



УДК 620.179.16

**В. В. Большакова, Н. А. Кукин**

ЗАО «КТПИ „Газпроект“»

**Г. Я. Дымкин**

Петербургский государственный университет путей сообщения  
Императора Александра I

## **О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МАГНИТНЫХ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ**

Механические напряжения газопроводов являются основной причиной развития наиболее опасных дефектов типа коррозионного растрескивания. Повышение достоверности выявления таких дефектов может быть достигнуто путем разработки средств внутритрубной диагностики, обеспечивающих обнаружение зон аномальных механических напряжений. Рассмотрены магнитные методы неразрушающего контроля как способ оценки напряженно-деформированного состояния. Лабораторными модельными экспериментами исследованы зависимости магнитных характеристик трубной стали от механических напряжений при простых и комбинированных способах нагружения. Установлена возможность и целесообразность использования коэрцитивной силы в качестве измеряемой характеристики при оценке механических напряжений. Сформулированы задачи, решение которых необходимо для создания средства оценки механических напряжений при внутритрубной диагностике.

внутритрубная диагностика газопроводов, коррозионное растрескивание под напряжением, коэрцитивная сила, напряженно-деформированное состояние.

### **Введение**

В условиях выработки ресурса технологических трубопроводов основной прокладки (в 1970–1980-е годы) фиксируется значительный прирост аварий на компрессорных станциях, повлекших за собой не только значительные экономические потери от затрат на ликвидацию последствий, но и гибель обслуживающего персонала. С 2012 г. основной причиной аварийных разрушений послужили дефекты типа «коррозионное растрескивание под напряжением» (КРН) [1].

КРН, или стресс-коррозионный дефект, представляет собой микроскопические трещины на внешней поверхности трубопровода, характеризующиеся аномальным отношением длины и глубины [2], возникающие в результате длительного и одновременного воздействия на металл механических напряжений и коррозионно-агрессивных сред.

С 2004 г. для оценки технического состояния трубопроводных обвязок компрессорных станций газопроводов диаметрами от Ду700 до Ду1400 (толщина стенок 10–21 мм,

соответственно), компания ЗАО «КТПИ „Газ-проект“» применяет средство внутритрубной диагностики – телеуправляемый диагностический комплекс, который обеспечивает:

- внутритрубное обследование (обнаружение посторонних предметов, непредусмотренных технологических окон, термопар);
- визуально-измерительный контроль сварных соединений;
- ультразвуковой контроль основного металла трубы (в том числе толщинометрию фасонных изделий).

Одной из главных задач модернизации средств внутритрубной диагностики является повышение производительности автоматизированного контроля основного металла, которое может быть достигнуто, в частности, за счет реализации двухэтапной процедуры обследования: выявления зон с аномальными механическими напряжениями и последующего сплошного сканирования с целью выявления КРН только в указанных зонах. Изложенное обуславливает актуальность разработки неразрушающего экспресс-метода оценки напряженно-деформированного состояния газопровода в полевых условиях.

Выбор магнитных методов неразрушающего контроля для решения поставленной задачи обоснован их следующими преимуществами по сравнению с рентгеновскими и ультразвуковыми методами, также применяемыми для оценки механических напряжений [3]: портативность первичных преобразователей; отсутствие особых требований к подготовке поверхности; высокая скорость и простота автоматизации измерений. В то же время специально должны быть рассмотрены ограничения магнитных методов, обусловленные тем, что они позволяют оценивать только напряжения в поверхностном слое материала изделия. Невысокая точность данного вида измерений в данном случае не является критическим недостатком, так как для оценки эксплуатационной опасности состояния металла на участке важны не сами значения механических напряжений, а места их концентрации.

Для разработки того или иного метода косвенных измерений механических напряжений весьма важны характеристики исследуемого напряженно-деформированного состояния – диапазоны и соотношения значений компонент тензора упругих напряжений, а также их распределение в сечении объекта контроля. Обоснование метода контроля сводится к выбору измеряемой физической величины (или соотношения величин), а также к оценке погрешностей измерения и влияния на их величину свойств материала и состояния объекта контроля. В статье представлены соответствующие этапы и результаты исследований.

## 1 Оценка напряжений в стенке трубопровода

С учетом малых значений отношения толщины стенки к радиусу трубы ( $< 0,05$ ) при выполнении прочностных расчетов трубопроводов применима модель тонкостенной оболочки. Если оболочка имеет резкий переход и жесткие защемления и, кроме того, нагружена сосредоточенной силой и моментами, то в местах крепежа оболочки, резких изменений формы, действия сосредоточенных сил и моментов возникают напряжения, обусловленные изгибным эффектом.

Учет изгибных эффектов можно получить в рамках моментной теории оболочек [4]. Объектом исследования являлся тонкостенный цилиндр с приваренными к нему массивными фланцами, которые и являются причиной стесненности деформаций на краях цилиндра. Выполненный по [4] расчет значений напряжений в сечении стенки трубы (диаметр 1220 мм, внутреннее давление 7,4 МПа, толщина стенки 18 мм, сила растяжения 1000 кН) позволил оценить значения главных нормальных напряжений – меридиональных ( $\sigma_m^m \approx \pm 0,39$  МПа) и кольцевых ( $\sigma_m^k \approx \pm 0,12$  МПа) напряжений от внутренних моментов. Рассчитанные напряжения возникают на поверхности стенок оболочки, по-

середине которой проходит нейтральная ось, следовательно, максимальное различие напряжений на внешней и внутренней стенке трубы будет равно приблизительно 0,8 МПа, что свидетельствует об их однородности на поверхности и по толщине трубы. Столь незначительные напряжения, обусловленные конструкцией подключающих шлейфов компрессорных станций трубопроводов, не могут не только повлиять на прочность, но даже существенно отразиться на результатах измерений. Для оценки напряженно-деформированного состояния с целью выявления стресс-коррозионных дефектов необходимо определять значения механических напряжений в диапазоне, близком к значению предела упругости и ограниченном пределом текучести, т. е. порядка  $10^2$  МПа [5].

Таким образом, возможность применения магнитных методов неразрушающего контроля для оценки напряженно-деформированного

состояния трубопроводов при внутритрубной диагностике зависит лишь от наличия связи магнитных характеристик металла и механических напряжений трубы.

## 2 Экспериментальные исследования связи магнитных характеристик трубной стали с напряженно-деформированным состоянием трубы

Поскольку в реальных условиях эксплуатации газопроводы в подавляющем большинстве случаев испытывают действие комплексных нагрузок (растяжение или сжатие, нагрузки, вызванные внутритрубным давлением, температурные деформации, внешние нагрузки и т. п.) при экспериментальных исследованиях необходимо моделировать несколько видов нагружения и получать соответствующие зависимости магнитных характеристик от вели-

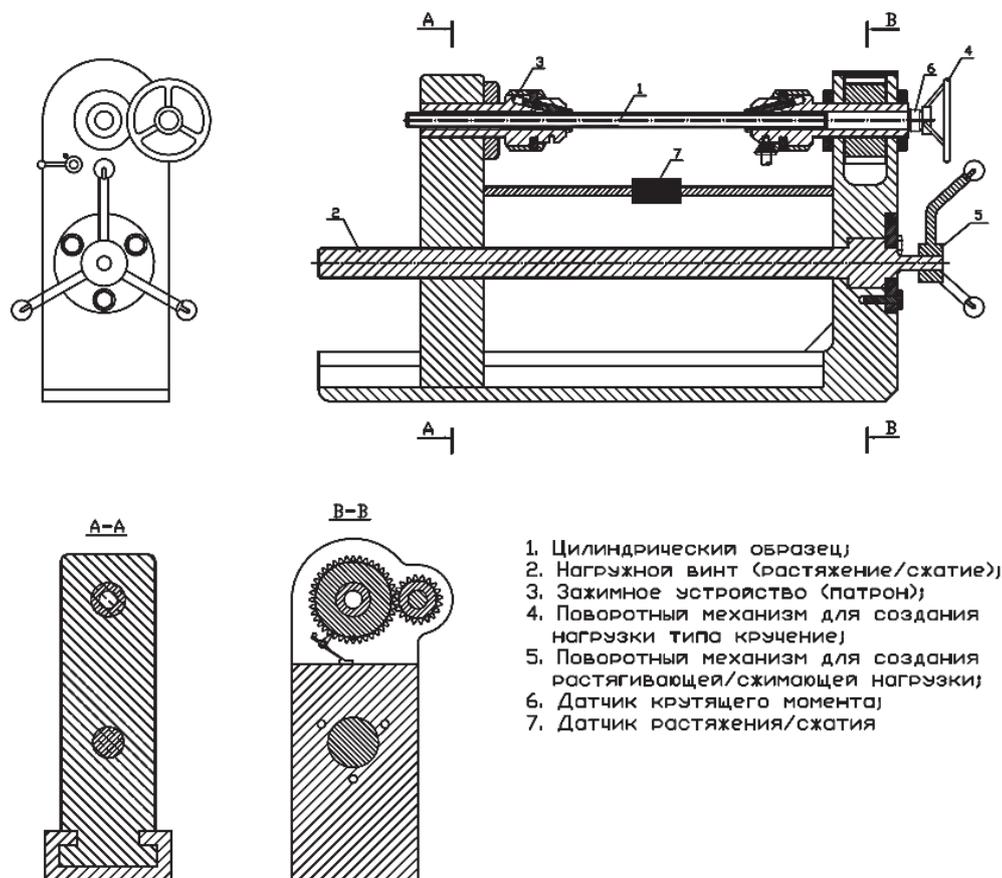


Рис. 1. Установка для механических испытаний

чины внутренних напряжений. Для реализации методики исследований, предложенной в [6], ЗАО «КТПИ „Газпроект“» была изготовлена установка, осуществляющая одноосное растяжение (сжатие) совместно с кручением (рис. 1). Напряженно-деформированное состояние образца в данном случае оценивали по величине нормальных (возникающим в результате растяжения/сжатия) и касательных (возникающим в результате кручения) напряжений.

При проведении исследования использовали полые цилиндрические образцы из трубной стали 09Г2С. Радиусы образца  $R_{\text{внеш}} = 5,5$  мм,  $R_{\text{внутр}} = 4,5$  мм; длина рабочей части 60 мм. Значения механических характеристик стали: условный предел текучести исследованной стали  $\sigma_{0,2} = 325$  МПа, временное сопротивление разрыву  $\sigma_B = 480$  МПа.

Нормальные напряжения  $\sigma$ , вызванные растяжением/сжатием вдоль оси образца, вычисляли по формуле [6]:

$$\sigma = F / S, \quad (1)$$

где  $F$  – нагрузка, приложенная к образцу;  $S$  – площадь поперечного сечения рабочей части образца в исходном состоянии. Изменением сечения образца при упругом деформировании растяжением или сжатием пренебрегали.

Напряжения  $\tau$ , вызванные кручением, на расстоянии  $r$  от оси цилиндра вычисляли по формуле [6]:

$$\tau = \frac{T \cdot r}{\frac{\pi}{2} (R_{\text{внеш}}^4 - R_{\text{внутр}}^4)}, \quad (2)$$

где  $T$  – текущее значение крутящего момента,  $R_{\text{внутр}} < r < R_{\text{внеш}}$ .

В ходе эксперимента реализованы простые виды нагружения (одноосное растяжение/сжатие, кручение) и комбинированное нагружение в упругой области. Значения нагрузок ограничивались таким образом, чтобы ни одно из главных напряжений не превысило предел текучести  $\sigma_{0,2}$ .

Магнитные измерения проводили в соответствии с ГОСТ 8.377 [7] в условиях приложения нагрузки по схеме пермеаметра (рис. 2). В процессе эксперимента получали начальную и предельную кривые намагниченности; при разных значениях нагружения измеряли коэрцитивную силу  $H_c$ , определяли значения остаточной магнитной индукции  $B_r$  и максимальной магнитной проницаемости  $\mu_{\text{max}}$ .

Полученные зависимости  $H_c$ ,  $B_r$  и  $\mu_{\text{max}}$  стали 09Г2С от внутренних напряжений в трубе при одноосном растяжении/сжатии, кручении и комбинированном нагружении представлены на рис. 3–5. Погрешности измерения составили: для  $H_c$  –  $\pm 2\%$ ;  $B_r$  –  $\pm 3\%$ ;  $\mu_{\text{max}}$  –  $\pm 10\%$ .

Анализ представленных результатов экспериментальных исследований показывает:

- зависимости коэрцитивной силы, остаточной индукции и максимальной магнитной проницаемости от механических напряжений при растяжении и кручении носят линейный характер в диапазоне значений механических напряжений, ограниченном пределом текучести стали 09Г2С;

- комплексное действие нормальных и касательных напряжений ослабляет их влияние на магнитные характеристики.

Необходимо заметить, что при контроле трубопроводов в реальных условиях оценить вклад нормальной и касательной составляющей напряжений в отдельности не удастся. В то же время при сложном напряженно-деформированном состоянии объекта значение, пропорциональное разности двух главных механических напряжений металла, может быть оценено по разности магнитных параметров петли гистерезиса в двух взаимно перпендикулярных направлениях [8]. Это значение учитывает вклад обеих составляющих, так как главные напряжения по определению являются экстремальными значениями нормальных напряжений в окрестности точки, где касательные напряжения равны нулю, а максимальные значения касательных напряжений в этом случае равны наибольшей полуразности главных напряжений [9].

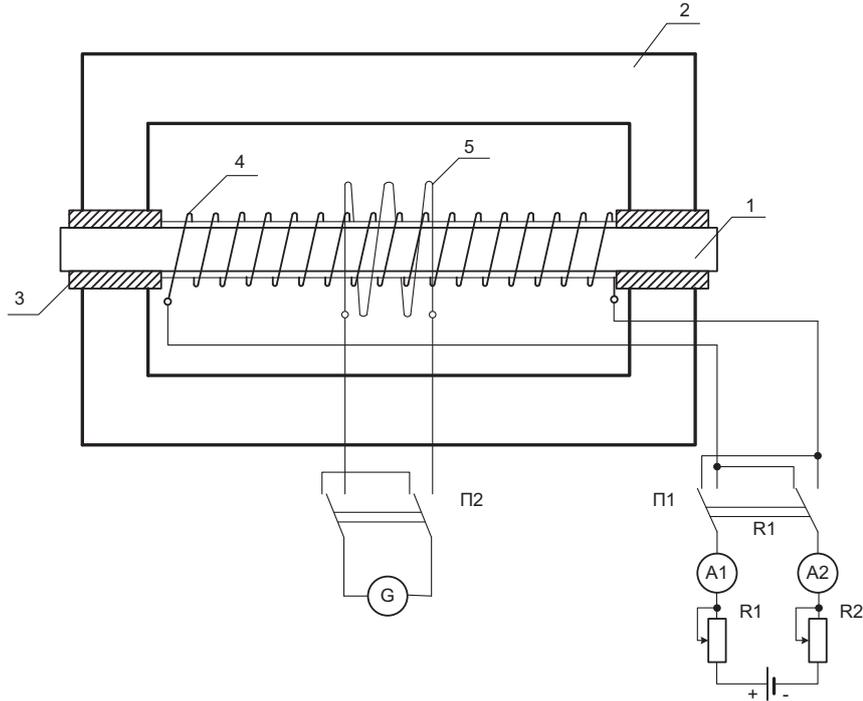


Рис. 2. Схема устройства и включения пермеметра для испытания стержневых образцов стали:  
 R1, R2 – регулировочные устройства; A1, A2 – амперметры; П1, П2 – двухполюсные переключатели; 1 – испытываемый образец; 2 – массивная рама; 3 – конические втулки;  
 4 – намагничивающая катушка; 5 – измерительная катушка

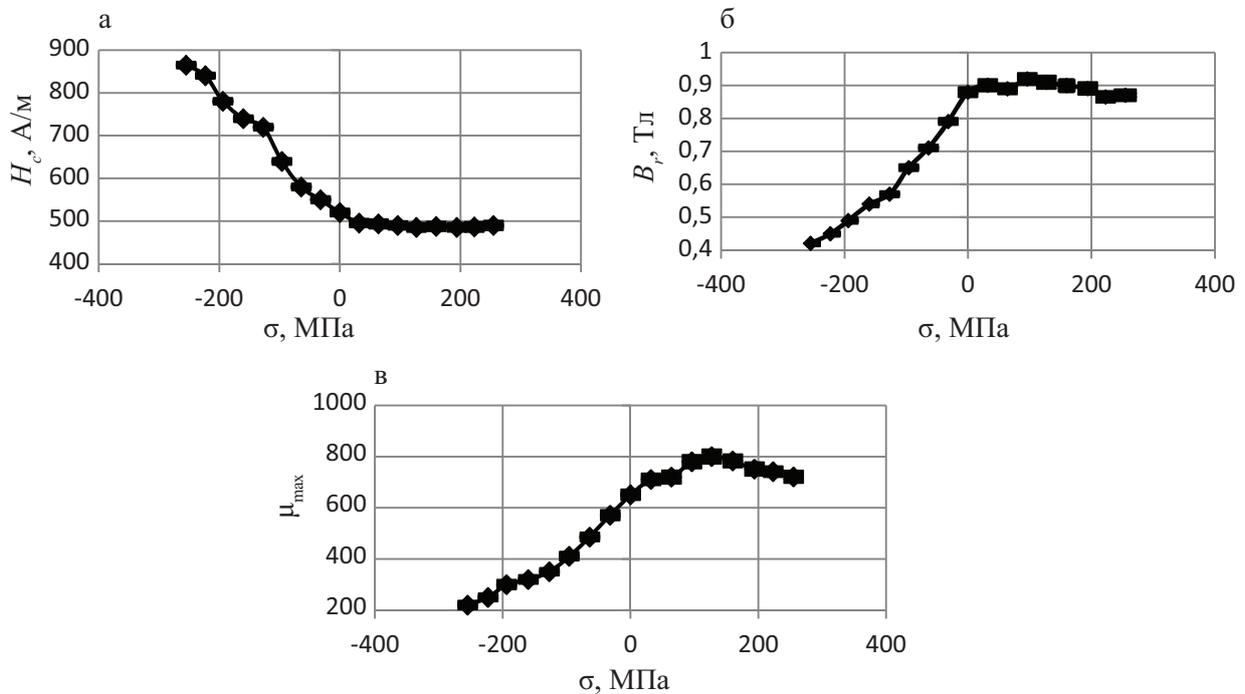


Рис. 3. Зависимость коэрцитивной силы  $H_c$  (а), остаточной индукции  $B_r$  (б), максимальной магнитной проницаемости  $\mu_{max}$  (в) стали 09Г2С от внутренних напряжений при одноосном растяжении/сжатии

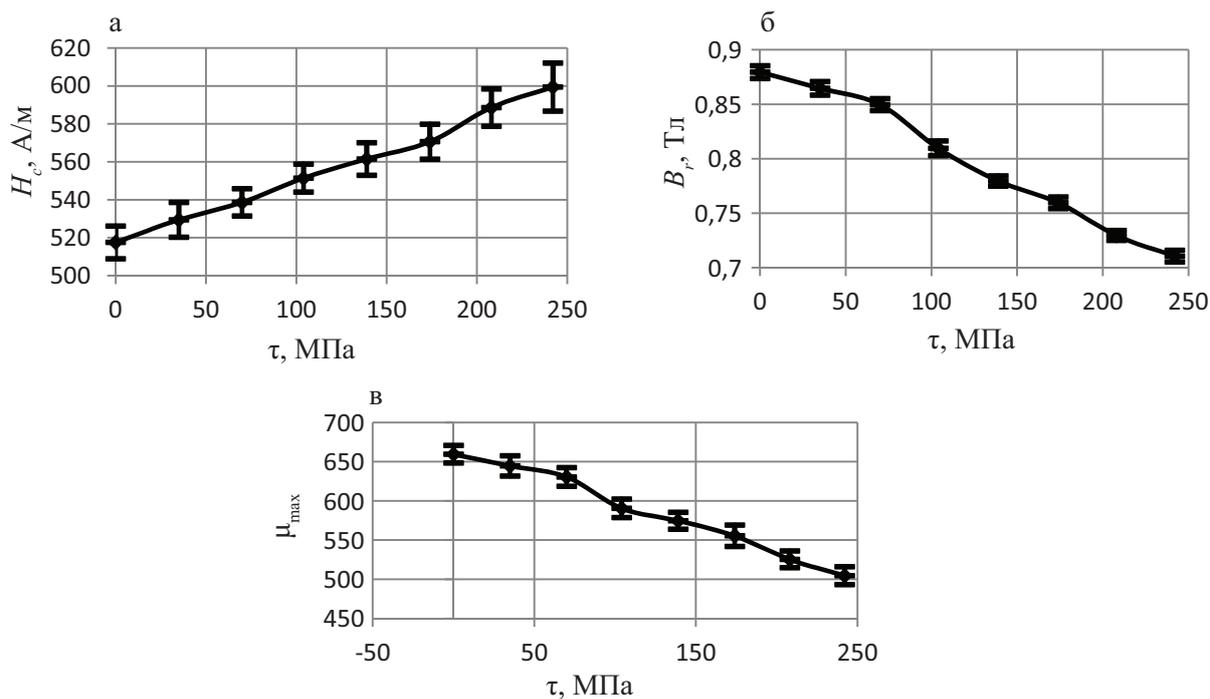


Рис. 4. Зависимости коэрцитивной силы  $H_c$  (а), остаточной индукции  $B_r$  (б), максимальной магнитной проницаемости  $\mu_{\max}$  (в) стали 09Г2С от внутренних напряжений при кручении

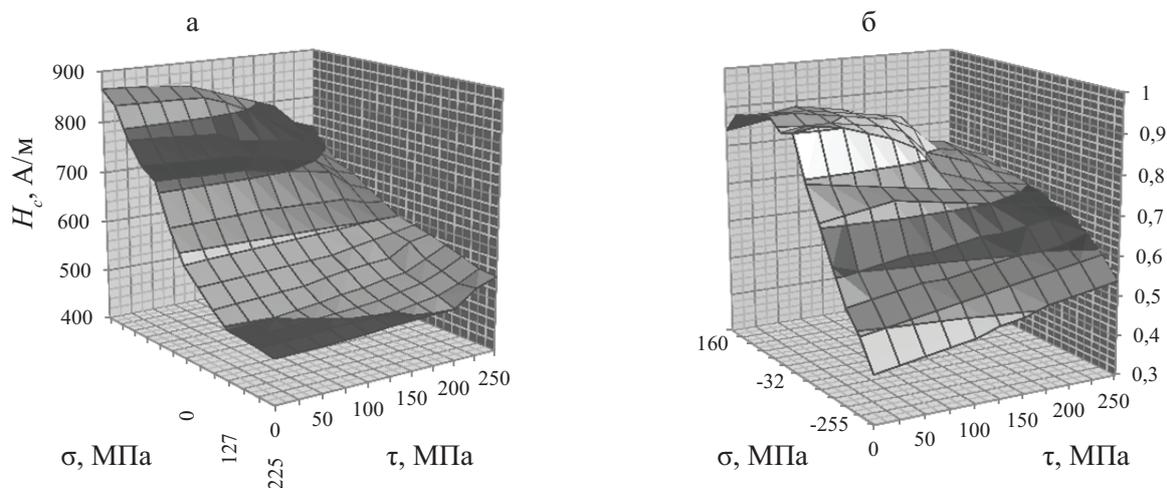


Рис. 5. Зависимости магнитных характеристик стали 09Г2С от механических напряжений при комбинированном нагружении: а) коэрцитивная сила; б) остаточная индукция

## Заключение

Лабораторными экспериментами показано, что магнитный метод неразрушающего контроля, основанный на измерении коэрцитивной силы, обеспечивает возможность

оценки напряженно-деформированного состояния трубопроводов. Погрешности предложенной методики и влияющие факторы должны быть дополнительно изучены в условиях внутритрубной диагностики.

При контроле напряженно-деформированного состояния газопроводов в реальных условиях магнитный метод оценки разности главных напряжений может быть использован для поиска и локализации зон повышенной концентрации механических напряжений.

Реализация метода в эксплуатационных условиях требует разработки намагничивающего устройства, обеспечивающего напряженность магнитного поля, достаточную для технического насыщения металла при размещении на расстоянии не менее 0,4 мм; обоснования шага сканирования по внутренней поверхности трубы, при котором точность оценки напряженно-деформированного состояния достаточна для определения зон концентрации механических напряжений.

### Библиографический список

1. **Организация** системы противостресс-коррозионной защиты технологических трубопроводов компрессорных станций / А. М. Ангалёв, Д. С. Бутусов, П. М. Созонов и др. // Газовая промышленность. – 2013. – Спецвып. – С. 56–60.
2. **Коррозионное** растрескивание высокопрочных сталей / Ф. Ф. Ажогин. – Москва : Metallurgia, 1970. – 100 с.
3. **Преимущества** метода акустоупругости неразрушающего контроля механических напряжений в деталях машин / Н. Е. Никитина, С. В. Казачек // Вестн. науч.-технич. развития. – 2010. – № 4. – С. 18–28.
4. **Статика** тонкостенных упругих оболочек / А. И. Лурье. – Москва : Гостехиздат, 1947. – 252 с.
5. **Оценка** возможности развития дефектов КРН на трубопроводах компрессорных станций / Ю. П. Сурков, В. Г. Рыбалко, Д. В. Новгородов и др. // Дефектоскопия. – 2010. – № 6. – С. 81–92.
6. **Влияние** упругой деформации растяжением (сжатием), кручением и гидростатическим давлением на магнитные характеристики трубной стали 09Г2С / Э. С. Горкунов, А. Н. Мушников, С. М. Задворкин, Е. И. Якушенко // Науч. изв. на НТСМ. – 2012. – № 1. – С. 12–15.
7. **ГОСТ 8.377–80** «Материалы магнитномягкие. Методика выполнения измерений при определении статических магнитных характеристик».
8. **Принципы** и практика диагностики напряженно-деформированного состояния конструкций, изделий и сварных соединений / В. Л. Венгринович // В мире неразрушающего контроля. – 2005. – № 1. – С. 4–9.
9. **Соппротивление** материалов / А. В. Дарков, Г. С. Шапиро. – Москва : Высш. шк., 1975. – 654 с.