный оператор (набла), м<sup>-1</sup>;

$\mu_0$  - магнитная постоянная,  $4\pi \cdot 10^{-7}$  Тл·м/А.

Для однодоменной частицы  $M$  находили по формуле

$$M_o = I_s \cdot V, \quad (4)$$



где  $I_s$  - намагниченность насыщения материала частицы, А/м.

Для многодоменной частицы

$$M_m = \chi \cdot H_z \cdot V, \quad (5)$$

где  $\chi$  - магнитная восприимчивость частицы, ед. СИ.

Траекторию движения ферромагнитных частиц рассчитывали с помощью модифицированного нами алгоритма Верле, применяемого для случая конечноразностного решения систем дифференциальных уравнений.

Выполнены расчеты УКФЧ механических примесей ( $\chi = 5$  ед. СИ; диаметр частиц -  $50 \times 10^{-6}$  м), содержащихся в сточной воде, которая транспортируется по водоводу «РВС – БКНС-5» ООО «НГДУ «Уфанефть». Устройство имеет следующие размеры:  $D_n = 0,159$  м;  $D_e = 0,146$  м;  $a = 0,025$  м;  $b = 0,040$  м;  $c = 0,030$  м;  $t = 0,003$  м. Материал трубы и пластин - сталь 20, остаточная магнитная индукция постоянных магнитов  $B_r = 1,3$  Тл, форма магнитов – цилиндр. Количество магнитов по длине пластины – 20 шт.

В качестве примера на рисунке 6 приведены траектории движения ферромагнитных частиц в данном УКФЧ.

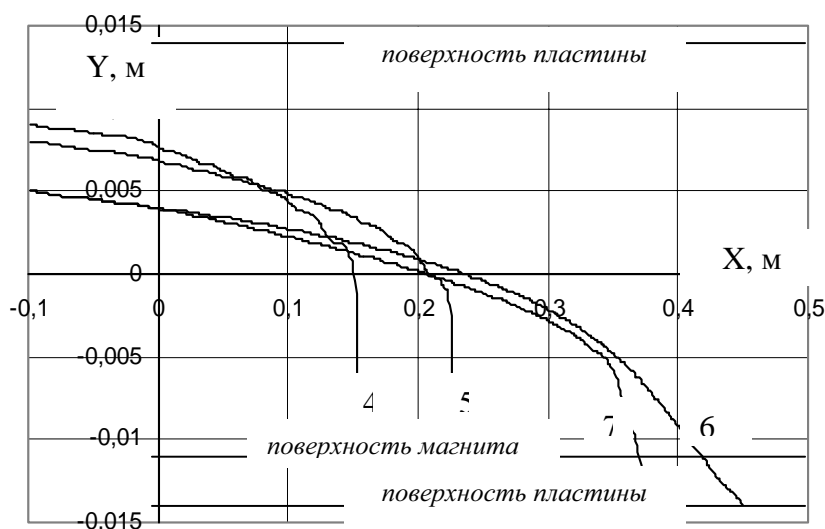


Рисунок 6 – Траектории движения частицы: (4, 5, 6, 7 – см. рисунок 5)

Устройство было установлено перед системой фильтров дожимной насосной станции «Бузовьязы» ООО «НГДУ «Уфанефть» на указанном водоводе (рисунок 7).

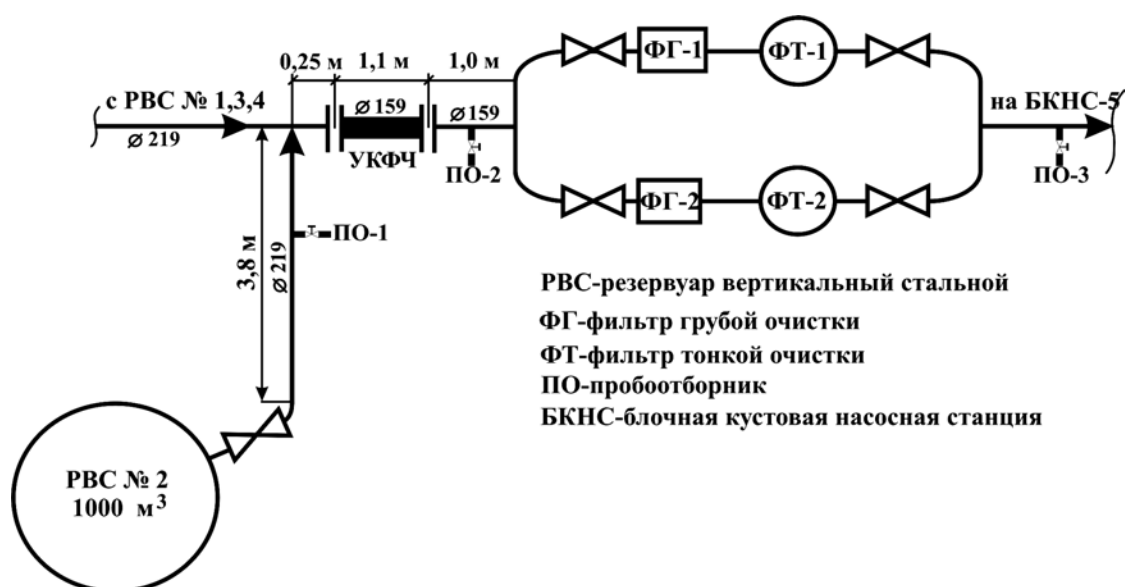


Рисунок 7 - Место монтажа УКФЧ

В период экспозиции УКФЧ среднее значение коэффициента фильтрации фильтров тонкой очистки увеличилось с 0,281 до 0,347 г/м<sup>3</sup>, то есть на 19,0 %.

**В четвертой главе** представлены результаты исследования влияния магнитного поля на снижение интенсивности отложения солей в скважинах ГПУ ООО «Оренбурггазпром» и ООО «НГДУ «Арланнефть», а также расчет параметров устройств для магнитной обработки добываемой продукции и сведения об их внедрении.

Особенности кристаллического строения неорганических солей и наличие в них дефектов структуры сказываются на процессе солеотложения. Так, дефекты структуры увеличивают склонность солей к различным видам взаимодействия. С увеличением плотности упаковки ионов поверхностная энергия снижается, в результате чего реакционная способность солей уменьшается. Чем ближе кристаллическая решетка соли к идеальной, тем меньше возможность ее отложения на поверхности металла и взаимодействия отложившейся соли с собственными ионами, находящимися в растворе. Последнее особенно способствует снижению интенсивности отложения солей вплоть до его полного прекращения.

Известно, что магнитная обработка упорядочивает структуру кристаллов солей. В связи с этим была разработана методика, позволяющая оценивать влияние магнитного поля на снижение интенсивности процесса солеотложения.

Согласно методике, модельные или реальные промышленные среды обрабатывают магнитным полем с различными параметрами и группируют выпавшие кристаллы солей по их размеру. Затем рассчитывают средние значения и дисперсии размеров кристаллов, выделившихся из необработанного ( $\bar{x}, S_x^2$ ) и обработанного ( $\bar{y}, S_y^2$ ) магнитным полем растворов. Степень снижения интенсивности отложения солей на поверхности металла определяют по формуле

$$S = \frac{S_x^2 - S_y^2}{S_x^2} \cdot 100 \% . \quad (6)$$

Исследования проводили в реальных средах добывающих скважин ГПУ ООО «Оренбурггазпром» и ООО «НГДУ «Арланнефть», для которых свойственны хлоридные и сульфатные отложения соответственно.

Таблица 3 - Влияние магнитного поля напряженностью 20 кА/м на кристаллы хлорида натрия

Форма изменения напряженности магнитного поля	$\bar{x}; \bar{y}$ , мм	$S_x^2; S_y^2$ , мкм <sup>2</sup>	S, %
без магнитной обработки	1,656	987,606	—
постоянное магнитное поле			
—	1,219	179,138	81,9
переменное магнитное поле (30 Гц)			
синусоидальная	1,370	358,324	63,7
треугольная	1,496	460,508	53,4
прямоугольная	1,480	443,266	55,1

Примечание: время обработки магнитным полем - 30 с.

Анализ полученных данных (таблица 3) показал, что для условий ГПУ ООО «Оренбурггазпром» наиболее эффективна обработка постоянным магнитным полем.

Таблица 4 - Определение параметров постоянного магнитного поля

Напряженность, кА/м	Время обработки, с	$\bar{y}$ , мм	$S_y^2$ , мкм <sup>2</sup>	S, %
10	30,0	1,234	367,361	62,8
	0,5	1,075	221,776	77,5
20	30,0	1,219	179,138	81,9
	0,5	0,804	152,969	84,5
40	30,0	1,105	164,805	83,3
	0,5	0,443	102,816	89,6

Далее было определено влияние напряженности и длительности воздействия постоянного магнитного поля на снижение интенсивности отложения хлорида натрия, в результате чего установлено, что наибольший эффект наблюдается при напряженности 40 кА/м в течение 0,5 с (таблица 4).

Аналогичный результат получен в результате магнитной обработки скважинной продукции ООО «НГДУ «Арланнефть» (таблица 5).

Таблица 5 - Влияние магнитного поля на кристаллы сульфата кальция

Форма изменения напряженности магнитного поля	$\bar{x}; \bar{y}$ , мм	$S_x^2; S_y^2$ , мкм <sup>2</sup>	S, %
без магнитной обработки	2,119	996,016	—
постоянное магнитное поле			
—	1,053	186,763	81,2
переменное магнитное поле (30 Гц)			
синусоидальная	1,404	293,735	70,5
треугольная	1,495	430,155	56,8
прямоугольная	1,496	416,869	58,1
Примечание: время обработки магнитным полем – 0,5 с, напряженность – 40 кА/м.			

Разработано устройство (рисунок 8) для магнитной обработки жидкости и выполнен расчет его параметров.

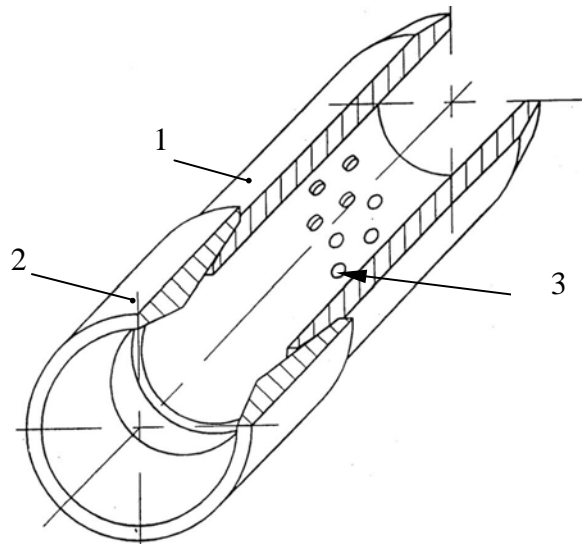


Рисунок 8 - Схема устройства для магнитной обработки скважинной продукции: 1 – корпус; 2 – муфта; 3 – постоянный магнит

Для условий ООО «НГДУ «Арланнефть» сконструировано устройство с длиной корпуса 0,30 м и диаметром 0,073 м. Длина корпуса устройства для газовых скважин составляет 0,42 м при диаметре 2 7/8". Внутри корпуса в четыре ряда одноименной полярностью в противоположных рядах расположе-

ны постоянные магниты: в устройствах для нефтяных скважин - по 10 штук в ряду с расстоянием между центрами магнитов 0,025 м; для газовых скважин - по 20 штук с расстоянием 0,02 м.

Участки эффективного воздействия постоянного магнитного поля ( $H > 40$  кА/м) в описанных устройствах имеют длину 0,210 и 0,375 м соответственно (рисунок 9), а время их прохождения жидкостью - 0,45 и 0,40 с.

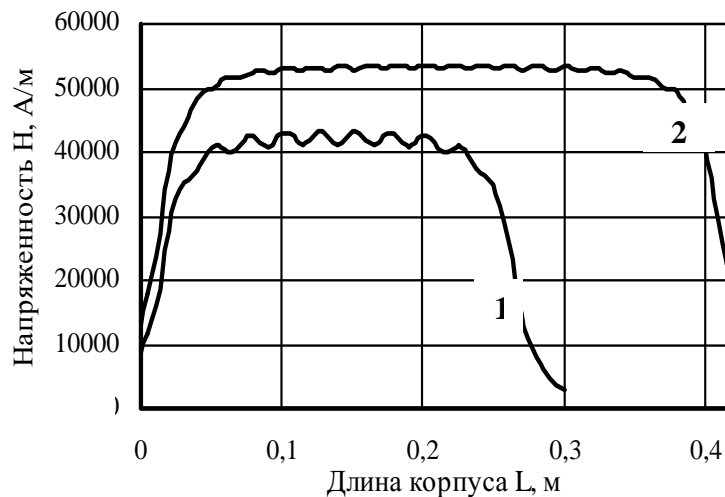


Рисунок 9 - Величина и форма изменения напряженности магнитного поля в устройствах для магнитной обработки: 1 - ООО «НГДУ «Арланнефть»;  
2 - ГПУ ООО «Оренбурггазпром»

Разработанное устройство для магнитной обработки в настоящее время проходит испытания в скважинах ГПУ ООО «Оренбурггазпром».

После установки устройства в скважине № 137 ООО «НГДУ «Арланнефть» ее межочистной период увеличился в среднем в 2 раза.

## ВЫВОДЫ

1. На поздней стадии разработки нефтяных месторождений промышленная безопасность трубопроводных систем в особой степени зависит от коррозионной активности флюидов, которая значительно возрастает вследствие увеличения обводненности добываемой продукции, содержания в ней СВБ и механических примесей. Последние служат причиной возникновения интенсивной локальной коррозии металла труб, которая вызывает существенное увеличение удельной аварийности низконапорных водоводов и нефтесборных трубопроводов.

2. При высокой минерализации промышленных сред ионами  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$  и ограниченной растворимости в них сероводорода, кислорода и двуокиси углерода общая коррозия металла трубопроводов затруднена вследствие замедления диффузионных процессов и экранирования поверхности фазовыми пленками полисульфидов железа и хлорида натрия. Однако в присутствии механических примесей защитное действие пленок уменьшается в результате их эрозионного разрушения. Полученная аналитическая зависимость позволяет на основе контроля содержания в промышленной жидкости механических примесей проводить диагностику преобладающего вида коррозии металла внутренней поверхности трубопроводов без их вскрытия и назначать превентивные меры, направленные на повышение промышленной безопасности.

3. На основе предложенного способа коагуляции ферромагнитных частиц механических примесей в магнитном поле разработаны алгоритм и программа расчета параметров магнитного поля и траектории движения взвешенных в жидкости частиц в специальном устройстве (Пат. № 32485, Б.И. № 26, 2003), позволяющие проектировать его для условий эксплуатации конкретного трубопровода. В частности, в период экспозиции такого устройства, рассчитанного для условий водовода «РВС – БКНС-5» ООО «НГДУ «Уфанефть», среднее значение коэффициента фильтрации фильтров тонкой очистки увеличилось на 19,0 %.

4. Применение установленных режимов постоянного магнитного поля (напряженность – не менее 40 кА/м, продолжительность воздействия – не более 0,5 с) в лабораторных условиях показало снижение отложения хлоридов и сульфатов в реальных средах скважин ГПУ ООО «Оренбурггазпром» на 89,6 %, а ООО «НГДУ «Арланнефть» - на 81,2 %.

5. Показана высокая сходимость эффектов снижения солеотложения в постоянном магнитном поле, полученных в лабораторных условиях (81,2 %) и с помощью специально сконструированного устройства, которое было установлено в скважине № 137 ООО «НГДУ «Арланнефть» (межочистой период увеличился в среднем в 2 раза).

Основные положения диссертационной работы изложены в следующих публикациях:

1. Емельянов А.В., Бугай Д.Е. Комплексная программа мероприятий по обеспечению коррозионной стойкости внутрипромысловых трубопроводных систем //Проблемы нефтегазового комплекса Западной Сибири и пути повышения его эффективности: Матер. 1-й науч.-практ. конф. – Когалым, 2001. – С. 97-98.

2. Инюшин Н.В., Хайдаров Р.Ф., Шайдаков В.В., Емельянов А.В., Чернова К.В. Анализ эксплуатации промысловых трубопроводов НГДУ «Когалым-нефть» //Нефтегазовое дело. – [http://www.ogbus.net/authors/shai\\_3.pdf](http://www.ogbus.net/authors/shai_3.pdf). - 2002.

3. Инюшин Н.В., Шайдаков В.В., Емельянов А.В., Чернова К.В. Анализ эксплуатации промысловых трубопроводов Ватъеганского месторождения НГДУ «Повхнефть» //Нефтегазовое дело.–[http://www.ogbus.net/authors/inu\\_1.pdf](http://www.ogbus.net/authors/inu_1.pdf). - 2002.

4. Князев В.Н., Емельянов А.В., Шайдаков В.В., Лаптев А.Б. Надежность трубопроводов ОАО «Белкамнефть» //Матер. Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 50-летию ИжГТУ. – Ижевск, 2002. – Ч. 4. - С. 23 – 29.

5. Третьяков А.В., Емельянов А.В., Бугай Д.Е. Особенности коррозии промысловых трубопроводов ННПУ-1 ОАО «Белкамнефть» //Сб. тез. 53-й науч.-техн. конф. студ., асп. и молод. уч. УГНТУ. - Уфа, 2002. – С. 70.

6. Емельянов А.В. Повышение эффективности защиты от коррозии промысловых трубопроводов путем применения ингибиторов на основе продуктов нефтехимии //Нефтепереработка и нефтехимия: Матер. науч.-практ. конф. – Уфа, 2002. – С. 300-301.

7. Емельянов А.В., Бугай Д.Е., Лаптев А.Б., Шайдаков В.В. Коррозионно-эрозионное разрушение внутренней поверхности трубопроводов ОАО «Белкамнефть» //БХЖ. - 2002. – Т. 9. - №3. – С. 49-52.

8. Емельянов А.В., Лаптев А.Б., Бугай Д.Е., Рахманкулов Д.Л. Повышение эффективности ингибиторной защиты промысловых трубопроводов Западной Сибири //Разработка, производство и применение химических реагентов для нефтяной и газовой промышленности: Матер. Всерос. науч.-практ. конф. – М., 2002 – С. 142.

9. Шайдаков В.В., Малахов А.И., Емельянов А.В., Лаптев А.Б., Чернова К.В. Предупреждение отложений и эмульсообразования в нефтегазодобывающих скважинах // <http://www.laboratory.ru/articlgeol/ag100r.htm>. - 2003.

10. Емельянов А.В., Бугай Д.Е., Лаптев А.Б. и др. Об эффективности ингибиторной защиты промысловых трубопроводов ОАО «Белкамнефть» // IV Конгресс нефтегазопромышленников России. Секция «Наука и образование в нефтегазовом комплексе»: Сб. науч. ст. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2003 – С. 51-57.

11. Шайдаков В.В., Малахов А.И., Емельянов А.В. и др. Механические примеси в добываемой и транспортируемой продукции нефтяных и газовых месторождений // IV Конгресс нефтегазопромышленников России. Секция «Наука и образование в нефтегазовом комплексе»: Сб. науч. ст. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2003 – С. 125-132.

12. Пат. 32485 РФ, МПК С 02 F 1/48. Устройство для коагуляции ферромагнитных частиц жидкости /В.В. Шайдаков, Ф.Ф. Хасанов, А.Б. Лаптев, А.В. Емельянов, И.Ш. Гарифуллин (РФ). - № 2003112858/20; Заяв. 05.05.03; Опубл. 20.09.03, Бюл. № 26. – С. 730.