

На правах рукописи



УДК 622 .692.4 : 537.624.8

**БЕРДНИК МАРИЯ МИХАЙЛОВНА**

**РАЗВИТИЕ МЕТОДА ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННО-  
ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НЕФТЕГАЗОПРОВОДОВ  
ПО КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЕ МЕТАЛЛА**

Специальность 25.00.19 –Строительство и эксплуатация  
нефтегазопроводов, баз и хранилищ

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Ухта – 2010

Диссертация выполнена на кафедре «Проектирование и эксплуатация магистральных газонефтепроводов» Ухтинского государственного технического университета

Научный руководитель: кандидат технических наук  
Юрий Викторович Александров

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор  
Владимир Орович Некучаев

кандидат технических наук  
Игорь Николаевич Бирилло

Ведущая организация: ОАО «Северные магистральные нефтепроводы»


Защита состоится 28 октября 2010 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.291.02 в Ухтинском государственном техническом университете по адресу: 169300, г. Ухта, Республика Коми, ул. Первомайская, 13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке УГТУ.

Автореферат размещен на интернет-сайте Ухтинского государственного технического университета [www.ugtu.net](http://www.ugtu.net) в разделе «Диссертационный совет».

Автореферат разослан 25 сентября 2010 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук, профессор



Н.М. Уляшева

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Россия обладает одной из самых развитых сетей промышленных и магистральных трубопроводов для транспортирования нефти и газа. Независимо от типа прокладки трубопроводов, их металл в процессе эксплуатации испытывает воздействие значительных механических нагрузок и коррозионно-активной среды. В ряде случаев эти факторы приводят к аварийным разрушениям трубопроводов.

Под действием напряженного состояния металл изменяет свои функциональные свойства, в частности, прочностные, вязкопластические, а также трещиностойкость. Кроме этого напряженное состояние является доминирующим фактором развития коррозионного растрескивания под напряжением (КРН), которое является причиной более половины всех разрушений магистральных трубопроводов большого диаметра.

Расследование причин аварий на трубопроводах показывает, что в ряде случаев воздействие нагрузок приводит к образованию трещин и разрушению металла без следов коррозионного воздействия.

Таким образом, целостность нефтегазопроводов в значительной степени зависит от своевременного выявления мест с повышенными напряжениями и последующего проведения ремонтных мероприятий. На практике задачу оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) решают расчетными методами, однако их достоверность невысока т.к. обычно неизвестно начальное положение трубопровода, а существующие физические методы определения напряжений, в полной мере не адаптированы для оценки напряженного состояния трубопроводов.

Поэтому разработка методики оценки напряжений в нефтегазопроводах на основе физических методов неразрушающего контроля, позволяющей локализовать напряженные участки и оперативно проводить мероприятия по их реконструкции, является весьма актуальной научно-практической задачей.

Работа базируется на результатах научных работ многих ученых и исследователей, среди которых: Р.В. Агинеи, И.Н. Андронов, В.К. Бабич, М.П. Берштейн, Г.В. Бида, Ф. Вицена, А.И. Гардин, Э.С. Горкунов, Ю.И. Драгошанский, А.А. Дубов, О.М. Иванцов, А.А. Ильюшин, В.В. Ключев, А.С. Кузьбожев, А.Н. Кузнецов, Н.С. Кузнецов, В.Г. Кулеев, М.Н. Михеев, В.Ф. Мужижский, В.Ф. Новиков, А.П. Ничипурук, Б.Е. Попов, В.П. Табачник, А.Т. Туманов, В.В. Харионовский, М.Н. Щербинин и др.

**Цель работы.** Развитие метода оценки напряженно-деформированного состояния нефтегазопроводов по коэрцитивной силе металла.

### **Задачи исследования:**

1. Проанализировать состояние средств и методов оценки напряженно-деформированного состояния нефтегазопроводов.
2. Определить критерии оценки параметров напряженно-деформированного состояния трубопроводов, обусловленного внутренним давлением среды и крутящим моментом, по коэрцитивной силе металла на основе результатов лабораторных испытаний полых цилиндрических образцов.
3. Разработать методику оценки напряженного состояния действующих трубопроводов по коэрцитивной силе металла.
4. Разработать алгоритм, реализующий методику оценки параметров НДС трубопроводов.
5. Оценить экономическую эффективность разработанных технических решений.

### **Научная новизна:**

- В упругой области нагружения трубчатых образцов экспериментально определено, что при измерении коэрцитивной силы ( $H_c$ ) в направлении деформирования величина  $H_c$  возрастает при отрицательной относительной деформации и убывает при положительной.
- Доказан единый характер зависимости коэрцитивной силы, измеренной в направлении деформирования, от величины деформации трубчатых образцов стали 17Г1С, независящий от вида их нагружения.
- Установлен порог растягивающих напряжений, составляющий для стали 17Г1С порядка  $0,5\sigma_{0,2}$ , выше которого оценивать напряжения не целесообразно, т.к. дальнейшее изменение коэрцитивной силы сравнимо с погрешностью измерений.
- Экспериментально установлена зависимость разности показаний коэрцитиметра, полученных при намагничивании во взаимно противоположных направлениях, от величины касательных напряжений. С ростом касательных напряжений разность коэрцитивной силы, полученной при намагничивании вдоль оси трубопровода во взаимно противоположных направлениях, увеличивается.
- Теоретически обосновано и опытно апробировано выражение для определения максимальной величины относительной деформации материала в точке контроля, также получена система уравнений, связывающая значения коэрцитивной силы и деформаций в четырех точках одного сечения трубопровода, решение которой позволяет рассчитать значение коэрцитивной силы ненагруженного металла и оценить параметры НДС конструкции.

### **Основные защищаемые положения:**

- методика проведения и результаты лабораторных испытаний полых цилиндрических образцов в условиях плосконапряженного состояния, создаваемого внутренним давлением и крутящим моментом.
- критерии и алгоритм оценки напряженного состояния действующих нефтегазопроводов по результатам измерения коэрцитивной силы в точках контрольных сечений трубопровода.
- результаты интерпретации данных магнитометрического контроля на трубопроводах компрессорных станций ООО «Газпром трансгаз Ухта».

**Практическая значимость.** Разработан промышленный регламент и компьютерная программа, позволяющие с достаточной для инженерных расчетов точностью и с минимальными временными затратами оценить напряженное состояние действующих газонефтепроводов по результатам измерения коэрцитивной силы. Результаты работы опробованы при оценке НДС технологических трубопроводов компрессорных станций ООО «Газпром трансгаз Ухта». Ожидаемый экономический эффект от внедрения составит более 19 млн. руб. за период реализации проекта (2009-2015гг.)

**Апробация работы.** Основные результаты исследований докладывались и обсуждались на Научно-технических конференциях молодежи ОАО «Северные магистральные нефтепроводы» (г. Ухта, ОАО «Северные МН», 2007, 2008, 2009), Международных молодежных научных конференциях «Севергеоэкотех-2008, 2009, 2010» (УГТУ, Ухта, 2008-2010 гг.), Конференциях сотрудников и преподавателей УГТУ (г. Ухта, УГТУ, 2008-2010 гг.), 14-ой Международной конференции «Транспорт и седиментация твердых частиц» (г. Санкт-Петербург, СПбГИ им. Плеханова, 2008), Научно-практических конференциях молодых специалистов и ученых филиала ООО «Газпром ВНИИГАЗ» в г. Ухта «Инновации в газовой отрасли – 2009, 2010» (г. Ухта, филиал ООО «Газпром ВНИИГАЗ», 2009, 2010), III Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы трубопроводного транспорта Западной Сибири» (г. Тюмень, ТГНГУ, 2009), V Международной учебно-научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт – 2009» (г. Уфа, УГНТУ, 2009).

**Публикации.** По теме диссертации опубликована 21 работа.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения. Содержит 174 страницы текста, 42 рисунка, 16 таблиц, список литературы из 125 наименований.

## Содержание работы

Во введении обоснованы актуальность и значимость выбранной темы, степень ее разработанности, охарактеризованы научно-методические пути ее решения.

В первой главе «Анализ состояния средств и методов оценки напряженно-деформированного состояния нефтегазопроводов» рассмотрены существующие методы контроля напряженного состояния конструкций. Показано, что применительно к оценке напряженного состояния трубопроводов наибольший интерес представляют неразрушающие методы, основанные на наведении и измерении характеристик физических полей. Широкое практическое применение на трубопроводах нашли магнитные методы, основанные на измерении коэрцитивной силы, остаточной намагниченности, шумов Баркгаузена, которые регламентированы рядом отраслевых стандартов.

Анализ трудов Агинеи Р.В., Андронova И.Н., Мужичко В.Ф., Новикова В.Ф. показал, что известные методики оценки НДС по магнитным параметрам металла основаны на зависимости коэрцитивной силы от величины действующих напряжений, полученной по результатам растяжения плоских образцов. Установлено, что при увеличении растягивающих напряжений величина коэрцитивной силы, измеренной в поперечном направлении, увеличивается на величину порядка 30%, в продольном – снижается на 10% до 100-150 МПа, далее практически не изменяется. При интерпретации результатов учитывается зависимость механических напряжений от разности коэрцитивной силы во взаимно перпендикулярных направлениях. Однако при этом сложно объяснить рост коэрцитивной силы при измерении в поперечном направлении плоского образца, подвергнутого одноосному растяжению, при отсутствии напряжений в этом направлении. Таким образом, можно сделать вывод, что методики, основанные на результатах испытаний плоских образцов при одноосном нагружении, являются недостаточно корректными.

Для исследования зависимости влияния напряженного состояния на величину коэрцитивной силы металла необходимо провести исследование на образцах, моделирующих фрагмент трубопровода, находящегося в плоском напряженном состоянии, когда растягивающие (сжимающие) напряжения действуют в двух направлениях. Кроме этого в сложноразветвленных трубопроводах, имеющих отводы, тройники, переходы «земля-воздух», а также на перемычках магистральных нефтегазопроводов, в металле могут возникать касательные напряжения, которые также не учитываются существующими методиками.

Это предопределяет необходимость развития метода оценки напряженного состояния нефтегазопроводов по коэрцитивной силе металла, что и является целью на-

стоящей работы.

Во второй главе «**Выбор точек контроля напряженного состояния газонефтепроводов**» показано, что использование магнитных методов на протяженных участках трубопровода невозможно, в связи с чем, существует задача определения сечений, характеризующихся повышенными напряжениями.

Решение такой задачи может быть реализовано с помощью известных программных пакетов, основанных на методе конечных элементов.

Анализ нагрузок и воздействий на трубопровод показал, что наиболее сложными в определении являются нагрузки, приводящие к возникновению изгиба оси трубопровода. В связи с этим в работе предлагается разделить все внешние воздействия на трубопровод на две группы: воздействия, не связанные с изменением проектного положения оси трубопровода (например, действие внутреннего давления) и совокупность других внешних сил, под воздействием которых ось трубопровода заняла текущее положение. Таким образом, можно исключить необходимость определения таких факторов, как параметры грунта, его неконтролируемые подвижки, или наличие упругих изгибов, вызванных отклонением оси трубопровода от проектного положения при нарушениях технологии укладки. В этом случае, подготовительная работа, необходимая для проведения оценочного расчета, будет сведена к получению подробного представления о геометрическом местоположении оси трубопровода в пространстве, что достижимо с помощью известных геодезических методов.

Величина механических напряжений при этом будет однозначно определяться известными перемещениями контрольных точек, величиной внутреннего давления и температурным воздействием. Решение такой задачи может быть получено при помощи российской программной системы «СТАРТ».

В этом случае погрешность результатов расчета определяется погрешностью в определении перемещений точек оси трубопровода и стержневой интерпретацией модели контролируемой трубопроводной конструкции. Однако для рассматриваемой задачи точности получаемого решения достаточно. Для более детального анализа параметров напряженно-деформированного состояния конструкции, выявленные участки назначаются к дальнейшему приборному контролю.

В третьей главе «**Испытание полых цилиндрических образцов в условиях плосконапряженного состояния**» описаны результаты испытания образцов, выполненных из трубной стали 17Г1С. Механические свойства стали (не менее):  $\sigma_B$  - 510 МПа,  $\sigma_{0,2}$  - 345 МПа,  $\delta$  - 23%. Размеры образца выбирались исходя из требований теории подобия.

В нашем случае основными параметрами модели являются радиус модели тру-

бюпровода  $R$  и толщина стенки  $h$ . Их коэффициенты подобия соответственно необходимо принимать равными:  $k_R = \frac{R_H}{R_M}$ ;  $k_h = \frac{h_H}{h_M}$ , где  $R_H, h_H$  – основные величины натурального объекта,  $R_M, h_M$  – соответствующие величины модели. Из условия геометрического подобия  $k_R = k_h = k$ .

Зная коэффициенты подобия основных величин, на основании физических законов можно получить коэффициенты для остальных величин. Так коэффициент подобия для момента сопротивления может быть определен из выражения:

$$k_{W_x} = \frac{W_{xH}}{W_{xM}} = \frac{\pi \cdot D_H^3 \left( 1 - \left( \frac{d_H}{D_H} \right)^4 \right) \cdot 32}{32 \cdot \pi \cdot D_M^3 \left( 1 - \left( \frac{d_M}{D_M} \right)^4 \right)} = k^3$$

Соответственно из условия, что напряжения от действия изгибающего момента в материале модели и натурального объекта должны быть одинаковы, можно записать:

$$\frac{\sigma_{изгH}}{\sigma_{изгM}} = \frac{M_{изгH} \cdot W_{xM}}{W_{xH} \cdot M_{изгM}} = \frac{1}{k^3} \cdot \frac{M_{изгH}}{M_{изгM}} = 1$$

Откуда можно выразить, что коэффициент подобия для изгибающего момента составляет  $k_{M_{изг}} = k^3$ .

В качестве натурального объекта выбрана труба  $\varnothing 1420 \times 14$  мм. Для модели коэффициент подобия основных величин принят  $k=10$ , таким образом, обоснована модель диаметром  $D=142$  мм и толщиной стенки  $h=1,4$  мм

**Первый этап испытания** - нагружение модели внутренним давлением с шагом 0,5 МПа до величины 5 МПа. На каждом шаге нагружения определялась коэрцитивная сила для четырех направлений: два значения  $Hc_1$  и  $Hc_3$  – для осевых направлений, и два значения  $Hc_2$  и  $Hc_4$  – для кольцевого направления. Средние значения определялись по формулам (1).

$$Hc_{\parallel} = \frac{Hc_1 + Hc_3}{2}; \quad Hc_{\perp} = \frac{Hc_2 + Hc_4}{2}. \quad (1)$$

Возможность использования в качестве величин коэрцитивной силы, измеренной вдоль оси трубопровода ( $Hc_{\parallel}$ ) и в направлении, поперечном осевому ( $Hc_{\perp}$ ), среднего арифметического значения двух измерений, сделанных вдоль одной оси, но во взаимно противоположных направлениях, обусловлена незначительной разницей этих двух показаний, лежащей в пределах допустимой погрешности измерений.



По результатам эксперимента были построены зависимости величины коэрцитивной силы от механических напряжений, возникающих в направлении намагничивания (рис. 1).

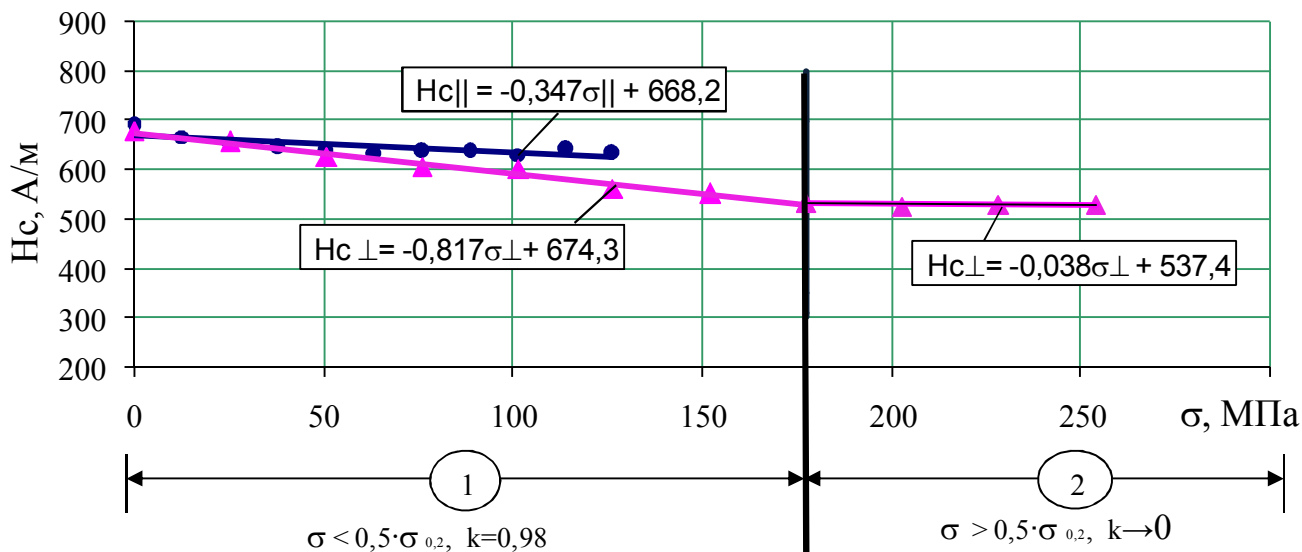


Рисунок 1. Изменение коэрцитивной силы металла модели трубопровода при увеличении напряжений, возникающих под действием внутреннего давления

Корреляционный анализ результатов показал, что для данной модели применение коэрцитиметрического метода при растягивающих нагрузках эффективно лишь для напряжений, величина которых не превышает 50% от предела текучести (участок 1). Коэрцитивная сила равномерно убывает с ростом напряжений вплоть до 175 МПа, коэффициент корреляции между значениями коэрцитивной силы и значениями напряжений на данном участке  $k=0,98$  (практически функциональная зависимость). Далее показания коэрцитиметра не реагируют на изменение напряжений. Коэффициент корреляции на участке 2 близок к нулю (рис. 1).

Совместный анализ полученных зависимостей и результатов, представленных в работе Р.В. Агинея, полученных при одноосном растяжении плоских образцов, позволил выдвинуть предположение, что коэрцитивная сила зависит от деформаций материала, которые для рассматриваемого случая в поперечном и продольном направлении могут быть найдены из соотношений (2)

$$\varepsilon_{кц} = \frac{pD}{2Eh} \left(1 - \frac{\mu}{2}\right); \quad \varepsilon_{np} = \frac{pD}{2Eh} \left(\frac{1}{2} - \mu\right), \quad (2)$$

где  $E$  – модуль упругости (принималось  $E = 2,1 \cdot 10^{11}$  Па);  $\mu$  – коэффициент Пуассона (принималось  $\mu = 0,3$ );  $p$  – величина внутреннего давления, Па;  $D$  – внешний диаметр модели трубопровода, м.

На рисунке 2 представлена зависимость величины коэрцитивной силы от деформаций, возникающих в направлении намагничивания.

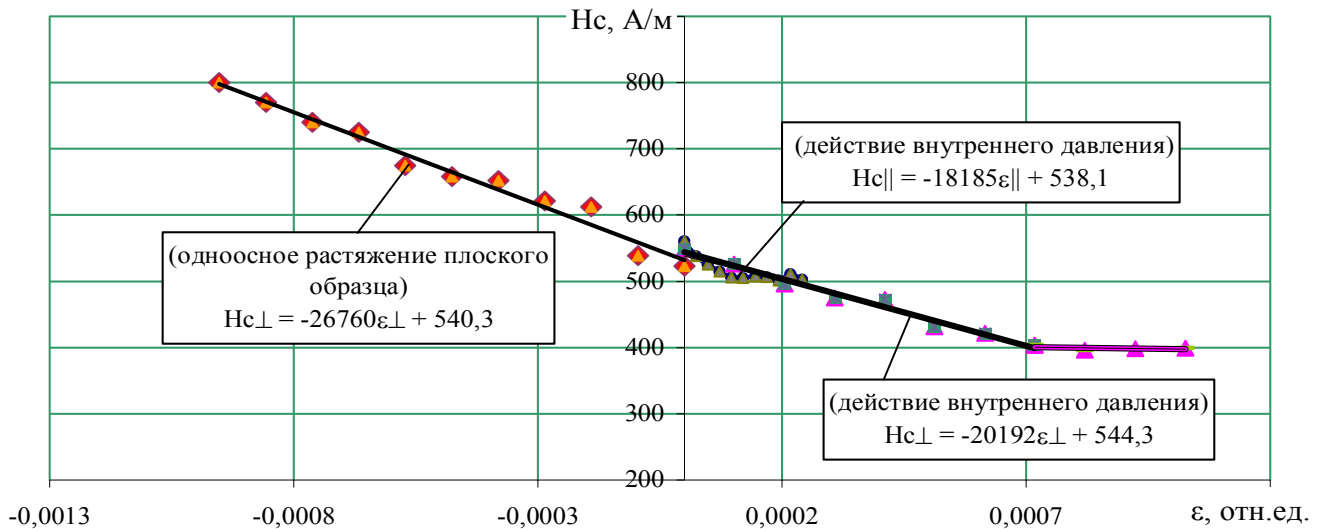


Рисунок 2. Зависимость величины коэрцитивной силы от деформаций, возникающих в материале в направлении намагничивания

Единство зависимости коэрцитивной силы от растягивающих деформаций доказывается совпадением кривых, полученных для осевых и кольцевых деформаций.

Зависимость для отрицательных значений деформаций построена по результатам эксперимента, заключающегося в одноосном растяжении плоского образца, выполненного из аналогичного материала. Величина сжимающих деформаций определялась исходя из условия, что в упругой стадии она пропорциональна значению продольных деформаций:

$$\varepsilon_{non} = \frac{\mu P}{EF}, \quad (3)$$

где  $P$  – растягивающая нагрузка, Н;  $F$  – площадь поперечного сечения исследуемых образцов (для рассматриваемого случая  $F=0,00025 \text{ м}^2$ ).

Полученная зависимость объясняет рост коэрцитивной силы в поперечном направлении плоского образца, подвергнутого одноосному растяжению, при отсутствии механических напряжений в этом направлении, полученный в работах Р.В. Агинеи, И.Н. Андропова, В.Ф. Мужижкого.

**Второй этап испытаний** – нагружение модели крутящим моментом для создания в металле модели касательных напряжений. Цилиндрический образец нагружался крутящим моментом при помощи рычага, длиной  $L_1 = 0,9 \text{ м}$ . Нагружение осуществлялось с шагом  $200 \text{ Н}$  до значения  $P=6 \text{ кН}$ .

Установлено, что при увеличении значений касательных напряжений появляется существенная разница в измерениях, произведенных во взаимно противоположных направлениях ( $\Delta H_{c||} = |H_{c1} - H_{c3}|$  и  $\Delta H_{c\perp} = |H_{c2} - H_{c4}|$ ).

Характер полученной зависимости представлен на рисунке 3. При этом из рисунка можно отметить, что при намагничивании вдоль оси исследуемой модели эта

зависимость носит более выраженный характер.

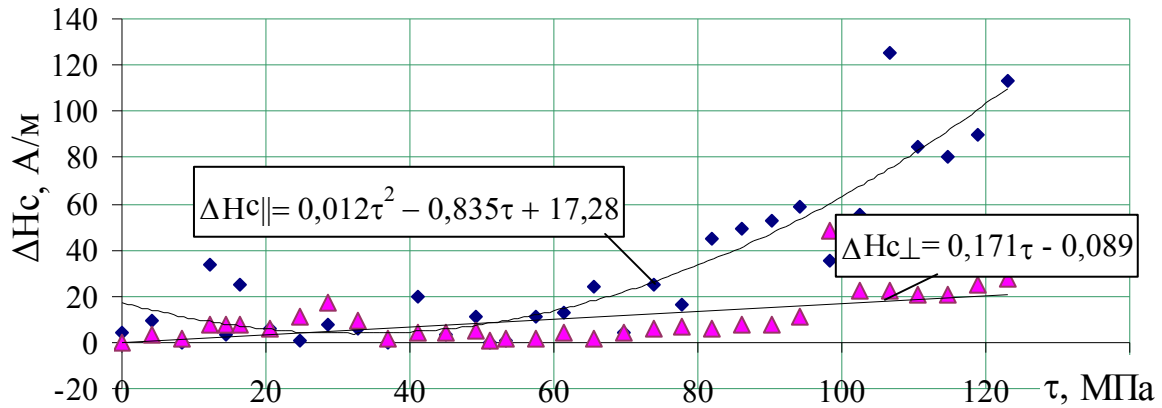


Рисунок 3. Зависимость разницы показаний коэрцитиметра, полученных при намагничивании во взаимно противоположных направлениях, от величины касательных напряжений

Для рассматриваемого случая нагружения в материале модели тонкостенной трубы имеет место однородный чистый сдвиг, который эквивалентен одновременному растяжению и сжатию по двум взаимно-перпендикулярным направлениям, при этом оси действия главных напряжений ориентированы под углом  $45^0$  относительно оси трубопровода, а величина главных напряжений по модулю равна значению касательных напряжений:

$$\sigma_1 = \tau; \quad \sigma_3 = -\tau, \quad (4)$$

где  $\tau$  - касательные напряжения,  $\tau = \frac{M_{кр}}{W_p}$ , МПа;  $M_{кр}$  - крутящий момент, вызванный действием силы  $P$  на рычаг длиной  $L_1$ ,  $M_{кр} = L_1 \cdot P$ , Н·м;  $W_p$  - полярный момент

сопротивления, для кольцевого сечения  $W_p = \frac{\pi D^3}{16} \left( 1 - \frac{d^4}{D^4} \right)$ , м<sup>3</sup>;  $D$  и  $d$  - соответственно

внешний и внутренний диаметр исследуемой модели трубопровода, м.

При этом величины главных деформаций связаны со значениями напряжений выражением  $\varepsilon_1 = -\varepsilon_3 = \tau(1 + \mu)/E$ .

Для установления зависимости коэрцитивной силы, измеренной в направлении действия главных деформаций, от величины этих деформаций на каждом шаге нагружения дополнительно производили четыре измерения коэрцитивной силы металла: два значения ( $H_c^{45+}$ ) в направлении действия деформаций  $\varepsilon_1$  и два значения ( $H_c^{45-}$ ) в направлении деформаций  $\varepsilon_3$ .

На рисунке 4 представлена обобщенная зависимость коэрцитивной силы от величины относительной деформации материала, возникающей в направлении намаг-

намагничивания для случая плоского напряженного состояния испытываемой модели трубопровода.

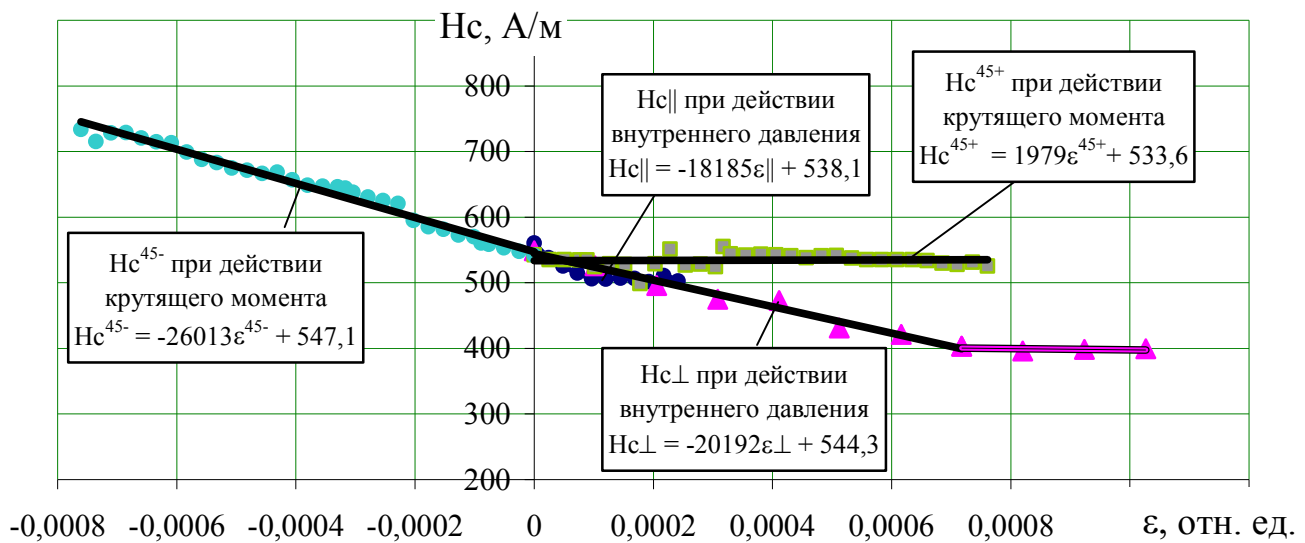


Рисунок 4. Зависимость коэрцитивной силы металла, полученной при намагничивании в направлении главных деформаций, от их величины для случая плоского НДС

Таким образом, в ходе проведенной работы подтверждено, что положительная деформация материала приводит к снижению коэрцитивной силы, измеренной в направлении этой деформации, в то время как отрицательные значения деформаций приводят к увеличению показаний коэрцитиметра.

Анализ полученных зависимостей позволил установить, что в случае отрицательной величины главных деформаций в направлении намагничивания, полученное значение коэрцитивной силы пропорционально величине этих деформаций. Для случая же положительных деформаций, коэрцитивная сила пропорциональна сумме наибольшей и наименьшей компонент главных деформаций. Таким образом, можно записать:

$$H_c^- = H_{c_0} - k\epsilon_3, \quad (5)$$

где  $H_c^-$  - величина коэрцитивной силы, измеренной в направлении минимальных деформаций, А/м;  $H_{c_0}$  - значение коэрцитивной силы на ненагруженном материале, то есть при нулевых значениях относительной деформации, А/м;  $k$  - коэффициент пропорциональности, определяемый по углу наклона полученных зависимостей, для рассмотренной модели трубопровода этот коэффициент с допустимой погрешностью можно принять равным  $k = 0,2 \cdot 10^5$  как для случая положительных, так и для отрицательных значений главных деформаций.

Для положительных деформаций, выражение для коэрцитивной силы будет иметь следующий вид:

$$Hc^+ = Hc_0 - k(\varepsilon_1 + \varepsilon_3), \quad (6)$$

где  $Hc^+$  - величина коэрцитивной силы, измеренной в направлении максимальных деформаций, А/м.

Записанные выражения верны для каждого из рассмотренных вариантов нагружения материала. Так, например, для случая чистого сдвига  $\varepsilon_1 = -\varepsilon_3$ , тогда значение коэрцитивной силы, измеренной в направлении  $\varepsilon_1$ , в соответствии с выражением (6) будет равно значению коэрцитивной силы на ненагруженном материале, что соответствует полученной зависимости, представленной на рисунке 4.

Таким образом, решая совместно уравнения (5) и (6) можно определить значения главных деформаций

$$\varepsilon_3 = \frac{Hc_0 - Hc^-}{k}; \quad (7)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{Hc_0 - Hc^+}{k} - \varepsilon_3 = \frac{Hc^- - Hc^+}{k}. \quad (8)$$

Из полученных выражений следует, что даже не зная характера напряженного состояния в контролируемом объекте, можно по двум значениям коэрцитивной силы, измеренной во взаимно перпендикулярных направлениях, соответствующих главным деформациям, определить величину максимальной компоненты ( $\varepsilon_1$ ), при этом не требуется значение величины коэрцитивной силы ненагруженного материала.

В четвертой главе «Методика оценки плосконапряженного состояния нефтегазопроводов на основе магнитного метода» показано, что оценку напряженного состояния действующих газонефтепроводов магнитным методом необходимо выполнять в четырех точках одного сечения (верхняя, нижняя и боковые образующие).

Внутреннее давление приводит к возникновению осевых и кольцевых напряжений, при этом их величина одинакова на всей поверхности трубопровода, соответственно, такой вид нагрузки в равной степени будет оказывать влияние на напряженно-деформированное состояние металла во всех четырех точках контрольного сечения, и соответственно приведет к одинаковому изменению коэрцитивной силы металла в этих точках, при условии намагничивания в направлении действия главных напряжений. Отсюда можно сделать вывод, что при условии равных значений  $Hc$  во всех контрольных точках сечения, трубопровод не испытывает дополнительных воздействий от внешних факторов и напряженное состояние материала поддается точному расчету.

Для случая наличия сдвиговых напряжений их величина также одинакова на

всей поверхности участка трубопровода. Однако при этом площадка главных напряжений будет ориентирована под углом  $45^{\circ}$  к оси трубопровода. Таким образом, в случае чистого сдвига коэрцитивная сила, измеренная в направлении  $45^{\circ}$  под углом к оси трубопровода также должна быть одинакова для всех четырех контрольных точек одного сечения.

При возникновении изгибных напряжений результаты контроля для точек одного сечения будут отличаться, но при этом величина напряжений, вызванных изгибом оси трубопровода, в двух противоположных точках (верхняя и нижняя образующие или две боковые) будет одинаковой по модулю и отличной по знаку.

Для учета всех возможных случаев нагружения трубопровода при определении его напряженно-деформированного состояния необходимо провести измерения  $H_c$  в восьми направлениях (рис. 5).

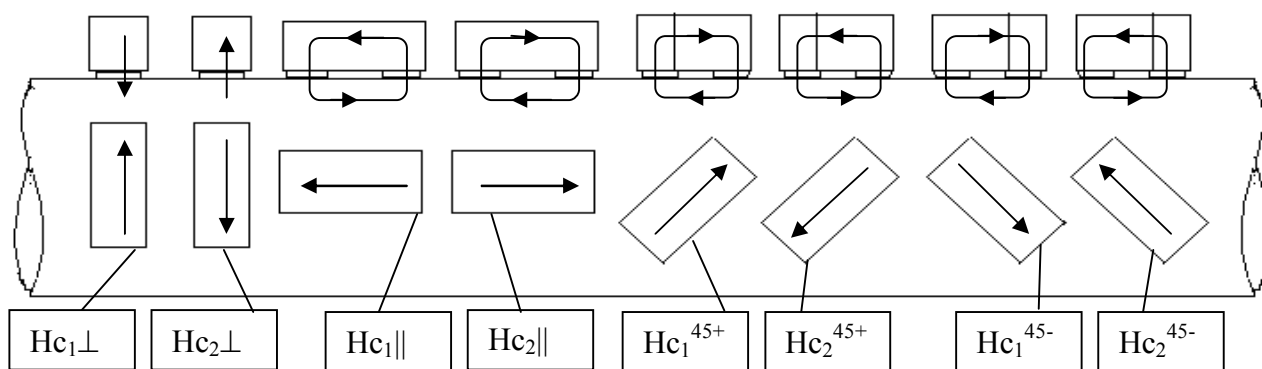


Рисунок 5. Схема измерений коэрцитивной силы на действующем трубопроводе (на рисунке представлено расположение датчиков для двух точек одного сечения)

Компоненты тензора деформаций и величину  $H_{c0}$  можно определить, рассматривая совокупность взаимосвязанных точек одного сечения. Такими точками являются точки, лежащие на противоположных образующих (часовая ориентация точек: 1-12ч, 3-6ч, 2-3ч, 4-9ч).

В результате изгиба в вертикальной плоскости деформации в осевом направлении точек 1 и 3 будут различны. Так для изгиба, вызванного собственным весом трубопровода эти деформации можно записать следующим образом:

$$\varepsilon_1 \parallel = \varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_{u3z\parallel}; \quad \varepsilon_3 \parallel = \varepsilon_{\parallel} + \varepsilon_{u3z\parallel}, \quad (9)$$

где  $\varepsilon_1 \parallel$  и  $\varepsilon_3 \parallel$  - общая продольная деформация соответствующих точек (1 и 3);  $\varepsilon_{\parallel}$  - составляющая продольной деформации, вызванная внутренним давлением, температурными воздействиями и прочими нагрузками, оказывающими одинаковое воздействие на все точки контроля;  $\varepsilon_{u3z\parallel}$  - деформации, вызванные изгибом оси трубопровода в вертикальной плоскости.

При этом если изгиб вызван пучением, то в точке 1 будет наблюдаться растя-

жение, то есть деформации будут суммироваться, а в точке 3 – сжатие, деформация изгиба, будет иметь отрицательное значение.

Аналогичные выражения можно записать для точек 2 и 4.

$$\varepsilon_2 \parallel = \varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_{u_{32}\perp}; \quad \varepsilon_4 \parallel = \varepsilon_{\parallel} + \varepsilon_{u_{32}\perp}, \quad (10)$$

где  $\varepsilon_2 \parallel$  и  $\varepsilon_4 \parallel$  - общая продольная деформация точек 2 и 4;  $\varepsilon_{u_{32}\perp}$  - деформации, вызванные изгибом оси трубопровода в горизонтальной плоскости.

С другой стороны деформации в этих точках можно записать через значения коэрцитивной силы, в соответствии с выражением (7):

$$\varepsilon_i \parallel = \frac{Hc_0 - Hc_i \parallel}{k}, \quad (11)$$

где  $\varepsilon_i \parallel$  - общая продольная деформация соответствующей точки (i);  $Hc_i \parallel$  - значение коэрцитивной силы материала, измеренной в точке i в осевом направлении, А/м.

Данное утверждение верно для случая, когда внутреннее давление является основным внешним воздействием и деформации в осевом направлении имеют величины значительно ниже, чем деформации, возникающие в направлении, перпендикулярном оси, то есть выражение (11) может быть применимо для всех трубопроводов, работающих в условиях высокого внутреннего давления.

Для всех четырех точек контроля, была записана система 4 уравнений с 4 неизвестными ( $Hc_0$ ,  $\varepsilon_{u_{32}\parallel}$ ,  $\varepsilon_{u_{32}\perp}$  и  $\varepsilon \parallel$ ):

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_{u_{32}\parallel} = \frac{Hc_0 - Hc_1 \parallel}{k} \\ \varepsilon_{\parallel} + \varepsilon_{u_{32}\parallel} = \frac{Hc_0 - Hc_3 \parallel}{k} \\ \varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_{u_{32}\perp} = \frac{Hc_0 - Hc_2 \parallel}{k} \\ \varepsilon_{\parallel} + \varepsilon_{u_{32}\perp} = \frac{Hc_0 - Hc_4 \parallel}{k} \end{array} \right. \quad (12)$$

Решение системы уравнений (12) относительно  $Hc_0$ , позволило произвести расчет максимальной и минимальной компоненты тензора главных деформаций.

Максимальная компонента, соответствующая деформациям в кольцевом направлении, в соответствии с выражением (8), может быть записана в следующем виде:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon \perp = \frac{Hc \parallel - Hc \perp}{k}. \quad (13)$$

При этом деформации в продольном направлении соответствуют второй компоненте тензора главных деформаций и определяются в соответствии с выражением (11),  $\varepsilon_2 = \varepsilon \parallel$ . Тогда  $\varepsilon_3$  - деформация, возникающая в направлении толщины стенки

трубопровода, которая численно равна продольной деформации, взятой с обратным знаком, то есть ее значение может быть вычислено по известным зависимостям.

Предлагаемая методика верна в предположении, что одна из главных осей ориентирована вдоль оси трубопровода. Смещение главных осей может быть вызвано наличием касательных напряжений. В этом случае, как было установлено экспериментально, значения коэрцитивной силы, полученные при продольном намагничивании в двух взаимно противоположных направлениях, должны существенно отличаться друг от друга.

Таким образом, при обработке результатов коэрцитиметрического контроля необходимо в первую очередь оценить разность значений коэрцитивной силы металла, полученных при намагничивании вдоль оси трубопровода ( $\Delta H_c \parallel$ ). В случае, если  $\Delta H_c \parallel < 25 \%$ , считают, что одна из главных осей ориентирована вдоль оси трубопровода, и главные напряжения могут быть вычислены в соответствии с выражениями (11) и (13). В противном случае предполагают, что в металле имеются существенные касательные напряжения, которые сместили положение главных осей, и главные деформации в точке контроля направлены под углом  $45^\circ$  к оси трубопровода. Тогда расчет главных деформаций следует производить по результатам коэрцитиметрии, выполненным под углом  $45^\circ$  к оси трубопровода.

$$\varepsilon_1 = \frac{H_c^{45^-} - H_c^{45^+}}{k}, \quad (14)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{H_{c0} - H_c^{45^-}}{k}. \quad (15)$$

При этом может быть принято, что  $\varepsilon_2 \approx 0$ .

По главным деформациям могут быть вычислены значения главных напряжений, которые определяются по выражениям, соответствующим обратной форме закона Гука:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{E\varepsilon_x}{1+\mu} + \frac{E \cdot \mu(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3)}{(1+\mu)(1-2\mu)}; \\ \sigma_2 &= \frac{E\varepsilon_2}{1+\mu} + \frac{E \cdot \mu(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3)}{(1+\mu)(1-2\mu)}; \\ \sigma_3 &= \frac{E\varepsilon_3}{1+\mu} + \frac{E \cdot \mu(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3)}{(1+\mu)(1-2\mu)}. \end{aligned} \quad (16)$$

Проверка прочности трубопровода осуществляется в соответствии с требованием IV (энергетической) теории прочности, согласно которой эквивалентные напряжения не должны превышать предельно допустимого значения.



Таким образом, разработанная методика позволяет оценить возможность дальнейшей эксплуатации контролируемого участка трубопровода.

На рисунке 6 представлен алгоритм реализации метода оценки НДС трубопроводов по результатам коэрцитиметрического контроля.

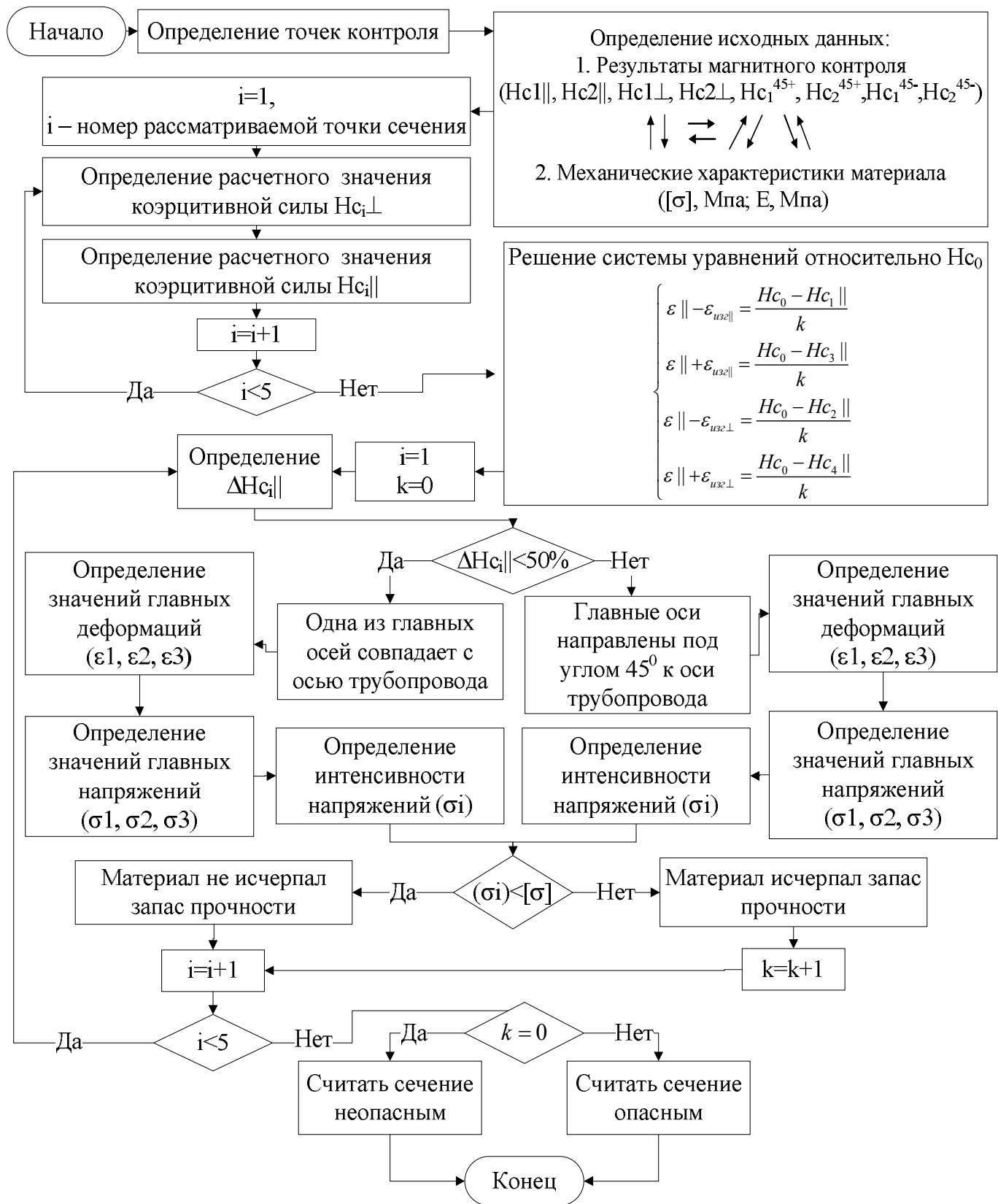


Рисунок 6. Алгоритм определения параметров напряженно-деформированного состояния трубопроводов по результатам магнитного контроля

Погрешность разработанной методики определения параметров НДС металла трубопроводов на малых значениях напряжений (в пределах  $0,5 \cdot \sigma_{0,2}$ ) составляет порядка 30%. С ростом величины механических напряжений погрешность определения параметров НДС снижается до 5-10% , что является достаточным при определении возможности дальнейшей эксплуатации контролируемого трубопровода.

Разработанный алгоритм был реализован в компьютерной программе, интерфейс которой позволяет вводить механические характеристики материала трубопровода, магнитные характеристики металла, также имеется возможность отобразить графическую схему проведения испытаний данного объекта (рис. 7). Все введенные величины, схема проведения контроля и результаты расчета автоматически прописываются в файле результатов.

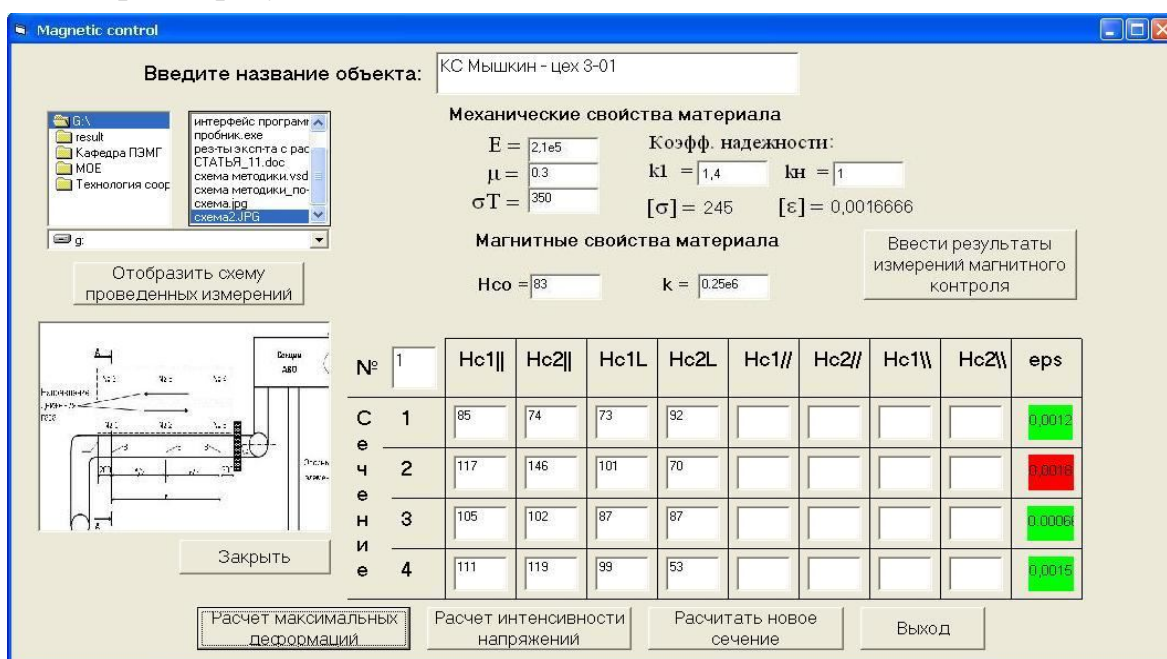


Рисунок 7. Интерфейс компьютерной программы для проведения анализа результатов магнитного контроля трубопроводов

**В пятой главе «Промышленное опробование метода на надземных технологических трубопроводах компрессорных станций и оценка экономического эффекта от внедрения»** при помощи разработанной методики и компьютерной программы был проведен анализ результатов магнитного контроля трубопроводных обвязок компрессорных станций ООО «Газпром трансгаз Ухта».

В ходе работ были обследованы трубопроводные обвязки аппаратов воздушного охлаждения (ТПО АВО) газа трех компрессорных станций (КС) Мышкинского (КС-18) и Шекснинского (КС-1 и КС-2) линейно-производственных управлений магистральными газопроводами.

Располагая информацией о значениях коэрцитивной силы ( $H_{c1 \perp}$ ,  $H_{c2 \perp}$ ,  $H_{c1 \parallel}$ ,  $H_{c2 \parallel}$ ) материала исследуемого элемента трубопроводной конструкции в за-

данной точке контроля, программа определяла величину максимальных деформаций ( $\varepsilon_1$ ). При этом согласно расчетам, для обеспечения необходимой эксплуатационной надежности надземной трубопроводной обвязки максимальные деформации в ее элементах не должны превышать  $[\varepsilon] = [R] / E = 128 / 2.1e5 = 0,00061$ , где  $[R]$  - максимальное расчетное сопротивление материала конструкции, МПа,  $E$  - модуль упругости, МПа.

Анализ результатов магнитного контроля, проведенного на компрессорных станциях ООО «Газпром трансгаз Ухта», показал, что в ряде случаев металл контролируемых объектов находится в опасном состоянии, при котором значения максимальных деформаций превышают допустимый уровень. На КС-18, таких участков обнаружено не было. Однако на ТПО АВО газа КС-1 и КС-2 обнаружены 4 точки, в которых наблюдается превышение максимальной деформации предельно допустимого уровня. Каждая из этих точек соответствует нижней образующей трубы, что свидетельствует о наличии продольного изгиба контролируемого элемента.

Максимальное значение зафиксированных деформаций соответствует механическим напряжениям 205 МПа, что ниже нормативного сопротивления растяжению для данной марки стали ( $R_2^t = 245 \text{ МПа}$ ). Однако, полученные результаты свидетельствует о том, что на конструкцию воздействуют непроектные нагрузки, в связи с чем материал может исчерпать запас прочности, поэтому для выявленных участков требуется назначить мероприятия по снижению механических напряжений. Для снижения напряжений, вызванных изгибом в вертикальной плоскости, такие мероприятия могут заключаться в установке дополнительных опор.

В работе проведена оценка инвестиционной привлекательности проекта внедрения разработанной методики на компрессорных станциях ООО «Газпром трансгаз Ухта» в период с 2009 по 2015 гг. Эффект достигается за счет снижения объема плановой реконструкции трубопроводов. Расчет показал, что чистый дисконтированный доход за время реализации проекта составит более 19 млн. руб., внутренняя норма прибыли - 138% при ставке дисконта 15%; срок окупаемости – на уровне одного года с момента начала проекта.

### **Основные выводы**

1. Анализ методов оценки напряженного состояния конструкций показывает необходимость дальнейшего развития физических методов неразрушающего контроля определения НДС, адаптированных для оценки напряженно-деформированного состояния стенок действующих нефтегазопроводов, включая учет касательных напряжений.

2. На образцах, моделирующих фрагмент трубопровода, получены зависимо-

сти коэрцитивной силы от главных деформаций, позволяющие по результатам неразрушающего контроля производить оценку параметров напряженно-деформированного состояния действующих трубопроводов.

3. Разработан критерий оценки величины касательных напряжений в металле трубопровода, по наличию разницы показаний коэрцитиметра, полученных при намагничивании вдоль оси трубопровода в двух взаимно противоположных направлениях.

4. Разработана методика применения магнитного метода на действующих нефтегазопроводах, позволяющая оценить НДС без знания начального значения коэрцитивной силы на ненагруженном металле. На основе алгоритма предлагаемой методики разработана программа для ЭВМ, предназначенная для расчета напряжений и деформаций по величине коэрцитивной силы в точках контрольных сечений.

5. Метод реализован на надземных трубопроводах компрессорных станций ООО «Газпром трансгаз Ухта». Установлены участки трубопроводов, характеризующиеся повышенным уровнем напряжений и требующие проведения плановых ремонтных мероприятий. Экономическая эффективность от внедрения методики в период с 2009 по 2015 гг. составит более 19 млн. руб.

#### **Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. Александров Ю.В., Соловей В.О., Свирида М.М. (Бердник М.М.), Кузьбожев А.С. Напряженно-деформированное состояние газопровода, приводящее к аварийному разрушению [Текст] / Науч.-техн. журн. Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе – 2009 - № 7 – С. 42 -45.

2. Александров Ю.В., Соловей В.О., Свирида М.М. (Бердник М.М.), Кузьбожев А.С. Задачи мониторинга напряженно - деформированного состояния газопровода на потенциально опасных по признакам КРН участках трассы [Текст] / Науч.-техн. журн. Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе – 2009 - № 7 – С. 46 – 51.

3. Свирида М.М. (Бердник М.М.), Попова М.В. Подходы к оптимальному проектированию балочных конструкций на основе алгоритма оптимальности и равнопрочности [Текст]: материалы III студенческой научно-учебной конференции «Моделирование явлений в технических и гуманитарных науках» (15 марта 2006г., г. Санкт-Петербург) / ответственный редактор Звягин П.Н. – СПб.: СПбГМТУ, 2006. – С. 73-76.

4. Родионов А.А., Миронов М.Ю., Свирида М.М. (Бердник М.М.), Попо-

ва М.В. Непрямые методы оптимизации в управлении свойствами конечно-элементных моделей [Текст]: Тезисы докладов XXII Международной конференции «Математическое моделирование в механике деформируемых тел и конструкций. Методы граничных и конечных элементов» / ответственный редактор В.П. Постнов. – СПб.: «НИЦ «Моринтех», 2007. – С.84-86.

5. Свирида М.М. (Бердник М.М.), Кожин М.И. Целесообразность 100% контроля сварных соединений конструкции РВС [Текст]: материалы VIII Научно-технической конференции молодежи ОАО «Северные МН» ( 20-22 нояб.2007 г., г. Ухта) / под. ред. О.В. Чепурного – Ухта: УГТУ, 2007.- С. 33-34.

6. Свирида М.М. (Бердник М.М.), Саванько Е.А., Комаров А.В. Методы оценки напряженно-деформированного состояния магистральных трубопроводов [Текст]: материалы Международной молодежной научной конференция «Севергеоэкотех-2008» (19-21 марта 2008г., г. Ухта) в 3 ч.; ч.2 – Ухта: УГТУ, 2008. – С. 210-214.

7. Свирида М.М. (Бердник М.М.) Проблемы оценки напряженного состояния газонефтепроводов [Текст]: Сборник научных трудов – материалы научно- технической конференции (15-16 апреля 2008 г., г. Ухта) в 2 ч.; ч.1/ под. ред. Н.Д. Цхадая – Ухта: УГТУ, 2007.- С. 316-319.

8. Svirida M.M. Application of magnetic method of monitoring for an estimation of deflected mode of pipelines [Текст]: сборник докладов 14-ой Международной конференции «Транспорт и седиментация твердых частиц» (23-27 июня 2008, г. Санкт - Петербург) / ответственный за выпуск Е.С. Дрибинская - Санкт-Петербург, СПбГГИ им. Плеханова, С.393-395.

9. Свирида М.М. (Бердник М.М.) Использование современных средств компьютерного моделирования для оценки напряженно-деформированного состояния протяженных участков газонефтепроводов [Текст]: материалы IX Научно-Технической конференции молодежи ОАО «Северные МН» (3-5 декабря 2008 г, г. Ухта.) / под. ред. А.В. Полякова – Ухта: УГТУ, 2008.- С. 18-19.

10. Свирида М.М. (Бердник М.М.) Разработка стенда для моделирования сложного напряженно-деформированного состояния [Текст]: материалы Международной молодежной научной конференции «Севергеоэкотех-2009» (18–20 марта 2009г., г. Ухта) в 4 ч.; ч.4 – Ухта: УГТУ, 2009. – С.194-197.

11. Свирида М.М. (Бердник М.М.), Соловей В.О. Модель напряженно-деформированного состояния газопроводов для условий изгиба в вертикальной плоскости, приводящая к коррозионному растрескиванию [Текст]: сборник научных

трудов – материалы научно- технической конференции (14-17 апреля 2009 г., г. Ухта) в 2 ч.; ч.1 / под. ред. Н.Д. Цхадая – Ухта: УГТУ, 2009.- С. 160-165.

12. Свирида М.М. (Бердник М.М.), Соловей В.О. Изменение напряженного состояния трубопровода в нестабильных грунтовых условиях [Текст]: сборник научных трудов – материалы научно- технической конференции (14-17 апреля 2009 г., г. Ухта) в 2 ч.; ч.1 / под. ред. Н.Д. Цхадая – Ухта: УГТУ, 2009.- С. 171-174.

13. Свирида М.М. (Бердник М.М.), Соловей В.О. Расчетная модель для оценки напряженного состояния трубопроводов вблизи углов поворота трассы [Текст]: сборник научных трудов – материалы научно- технической конференции (14-17 апреля 2009 г., г. Ухта) в 2 ч.; ч.1 / под. ред. Н.Д. Цхадая – Ухта: УГТУ, 2009.- С. 177-180.

14. Свирида М.М. (Бердник М.М.) Расчетное обоснование конструкции экспериментального стенда для моделирования сложного напряженного состояния трубопроводов [Текст] : тезисы докладов VI научно-практической конференции молодых специалистов и ученых ООО «Газпром ВНИИГАЗ» - «Севернипигаз» «Инновации в нефтяной отрасли – 2009» (29 июня – 04 июля 2009 г., г. Ухта) / отв. ред. В. Н. Данилов – Ухта: Филиал ООО «Газпром ВНИИГАЗ» - «Севернипигаз», 2009.- С. 51-53.

15. Свирида М.М. (Бердник М.М.) Оценка напряженного состояния подземных трубопроводов вблизи углов поворота трассы [Текст]: материалы 3-й международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы трубопроводного транспорта Западной Сибири» / под общей редакцией профессора, д.т.н. Земенкова Ю.Д. – Тюмень: «Экспресс», 2009.- С. 71-73.

16. Свирида М.М. (Бердник М.М.) Методы оценки остаточных напряжений в металле трубопровода [Текст]: материалы V Международной учебно-научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт – 2009» / под редакцией А.М. Шаммазова – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2009.- С. 132-134.

17. Свирида М.М. (Бердник М.М.) Необходимость проведения дополнительного приборного контроля напряженного состояния технологических трубопроводов компрессорных станций» [Текст]: материалы V Международной учебно-научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт – 2009» / под редакцией А.М. Шаммазова – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2009.- С. 134-136.

18. Свирида М.М. (Бердник М.М.), Прокопенко Е.С. Применение магнитных методов для контроля напряженного состояния трубопроводов [Текст]: материалы X Научно-Технической конференции молодежи ОАО «Северные МН» (25-27 ноября

2009 г., г. Ухта) / под. ред. О. И. Предеина – Ухта: ООО «Региональный дом печати», 2009.- С. 20–21.

19. Свирида М.М. (Бердник М.М.), Прокопенко Е.С. Исследование сложного напряженного состояния нефтегазопроводов [Текст]: материалы X Научно-Технической конференции молодежи ОАО «Северные МН» (25-27 ноября 2009 г., г. Ухта) / под. ред. О. И. Предеина – Ухта: ООО «Региональный дом печати», 2009.- С. 21–22.

20. Свирида М.М. (Бердник М.М.), Прокопенко Е.С. Методика расчета остаточных напряжений, возникающих в процессе изготовления труб [Текст]: материалы X Научно-Технической конференции молодежи ОАО «Северные МН» (25-27 ноября 2009 г., г. Ухта) / под. ред. О. И. Предеина – Ухта: ООО «Региональный дом печати», 2009.- С. 24–25.

21. Бердник М.М., Александров Ю.В., Агинец Р.В. Исследование влияния плоского напряженного состояния на изменение магнитных характеристик трубных сталей [Текст] / Науч.-техн. журн. Наука в нефтяной и газовой промышленности – 2010. – №3. – С. 2–6.