

На правах рукописи



003068499

**КУЛАК СЕРГЕЙ МИХАЙЛОВИЧ**

**РАЗРАБОТКА МАГНИТОУПРУГОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ  
НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ  
ПОДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ**

Специальность 25.00.19 - Строительство и эксплуатация  
нефтегазопроводов, баз и хранилищ

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'С. Кулак'.

Тюмень-2007

Диссертационная работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Тюменский государственный нефтегазовый университет» Федерального агентства по образованию Российской Федерации.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
профессор  
**Новиков Виталий Фёдорович**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**Чекардовский Михаил Николаевич**  
кандидат физико-математических наук  
**Ширшова Альбина Вольфовна**

Ведущая организация: **НПЦ «Сибнефтегаздиагностика»,**  
г.Тюмень

Защита диссертации состоится 4 мая 2007 г. в 15<sup>30</sup> час. на заседании диссертационного совета Д 212.273.02 при Тюменском государственном нефтегазовом университете по адресу: 625000, г.Тюмень, ул.Володарского, 38.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотечно-информационном центре Тюменского государственного нефтегазового университета по адресу: 625039, г.Тюмень, ул. Мельникайте, 72.

Автореферат разослан «2» апреля 2007г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Кузьмин С.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В общей аварийности магистральных газопроводов на аварии, связанные с превышением уровня механических напряжений, приходится свыше 13%. Нормативной базой строительства и контроля остаточного ресурса трубопроводного транспорта являются СНиП 2.05.06-85 «Магистральные трубопроводы», СНиП 2.04.12-86 «Расчёт на прочность стальных трубопроводов». Для неразрушающего контроля (НК) напряжений в металлоконструкциях применяются акустические, ультразвуковые, магнитные, оптические и другие методы. Но эффективность их применения для контроля напряжённо-деформированного состояния подземных нефте- и газопроводов (НП и ГП) низка. Прежде всего, это связано с тем, что в предлагаемых методах необходим хороший контакт датчика с поверхностью трубы. Применение перечисленных методов в условиях Крайнего Севера и Сибири в зимнее время осуществлять крайне сложно, а летом в болотистой местности практически невозможно. Все это делает процедуру измерений дорогой, лишает ее оперативности.

Производству же необходим эффективный метод контроля напряжённо-деформированного состояния металла НП и ГП, позволяющий быстро (например, со скоростью пешехода) проводить обследование подземных трубопроводов, не вскрывая грунт над трубой и не нарушая её изоляционного покрытия.

Поэтому с научной и практической точек зрения актуальна разработка высокопроизводительных методов контроля напряжённо-деформированного состояния подземных трубопроводов.

Наиболее перспективными для оценки механических напряжений металла НП и ГП являются методы, основанные на эффекте магнитоупругого размагничивания (магнитоупругой памяти (МУП)). Эти методы делают возможным контактное и дистанционное измерения напряжений без нарушения изоляционных покрытий трубы, оперативно оценивать иско-

мую величину напряжений, обладают высокой производительностью и возможностью измерять компоненты двухосного нагружения.

**Целью диссертационной работы** является разработка нового неразрушающего магнитоупругого метода контроля напряжённо-деформированного состояния подземных трубопроводов.

Для выполнения поставленной цели в диссертационной работе решались следующие задачи:

- определить зависимость изменения напряжённости магнитного поля локальной намагниченности ферромагнитной модели трубопровода (ТП) от величины испытываемой однородной нагрузки и её дозированной вариации (уменьшении и последующем восстановлении);
- установить закономерности необратимого изменения напряжённости магнитного поля рассеяния локальной намагниченности модели ТП под действием продольных напряжений (растяжение, сжатие) при дозированном изменении её внутреннего давления (изменении кольцевых напряжений);
- исследовать распределение магнитного поля вдоль оси длинномерной изогнутой модели трубопровода;
- разработать методику полевых измерений магнитного поля на поверхности ГП и способы калибровки напряжений. Оценить максимальные продольные напряжения подземного ГП и сравнить их значения с рассчитанными по предлагаемым СНиП 2.05.06-85, СНиП 2.04.12-86 формулам;
- исследовать сезонные изменения напряжённо-деформированного состояния действующего ГП на входе и выходе компрессорной станции.

**Научная новизна выполненных исследований:**

- разработаны на основе МУП, метрологические основы нового метода измерения напряжений подземного трубопровода по вариации одной из составляющих его нагрузки;

- разработан на основе «магнитной памяти» метод определения максимальных напряжений и их сезонных (март-сентябрь) изменений, действующих в подземном газопроводе;
- разработан метод диагностики арок подземного трубопровода, определения их протяжённости и максимальных напряжений в них.

#### **Практическая ценность работы:**

- впервые разработанный и предложенный магнитный (на основе магнитоупругой памяти) метод контроля продольных напряжений в трубопроводе (НП, ГП) по дозированной вариации внутреннего давления, позволяет оценивать напряжённо-деформированное состояние, как подземных трубопроводов, так и хранилищ нефти и газа;
- магнитный метод (на основе «магнитной памяти») и предложенная методика, и аппаратура позволяют контролировать напряжения подземного ТП, определять участки с повышенным уровнем напряжений и их сезонные изменения;
- применение методики измерения магнитного поля рассеяния на поверхности подземного ТП с использованием эффекта магнитной памяти позволяет обнаруживать арки и определять величины максимальных напряжений в них.

**На защиту выносятся** разработанные магнитоупругие методы контроля напряжённо-деформированного состояния подземных трубопроводов.

**Апробация работы.** Основные результаты и научные положения диссертационной работы были доложены на: международной конференции «Разрушение и мониторинг свойств металлов», г.Екатеринбург, 2003г.; XVII Российской научно-технической конференции «Неразрушающий контроль и диагностика», г.Екатеринбург, 2005г.; V международной научно-технической школе-семинаре «Эффект Баркгаузена и аналогичные физические явления», г.Ижевск, 2004г.; III международной научно-

технической конференции «Новые материалы, неразрушающий контроль и наукоёмкие технологии в машиностроении», г.Тюмень, 2005г.

**Публикации.** По результатам выполненных исследований опубликовано 19 статей.

**Объем работы.** Диссертация состоит из введения, 4-х разделов, выводов, списка литературы. Диссертация изложена на 157 страницах, содержит 55 рисунков, 13 таблиц. Список литературы включает 125 наименований.

### КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** приводится обоснование актуальности работы и её практической ценности. Сформулированы цели и задачи исследований.

В **первом разделе** проведён обзор существующих методов неразрушающего контроля механических напряжений в металлоконструкциях. Из него следует, что в настоящее время нет эффективных методов пригодных для контроля напряжённо-деформированного состояния подземных трубопроводов без выполнения трудоёмких работ по доступу к поверхности трубы.

**Второй раздел** посвящён описанию аппаратуры, методики лабораторных и полевых исследований, а также основным характеристикам объектов исследований. Лабораторная установка для исследования магнитоупругих явлений полых цилиндров ( $D=25\text{мм}$ ,  $d=23\text{мм}$ ,  $L=80\text{мм}$ ) разработана и изготовлена на базе разрывной машины Р-50. Её блок-схема приведена на рис. 1.

Установка позволяла реализовать следующие виды работ: продольное растяжение и сжатие полых цилиндров вплоть до предела текучести материала; реализация в полых цилиндрах кольцевых напряжений до 200 МПа с помощью давления, создаваемого гидроцилиндром; локальное намагничивание полого цилиндра; измерение напряжённости магнитного поля рассеяния намагниченных участков феррозондовым магнитометром.

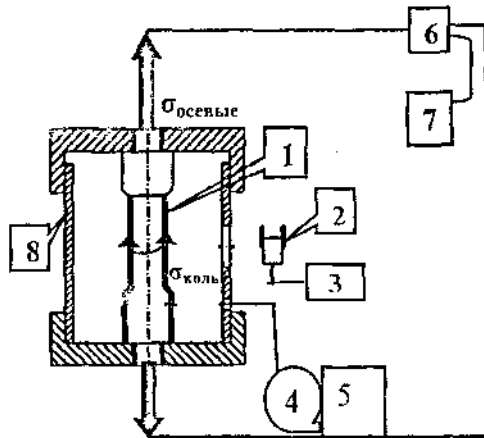


Рис.1. Блок-схема лабораторной установки для исследования магнитоупругих явлений (МУП)

1-образец в виде полого цилиндра; 2-прикладываемые к образцу феррозонды; 3-магнитометр; 4-манометр; 5-гидропресс; 6-силоизмеритель разрывной машины; 7-электронный самописец (аналого-цифровой преобразователь); 8-направляющий цилиндр.

Третий раздел посвящён разработке метода контроля напряжений в магистральных НП и ГП, в основе которого лежит зависимость величины магнитоупругого размагничивания под действием продольных и кольцевых напряжений (магнитоупругая память (МУП)), локально намагниченных полых цилиндров из трубных марок сталей (сталь 10, 09Г2С).

Предложен метод контроля продольных напряжений подземного трубопровода по изменению магнитного поля локально намагниченного участка вследствие варьирования кольцевых напряжений. Для этого исследовался эффект МУП на полых цилиндрах, в которых можно было при заданной продольной нагрузке изменять величину внутреннего давления. Было установлено, что при заданной величине вариации давления  $\Delta P$  изменение напряжённости магнитного поля локально намагниченного участка полого цилиндра тем больше, чем больше была приложенная продольная нагрузка.

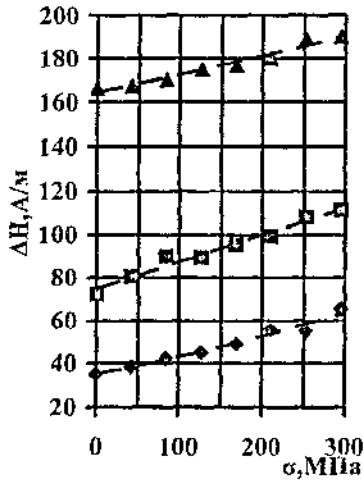


Рис.2. Зависимость изменения напряжённости магнитного поля рассеяния  $\Delta H$  намагниченного участка полого цилиндра из стали 09Г2С от напряжения растяжения при вариации внутреннего давления  $\Delta P$   
 ♦-5МПа, ■-12,5МПа, ▲-25МПа.

Из рис. 2 следует, что изменение убыли напряжённости поля  $\Delta H$  практически линейно связано с величиной существующих продольных напряжений в металле полого цилиндра. Эффект тем больше, чем больше вариация давления.

На действующем трубопроводе предложенный метод реализуется следующим образом: на выбранном для обследования участке трубопровода (газопровод или нефтепровод) с определённым интервалом делаются отверстия в грунте проколом до верхней образующей трубы. Через эти отверстия к поверхности трубы доставляется намагничивающее устройство, а затем датчик магнитометра, помещённый в немагнитный корпус, имеющий форму прокола. Измеряется начальное значение напряжённости магнитного поля в локально намагниченном участке. Далее производится уменьшение и возврат в исходное состояние давления в трубопроводе. После этого измерения повторяются во всех точках. Определяют изменение напряжённости магнитного поля рассеяния в каждой точке. Используя градуировочные



зависимости, оценивают величину продольных механических напряжений в каждой выбранной точке трубопровода. Достоинствами метода являются: возможность определения действующих в металле подземного трубопровода продольных напряжений без вскрытия грунта, без нарушения изоляционного покрытия, в любое время года и при любом виде закрывающего трубопровод грунта.

**В четвёртом разделе** решена практическая задача обнаружения участков подземного ГП с повышенным уровнем механических напряжений и определения сезонных изменений механических напряжений магистрального газопровода магнитоупругим методом. Для этого были проведены измерения магнитного поля рассеяния на поверхности эксплуатируемого газопровода «Уренгой-Сургут-Челябинск». Было обследовано шесть участков общей протяжённостью ~2000м, расположенных до компрессорной станции КС-11 и на выходе из неё. Измерения магнитного поля ГП проводились трёхкомпонентным магнитометром МЦ- 3.003 с интервалом в 10м контактным способом без вскрытия грунта над трубой, без нарушений изоляционного покрытия и без остановки его работы. Газопровод был собран из стальных труб марки X 70.

Весь цикл полевых измерений магнитного поля ГП состоял из трёх этапов: первый - в марте (температура воздуха ~ -30<sup>0</sup>), второй этап – в августе - сентябре, третий этап - через один месяц для оценки достоверности результатов измерений.

На рис. 3 и 4 представлены результаты измерений нормальной  $H_z$  и тангенциальной  $H_t$  составляющих вектора напряжённости магнитного поля ГП на участке №1, удалённом от КС-11 на расстоянии 7км, где были проведены измерения в 42 точках на 500м газопровода.

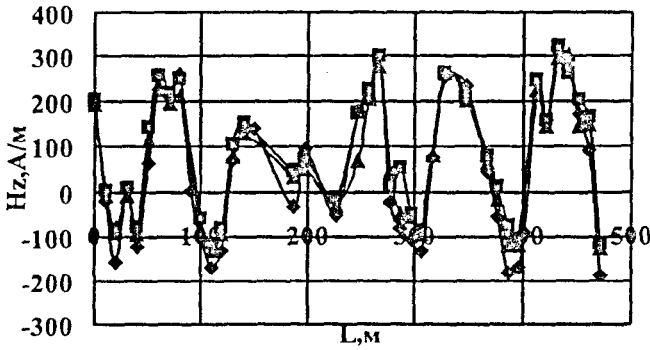


Рис. 3. Распределение нормальной составляющей вектора напряжённости магнитного поля ГП  $H_z$  вдоль его оси (участок №1, после КС-11)

◆-измерения, проведённые 15.03.03, ■-22.07.03, ▲-16.09.03.

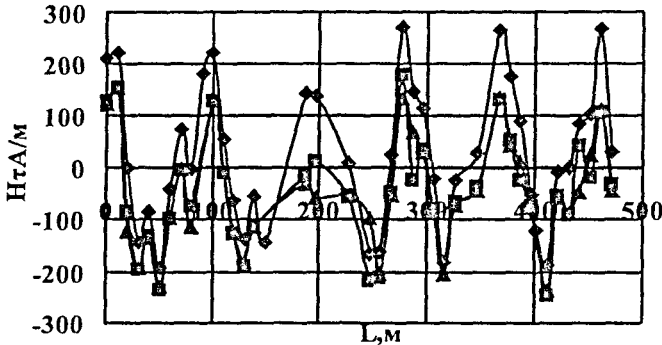


Рис. 4. Распределение тангенциальной составляющей магнитного поля ГП  $H_t$  вдоль его оси (участок №1, после КС-11)

◆-измерения проведённые 15.03.03, ■-22.07.03, ▲-16.09.03

В распределениях магнитных полей газопровода было обнаружено несколько областей, где наблюдается явно выраженное отличие результатов летних и зимних измерений. Например, на участке №1 эти области находятся на расстоянии 190м, 250м, 290м и 390м от начала отсчета (рис.3).

Впервые было установлено, что величины  $H_z$  и  $H_t$  изменяются периодически не только по величине, но и по направлению земного поля. Причём по фазе зависимость  $H_t(L)$  смещена относительно  $H_z(L)$  примерно на 30м. Предполагалось, что такое распределение магнитного поля ГП мо-

жет быть вызвано пропусканьем внутритрубного магнитного дефектоскопа. Однако, при намагничивании трубы ( $L=15000\text{мм}$ ,  $D=38\text{мм}$ , сталь 20) изнутри, и последующем измерении тангенциальной составляющей её магнитного поля, каких-либо аномалий выявлено не было.

В распределении магнитного поля не заглублённого в грунт протяжённого прямолинейного участка ( $L \sim 150\text{м}$ ) теплотрассы диаметром  $D \sim 1200\text{мм}$  на выходе из ТЭЦ-2 г.Тюмени периодичности выявлено не было.

Для объяснения наблюдаемой периодичности в распределении магнитного поля ГП был создан его лабораторный образец из трубы длиной  $L=13\text{м}$  и диаметром  $D=27\text{мм}$ . В его середине путём изгиба в горизонтальной плоскости создавалась арка длиной 2м (рис.5а) и измерялись вдоль верхней образующей нормальная  $H_z$  и тангенциальная  $H_t$  составляющие вектора напряжённости её магнитного поля рассеяния.

Как видно из рис.5б изогнутая труба имеет периодичное распределение обеих составляющих поля со сдвигом друг относительно друга примерно на четверть периода.

Показано, что причиной сезонного изменения магнитного поля ГП является его деформация, обусловленная нормативными нагрузками, обусловленными - внутренним давлением, температурным перепадом, и упругим изгибом. Предложено использовать установленные закономерности распределения магнитных полей ГП для определения участков аркообразования подземного трубопровода и оценивать величину действующих в них напряжений с точностью до 20%.

Для оценки напряжённо-деформированного состояния ГП и его сезонного изменения была проведена градуировка значений нормальной составляющей  $H_z$  напряжённости магнитного поля рассеяния ГП и её сезонного изменения на полом цилиндра, изготовленном из стали 09Г2С, близкой по свойствам стали X 70.

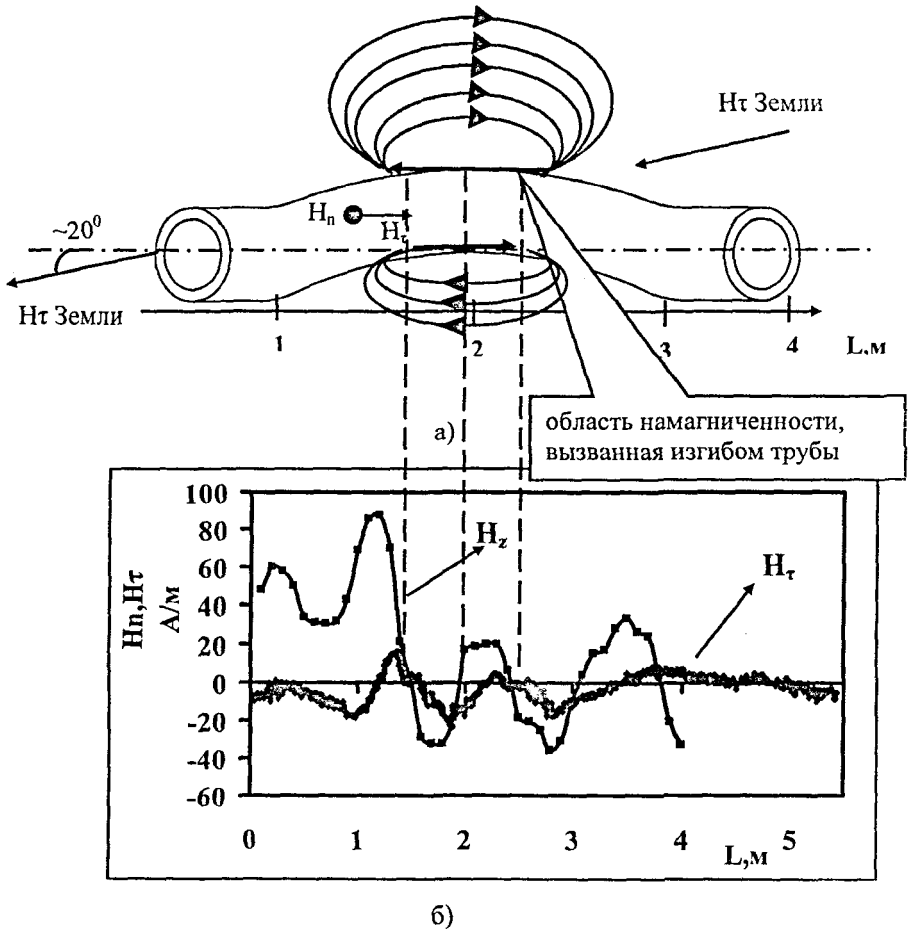


Рис. 5. Горизонтальная арка трубы (а) и распределение нормальной  $H_z$  (■) и тангенциальной  $H_\tau$  (◆) составляющих магнитного поля рассеяния вдоль её верхней образующей в магнитном поле Земли (б).

В табл. 1 приведены координаты расположения участков газопровода, где были выявлены максимальные продольные напряжения газопровода и их сезонное изменение, оценённые по градуировочной кривой.

Максимальные продольные напряжения ГП «Уренгой – Сургут-Челябинск»  
и их сезонные изменения, полученные в результате градуировки

| Номер участка | Координата точки, м | Величина магнитного поля ГП с учетом поля Земли, А/м | Сезонное изменение поля ГП, А/м | Продольные напряжения ГП, σ, МПа | Сезонное изменение продольных напряжений Δσ, МПа |
|---------------|---------------------|--|---------------------------------|----------------------------------|--|
| 1             | 387                 | 145  | 110                             | 150                              | 112  |
| 2             | 10                  | 140  | 85                              | 143                              | 87   |
| 3             | 370                 | 360  | 35                              | 367                              | 36   |
| 4             | 130                 | 280  | 110                             | 286                              | 112  |
| 5             | 80                  | 165  | 60                              | 168                              | 61   |
| 6             | 324                 | 180  | 65                              | 184                              | 66   |

Согласно СНиП 2.05.06-85, СНиП 2.04.12-86 для прямолинейных и упругоизогнутых участков трубопроводов при отсутствии продольных и поперечных перемещений трубопровода, просадок и пучения грунта максимальные суммарные продольные напряжения  $\sigma_{np}^H$  от нормативных нагрузок и воздействий – внутреннего давления, температурного перепада  $\Delta t$  и упругого изгиба радиусом  $\rho$ , определяются по формуле:

$$\sigma_{np}^H = \mu \sigma_{ки}^H \pm \alpha E \Delta t \pm \frac{E D_n}{2 \rho}, \quad (1)$$

где  $\mu$ -коэффициент Пуассона;  $\sigma_{ки}^H$ -кольцевые напряжения от нормативного давления, МПа;  $\alpha$ -коэффициент линейного расширения металла трубы, град<sup>-1</sup>; E-параметр упругости, МПа;  $D_n$ -наружный диаметр трубы, м.

Расчёт, проведенный для обследованных участков ГП вблизи КС показал, что величина  $\sigma_{np}^H$  составляет порядка 215МПа. Как видно из табл. 1 значения продольных напряжений, оценённых по градуировочной кривой на большинстве обследованных участков близки рассчитанному  $\sigma_{np}^H$ .

Исследована возможность дистанционного контроля напряжений подземного трубопровода магнитным методом, без вскрытия грунта.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

- 1) Установлены на модели трубопровода зависимости магнитоупругого размагничивания от величины продольной нагрузки, при ее вариации и вариации давления. На этой основе разработаны методы определения продольных напряжений трубопровода.
- 2) Впервые разработан метод измерения продольных напряжений подземного трубопровода по величине монотонного изменения магнитного поля локальной намагниченности вследствие дозированного уменьшения и последующего восстановления внутреннего давления газа или нефтепродуктов в трубопроводе.
- 3) Разработан пассивный метод определения напряжений трубопровода по величине магнитного поля рассеяния. Показано, что максимальные напряжения ГП вблизи КС достигают 200МПа, что близко к суммарным продольным напряжениям подземного ГП от нормативных нагрузок и воздействий, рассчитанных по СНиП 2.05.06-85, СНиП 2.04.12-86.
- 4) Предложена и испытана методика определения деформированных участков подземного трубопровода, протяженность арок и величины механических напряжений в них. Средняя протяжённость выявленных вблизи КС-11 ГП «Уренгой-Сургут-Челябинск» арок составила ~200м, максимальные напряжения в них составляют 150÷200МПа
- 5) Определены сезонные изменения напряжённно-деформированного состояния ГП вблизи КС, величина которых достигает порядка 200МПа.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Кулак С.М. Магнитоупругая память при сложном нагружении. / Новиков В.Ф., Дягилев В.Ф., Болотов А.А. // Разрушение и мониторинг свойств металлов: материалы международной конференции - Екатеринбург: УрОРАН, 2003.-С.55-56.
2. Кулак С.М. Определение механических напряжений в трубопроводах с помощью магнитоупругой памяти металла. Влияние давления.

Новиков В.Ф., Дягилев В.Ф. // Электроэнергетика и применение передовых современных технологий в нефтегазовой промышленности: материалы областной научно-практической конференции, посвящённой памяти профессора ТюмГНГУ Гришина В.Г.-Тюмень: ТюмГНГУ, 2003.-С.47- 50.

3. Кулак С.М. О возможности использования магнитных полей рассеяния магистрального газопровода для выявления сезонной динамики механических напряжений. / Бахарев М.С., Мосягин М.Н., Иванов И.А., Новиков В.Ф. // Нефть и газ - Тюмень: ТюмГНГУ, 2004. - №4. - С.53-59.

4. Пат. №2274840 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> G 01 L 1/12. Способ определения механических напряжений в конструкциях из ферромагнитных материалов / Бахарев М. С., Новиков В.Ф., Дягилев В. Ф., Кулак С.М.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Тюменский государственный нефтегазовый университет.-№2004132739/28; заявл. 10.11.2004; опубл. 20.04.2006, Бюл.№11.

5. Кулак С.М. Использование магнитоупругой памяти для контроля осевых напряжений стального трубопровода путём вариации внутреннего давления. /Новиков В.Ф., Бахарев М.С., Дягилев В.Ф. //Неразрушающий контроль и диагностика: материалы XVII Российской научно-технической конференции - Екатеринбург: ИМАШ УрОРАН, 2005. - С.287.

6. Кулак С.М. Магнитный метод контроля осевых напряжений стального трубопровода путём вариации внутреннего давления. /Важенин Ю.И., Новиков В.Ф., Бахарев М.С. //Новые материалы, неразрушающий контроль и наукоёмкие технологии в машиностроении: материалы III международной научно-технической конференции - Тюмень: Феликс, 2005. - С.281-283.

7. Кулак С.М. Исследование магнитоупругой памяти ферромагнетика при несимметричных изменениях механических напряжений. / Важенин Ю.И., Новиков В.Ф., Бахарев М.С. // Новые материалы, неразрушающий контроль и наукоёмкие технологии в машиностроении: материалы III

международной научно-технической конференции - Тюмень: Феликс, 2005. - С.284-285.

8. Кулак С.М. Определение сезонных деформаций газопровода по изменению его магнитного поля рассеяния. / Новиков В.Ф., Фёдоров Б.В. // Магнитные явления: сб.статей под ред. проф. Г.В.Ломаева. - Ижевск: Ассоциация «Научная книга», 2005.- Вып.2. - С.169-173.

9. Кулак С.М. Применение магнитоупругой памяти для контроля механических напряжений в металлоконструкциях. / Новиков В.Ф., Дягилев В.Ф. // Магнитные явления: сб.статей под ред. проф. Г.В.Ломаева. - Ижевск: Ассоциация «Научная книга», 2005. - Вып.2. - С.174-179.

10. Кулак С.М. Диагностика мест повышенной разрушаемости трубопровода / Новиков В.Ф., Важенин Ю.И., Бахарев М.С. - М.:ООО «Недра-Бизнесцентр», 2006.-200с.

11. Кулак С.М. Применение магнитоупругой памяти металла для измерения механических напряжений. / Важенин Ю.И., Новиков В.Ф., Бахарев М.С. // Датчики и системы - Москва: ООО «СенСиДат», 2006. - №8. - С.47-49.

12. Кулак С.М. О природе квазипериодичности распределения магнитного поля вдоль магистрального газопровода (ГП). / Новиков В.Ф., Нерадовский Д.Ф. // Сб. научных трудов сотрудников и преподавателей Технологического института. Вып.1-Тюмень: Издательство «Вектор Бук», 2006. – С.31-34.

Подписано к печати 29.09.04  
 Заказ № 142  
 Формат 60 × 84 1/16  
 Отпечатано на RISO GR 3750

Бум. писч. №1  
 Уч. – изд. л. 15  
 Усл. печ. л. 15  
 Тираж 100 экз.

**Издательство «Нефтегазовый университет»**

Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования

«Тюменский государственный нефтегазовый университет»

Отдел оперативной полиграфии издательства «Нефтегазовый университет»

625039, Тюмень, ул.Киевская, 52