

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ

© 2024 г. К.Е. Мызнов^{1,*}, О.Н. Василенко^{1,***}, В.Н. Костин^{1,***}, В.С. Тронза², А.Н. Бондина², С.С. Кукушкин², Н.Ю. Трякина², А.С. Саломатин²

¹Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Россия 620108 Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18

²ООО «Газпром трансгаз Екатеринбург», Россия 620075 Екатеринбург, ул. Клары Цеткин, 14
E-mail: *myznov@imp.uran.ru; **vasilenko@imp.uran.ru; ***kostin@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 05.11.2024; после доработки 06.11.2024

Принята к публикации 08.11.2024

Проведена серия измерений на двух участках трубопровода из стали 17Г1С с помощью двух измерительных приборов: магнитный мультитестер ММТ-3 и магнитный структуроскоп КРМ-Ц-К2М. Получены карты распределения коэрцитивной силы, остаточной магнитной индукции и максимальной магнитной индукции по трубам. рассчитан коэффициент нагруженности для разных поперечных сечений трубопровода. Построены графики зависимости усредненных по поперечному сечению магнитных характеристик от коэффициента нагруженности. Выявлено, что наиболее опасным для разрушения сечениям, в которых коэффициент нагруженности превысил критическое значение 1,2, соответствуют пониженные значения коэрцитивной силы и остаточной магнитной индукции, полученные при направлении измерения вдоль оси трубопровода. Показано, что измерение вдоль оси на верхней части трубопровода, т.е. на 12 ч, показывает аналогичную зависимость, как и для усредненных по сечению значений, а это означает, что в наземных переходах трубопровода может быть достаточным измерение только на 12 ч.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, труба, трубопровод, надземный переход, магнитный метод, неразрушающий контроль.

ASSESSMENT OF STRESS-STRAIN STATE OF PIPELINES BASED ON THE MEASUREMENTS OF MAGNETIC CHARACTERISTICS IN FIELD CONDITIONS

© 2024 К.Е. Мызнов^{1,*}, О.Н. Василенко^{1,***}, В.Н. Костин^{1,***}, В.С. Тронза², А.Н. Бондина², С.С. Кукушкин², Н.Ю. Трякина², А.С. Саломатин²

¹M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Russia 620108 Yekaterinburg, S. Kovalevskaya Street, 18

²LLC “Gazprom transgas Ekaterinburg”, Russia 620075 Yekaterinburg, Clara Zetkin Street, 14
E-mail: *myznov@imp.uran.ru; **vasilenko@imp.uran.ru; ***kostin@imp.uran.ru

A series of measurements on two pipeline sections made of 17G1S (17Г1С) steel using two measuring devices: magnetic multimeter MMT-3 and magnetic analyser of structure KRM-C-K2M (КРМ-Ц-К2М) has been carried out. Maps of coercive force, residual magnetic induction and maximum magnetic induction on the pipes were obtained. The coefficient of loading for different cross-sections of the pipeline was calculated. Dependence of magnetic characteristics averaged over the cross-section on the coefficient of loading is plotted. It is revealed that the most dangerous for destruction cross-sections, in which the coefficient of loading exceeded the critical value of 1,2, correspond to the reduced values of coercive force and residual magnetic induction, obtained in the direction of measurement along the pipeline axis. It is shown that measurement along the axis at the top of the pipeline shows a similar relationship as for the cross-sectional averaged values, which means that in pipeline aerial crossings, measurement only at the top of the pipeline may be sufficient.

Keywords: stress-strain state, pipe, pipeline, aerial crossing, magnetic method, nondestructive testing.

DOI: 10.31857/S0130308224120068

ВВЕДЕНИЕ

Магистральные трубопроводы в процессе работы испытывают нагрузки различного характера. К нагрузкам относятся: растягивающие, сжимающие, изгибающие, скручающие, сдвиговые и их комбинации [1, 2]. Источниками таких нагрузок являются: сила тяжести, действующая на трубопровод, реакция опор, давление грунта, внутреннее давление содержимого, смещение опор, внешние нагрузки на участках перехода [3—5]. Каждая из этих нагрузок влияет на магнитные свойства объекта контроля. Чтобы применять магнитную методы неразрушающего контроля для определения напряженно-деформированного состояния (НДС), нужно однозначно определить влияние нагрузок и их комбинаций на магнитные свойства. Существующие работы можно разделить на две группы: полевые испытания на трубопроводах и лабораторные иссле-

дования с использованием стационарных установок. Первые дают представление о наличии связей НДС и магнитных свойств, но в них, в основном, используются измерительные приборы, позволяющие определить только один параметр, например, коэрцитиметры [6—8]. Во вторых используются стандартные методики и стационарное оборудование, но они неприменимы на реальных объектах типа трубопроводов [9]. Вследствие этого отсутствуют широко распространенные методики определения напряженно-деформированного состояния по величинам магнитных свойств.

В качестве информативных параметров выбираются различные магнитные свойства: коэрцитивная сила (наиболее часто используемый параметр), остаточная магнитная индукция, максимальная дифференциальная магнитная проницаемость и другие. Также могут использоваться комбинации измеряемых параметров или одни и те же параметры, но измеренные в различных направлениях [10]. Для одноосной нагрузки анизотропия коэрцитивной силы (т.е. разность коэрцитивных сил в двух взаимно перпендикулярных направлениях) показывает монотонную и близкую к линейной зависимость от напряжений [10], поэтому часто применяется на практике [11, 12]. Существует метод контроля сжимающих напряжений по значениям напряженности магнитного поля, соответствующим пикам дифференциальной или обратимой магнитной проницаемости [13, 14].

Наиболее перспективными в контексте контроля массивных объектов выглядят исследования, в которых используются приставные измерительные преобразователи, позволяющие измерять сразу несколько магнитных параметров или всю петлю магнитного гистерезиса [15—19].

В связи с вышесказанным понятно, что остается актуальным вопрос разработки методики магнитного контроля напряженно-деформированного состояния трубопроводов и приборов, их реализующих в полевых условиях. Целью работы являлось установление потенциальной возможности использования магнитных параметров для контроля НДС участков трубопроводов путем проведения полевых исследований с использованием магнитного структуроскопа с приставным измерительным преобразователем.

ОБЪЕКТЫ КОНТРОЛЯ И МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ И РАСЧЕТОВ

Полевые исследования проводились на участках трубопровода двух труб (рис. 1 и 2), являющихся надземными переходами, с одинаковым номинальным диаметром и толщиной стенки (упрощенная схема этих труб с указанием номинальных размеров показана на рис. 3). Длины надземного перехода L для труб «А» и «Б» были равны 46,4 и 34,6 м соответственно. Материал трубопровода — конструкционная сталь 17Г1С [20].

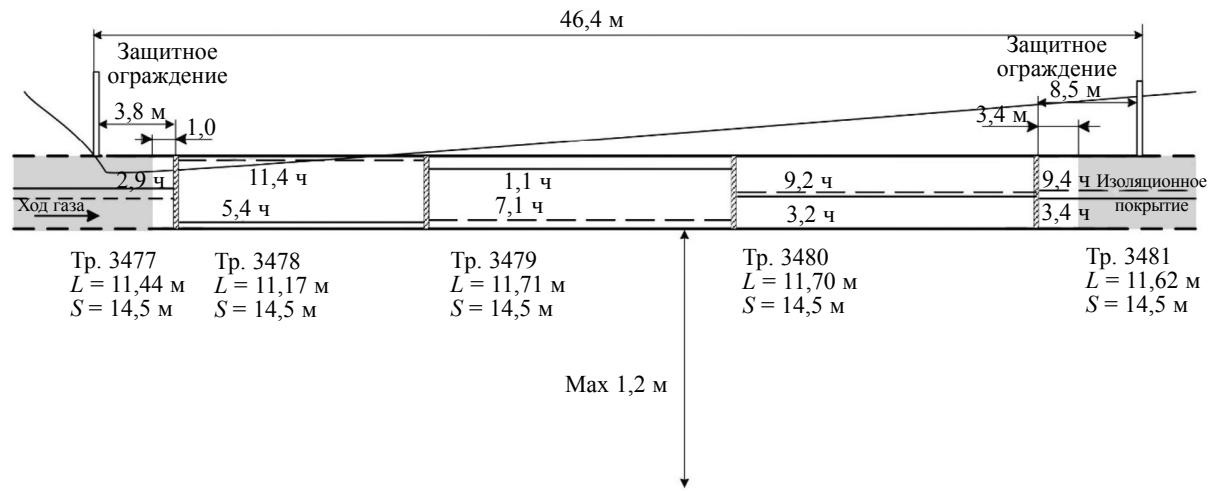


Рис. 1. Схема надземного перехода «А».

Измерения проводились с помощью магнитного мультитестера ММТ-3 [17] (рис. 4) и магнитного структуроскопа КРМ-Ц-К2М [8] (рис. 5). Структуроскоп КРМ-Ц-К2М измеряет коэрцитивную силу по току размагничивания H_c^{KRM} . ММТ-3 позволяет получать петлю магнитного гистерезиса и рассчитывать соответствующие магнитные характеристики: коэрцитивная сила по индукции H_c , остаточная магнитная индукция B_r , максимальная магнитная индукция B_m и другие. Контроль НДС только по коэрцитивной силе, определенной по току размагничивания,

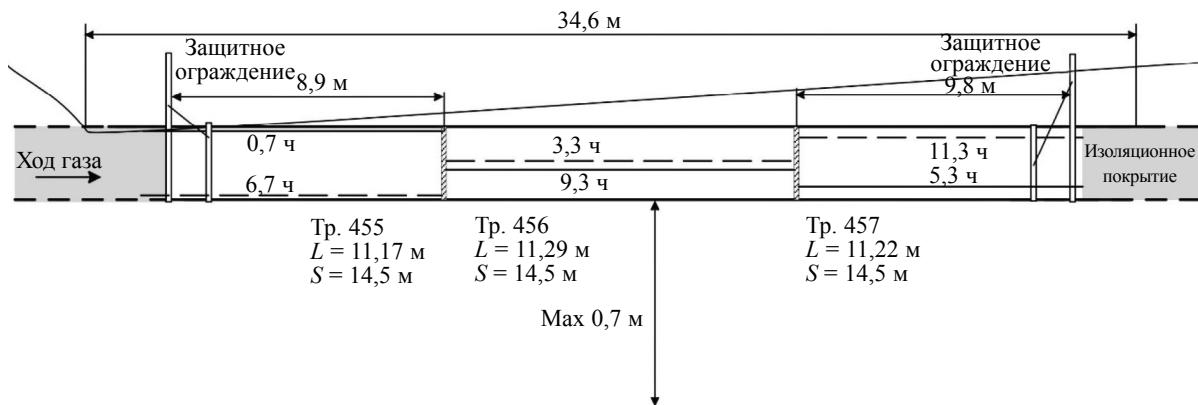


Рис. 2. Схема надземного перехода «Б».

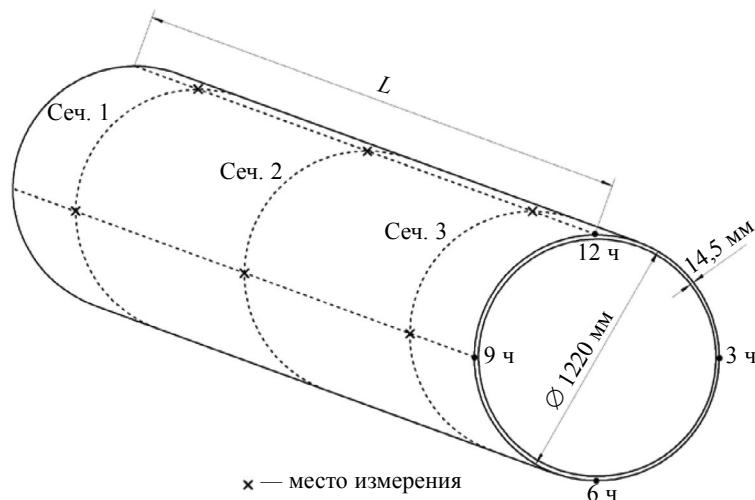


Рис. 3. Упрощенная схема трубы без указания сварных швов.



Рис. 4. Магнитный мультитестер ММТ-3.

приводит к неоднозначной оценке НДС низколегированных сталей [10], а также к влиянию на показания прибора формы и размеров изделия и других факторов [16, 21].

При измерении магнитных характеристик приставные преобразователи приборов (см. рис. 4, 5) помещались на внешнюю поверхность объекта контроля таким образом, чтобы перемагничивание и измерение происходило вдоль направления хода трубы (по оси) и по-перек хода трубы (по кольцу). Зоны контроля находились на пересечении трех поперечных сечений и четырех продольных сторон на 3, 6, 9 и 12 ч (см. рис. 3).



Рис. 5. Магнитный структуроскоп КРМ-Ц-К2М.

Методика и рекомендации по расчету напряженно-деформированного состояния в магистральном трубопроводе описаны в источниках [3—5]. Для определения уровня напряженно-деформированного состояния сечения обследуемого участка, согласно [3], используется коэффициент нагруженности K . Для определения коэффициента K необходимо найти коэффициенты нагруженности, соответствующие двум условиям: первому условию K_1 и второму условию K_2^+ , K_2^- . Из найденных для сечения значений K_1 , K_2^+ , K_2^- берется наибольшее.

Коэффициент нагруженности по первому условию K_1 вычисляется по одной из формул:

1) если осевые напряжения $\sigma_N \geq 0$:

$$K_1 = \frac{(\sigma_{\text{экв}})_N}{R_1}; \quad (1)$$

2) если осевые напряжения $\sigma_N < 0$:

$$K_1 = \frac{\sigma_{\text{экв},N}}{R_1}, \quad (2)$$

где R_1 — сопротивление растяжению (сжатию) по первому условию; $(\sigma_{\text{экв}})_N$ — эквивалентные напряжения по Мизесу, определяемые в соответствии с источником [3].

Оевые напряжения зависят от размеров, характеристик материала и условий эксплуатации трубы. Оевые напряжения определяются по формуле:

$$\sigma_N = -E\epsilon_T + \nu\sigma_h, \quad (3)$$

где E — модуль Юнга; ν — коэффициент Пуассона; ϵ_T — температурное расширение; σ_h — кольцевые напряжения.

Кольцевые напряжения определяются с помощью следующего выражения:

$$\sigma_h = \frac{p \cdot (D - 2t)}{2t}, \quad (4)$$

где p — внутреннее давление; D — внешний диаметр трубы; t — толщина стенки трубы.

Температурное расширение определяется с помощью следующей формулы:

$$\epsilon_T = \alpha_T \Delta T, \quad (5)$$

где ΔT — максимальный перепад температур, определяемый согласно источнику [5]; α_T — коэффициент температурного расширения (линейного расширения).

Эквивалентные осевые напряжения $\sigma_{\text{экв},N}$ определяются так:

$$\sigma_{\text{экв},N} = \sqrt{(n\sigma_N)^2 - n\sigma_h\sigma_N + \sigma_N^2}, \quad (6)$$

где n — коэффициент надежности по внутреннему давлению (коэффициент перегрузки), который, согласно [3], принимается равным 1,1.

Значение R_1 определяется с помощью выражения:

$$R_1 = \frac{m}{k_1 k_n} R_1^n, \quad (7)$$

где R_1^n — нормативный предел прочности материала трубы; m — коэффициент условий работы участка газопровода; k_1 — коэффициент надежности по материалу трубы; k_n — коэффициент надежности по назначению трубопровода. Коэффициенты m , k_1 и k_n берутся согласно источнику [4].

Для точек на сечении трубы с растягивающими и сжимающими напряжениями используется две разные формулы для определения коэффициента нагруженности по второму условию:

1) для точки с растягивающими напряжениями ($\sigma_f \geq 0$):

$$K_2^+ = \frac{\sigma_f}{R_2}; \quad (8)$$

2) для точки со сжимающими напряжениями ($\sigma_f < 0$):

$$K_2^- = \frac{\sigma_{\text{экв.}f}}{R_2}, \quad (9)$$

где σ_f — максимальные суммарные продольные напряжения (фибровые напряжения); $\sigma_{\text{экв.}f}$ — эквивалентные фибровые напряжения; R_2 — сопротивление растяжению (сжатию) по второму условию.

При расчете фибровых напряжений учитываются не только размеры, характеристики материала и условия эксплуатации трубы, но и кривизна оси на разных координатах участка трубопровода. Ось трубопровода — условная линия, проходящая вдоль трубопровода через центр его поперечного сечения [22]. Фибровые напряжения определяются для двух крайних точек поперечного сечения трубы по формуле:

$$\sigma_f = E(\pm \varepsilon_b - \varepsilon_T) + \nu \sigma_h, \quad (10)$$

где ε_b — изгибная деформация.

Изгибная деформация определяется с помощью выражения:

$$\varepsilon_b = \frac{D}{2\kappa}, \quad (11)$$

где κ — результирующая кривизна оси на поперечном сечении трубы, которая определяется согласно [3].

Эквивалентные фибровые напряжения определяются с помощью следующего выражения:

$$\sigma_{\text{экв.}f} = \sqrt{\sigma_h^2 - \sigma_h \sigma_f + \sigma_f^2}. \quad (12)$$

Значение R_2 определяется с помощью выражения:

$$R_2 = \frac{m}{k_2 k_n} R_2^n, \quad (13)$$

где R_2^n — нормативный предел текучести материала трубы; k_2 — коэффициент надежности по материалу трубы, который, согласно [3, 5], для наземных трубопроводов берется равным 0,9.

Если K превышает единицу, то это значит, что не выполняются первое и/или второе условие, т.е. на этом участке присутствуют значительные механические напряжения (табл. 1).

Таблица 1

Принимаемые решения в зависимости от уровня нагруженности участка газопровода

K	Решение
$K \leq 1$	Разрешается эксплуатация газопровода при рабочем (проектном) давлении
$1 < K \leq 1,2$	Корректировка положения оси участка газопровода в соответствии с плановым ремонтом До планового ремонта требуется периодическое техническое обслуживание участка
$K > 1,2$	Выход из эксплуатации с последующим ремонтом

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Расчет коэффициента нагруженности показал, что в надземном переходе «А» нет сечений с превышением порога $K = 1$, значит труба полностью пригодна для эксплуатации, а часть надземного перехода «Б» превышает пороговые значения $K = 1,2$, следовательно, требуется вывод из эксплуатации этой трубы.

По полученным результатам измерений магнитных характеристик на трубах «А» и «Б» были построены цветовые карты распределения характеристик по поверхности трубы (рис. 6—9), в которых крестиками обозначены точки измерений, а цвета получены за счет интерполяции измерений между этими точками.

На рис. 6—8 представлены карты распределения максимальной магнитной индукции B_m , коэрцитивной силы H_c и остаточной магнитной индукции B_r , полученные с помощью ММТ-3 при измерении по оси (a, b) и по кольцу (c, ε) трубопровода.

По рис. 6 видно, что значения B_m , измеренные по кольцу, ниже, чем B_m , полученные по оси. Определено, что значения B_m по оси находятся в диапазоне от 172 до 178 отн. ед., а по кольцу — от 155 до 170.

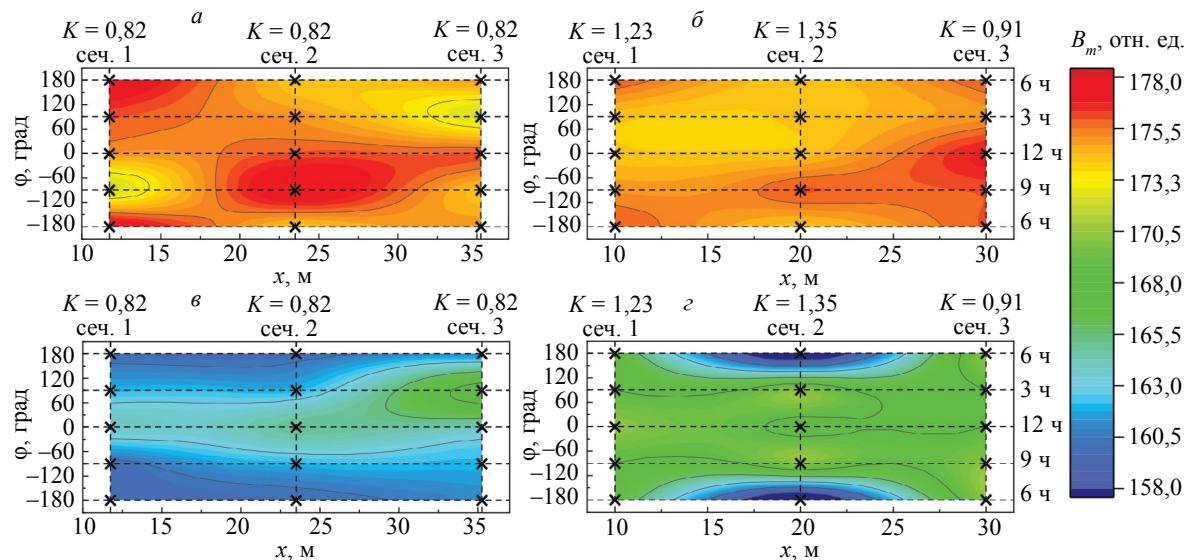


Рис. 6. Распределение (топограммы) максимальной магнитной индукции по трубам «А» (a, ε) и «Б» (b, ε), измеренной по оси (a, b) и кольцу (c, ε) с помощью ММТ-3.

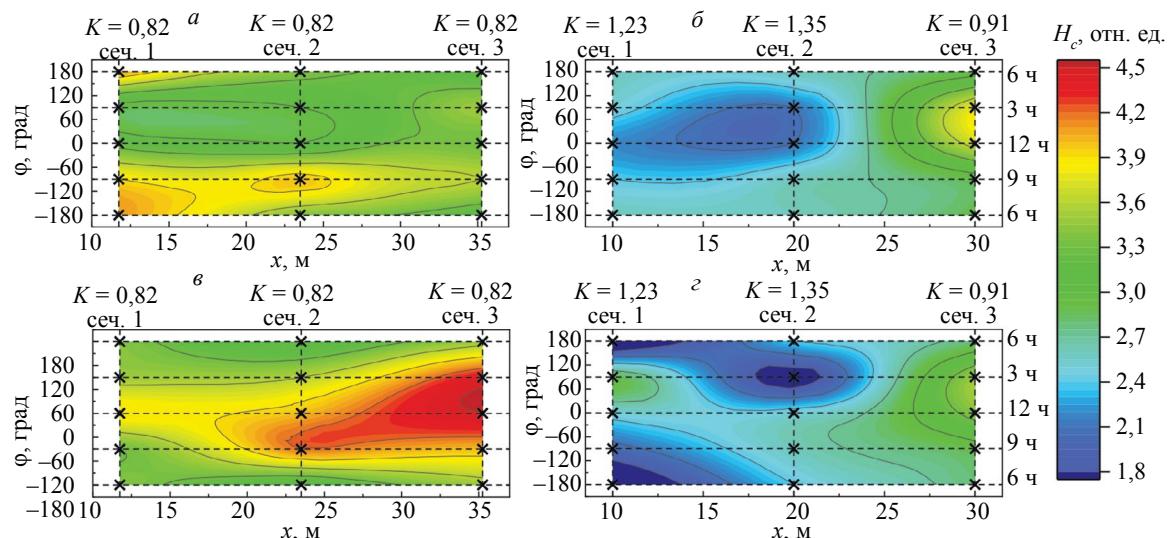


Рис. 7. Распределение (топограммы) коэрцитивной силы по трубам «А» (a, ε) и «Б» (b, ε), измеренной по оси (a, b) и кольцу (c, ε) с помощью ММТ-3.

На рис. 7 видна тенденция к уменьшению H_c при увеличении K как по оси, так и по кольцу. Наиболее заметна такая тенденция на 3 и 12 ч при измерении по оси и на 3 ч при измерении по кольцу.

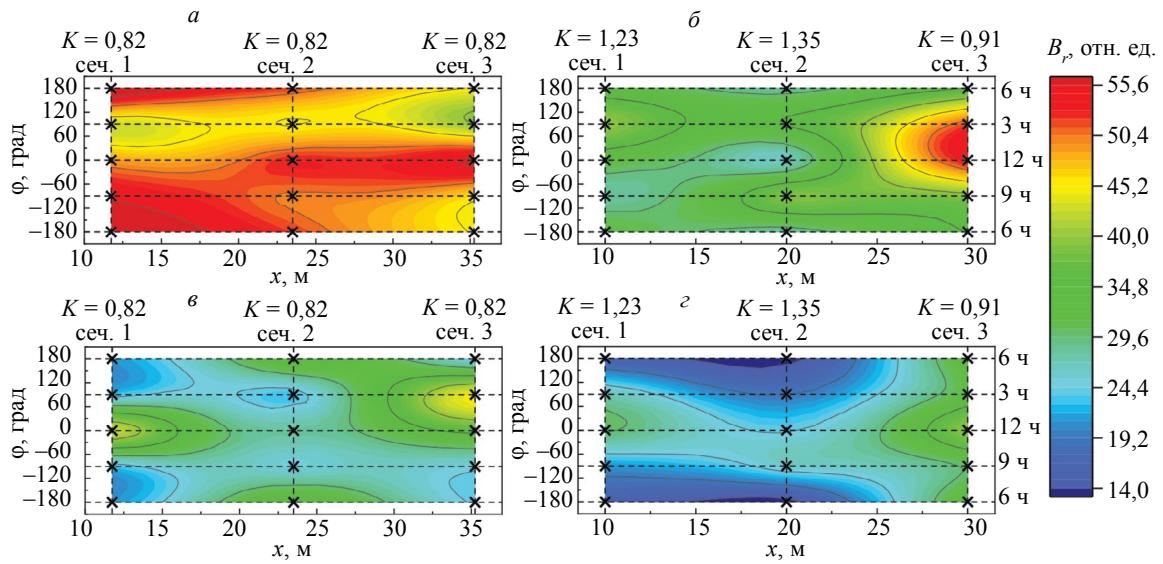


Рис. 8. Распределение (топограммы) остаточной магнитной индукции по трубам «А» (а, в) и «Б» (б, г), измеренной по оси (а, б) и кольцу (в, г) с помощью ММТ-3.

Также и на рис. 8 видна тенденция к уменьшению B_r при увеличении K . Наиболее заметна такая тенденция на 12 ч при измерении по оси и на 6 ч при измерении по кольцу.

На рис. 9 представлены карты распределения коэрцитивной силы H_c^{KPM} , полученные с помощью ММТ-3 при измерении по оси (а, б) и по кольцу (в, г) трубопровода.

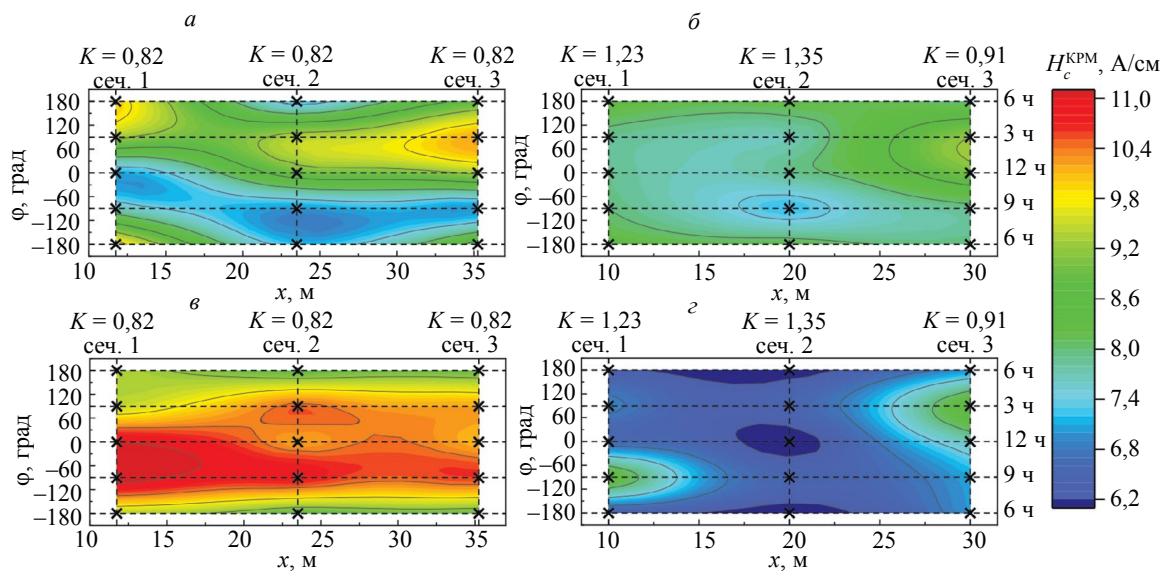


Рис. 9. Распределение (топограммы) коэрцитивной силы по трубам «А» (а, в) и «Б» (б, г), измеренной по оси (а, б) и кольцу (в, г) с помощью КРМ-Ц-К2М.

По рис. 9 видно, что по всем сторонам трубы в сечении с $K = 0,91$ значения H_c^{KPM} , измеренные по кольцу, значительно ниже, чем в сечениях с $K = 0,82$. При этом значения H_c^{KPM} слабо зависят от K в диапазоне от 0,91 до 1,35, а наилучшая чувствительность наблюдается на 3 и 12 ч. По оси тенденция к уменьшению H_c^{KPM} при увеличении K видна только на 3 ч, а по остальным сторонам такой тенденции не наблюдается.

Анализируя цветовые карты распределения магнитных характеристик, показанные на рис. 6—9, можно сделать следующие выводы:

1. По рис. 6 можно сделать предположение о том, что показания B_m по кольцу ниже, чем по оси, потому что перемагничивание по кольцу может происходить не по предельной петле гистерезиса. Это говорит о том, что измерения с помощью приставного преобразователя лучше проводить по оси трубы, либо использовать специальные наконечники при измерениях по кольцу.

2. По оси наибольший градиент значений H_c , измеренных с помощью ММТ-3, наблюдался на 3 и 12 ч (рис. 7a, б), а значений B_r — на 12 ч (рис. 8a, б).

3. По кольцу наибольший градиент значений H_c наблюдался на 3 ч (рис. 7в, г), а значений B_r — на 6 ч (рис. 8в, г).

4. При измерении с помощью КРМ-Ц-К2М наибольший градиент по оси наблюдался на 3 ч, а по кольцу — на 3 и 12 ч (см. рис. 9).

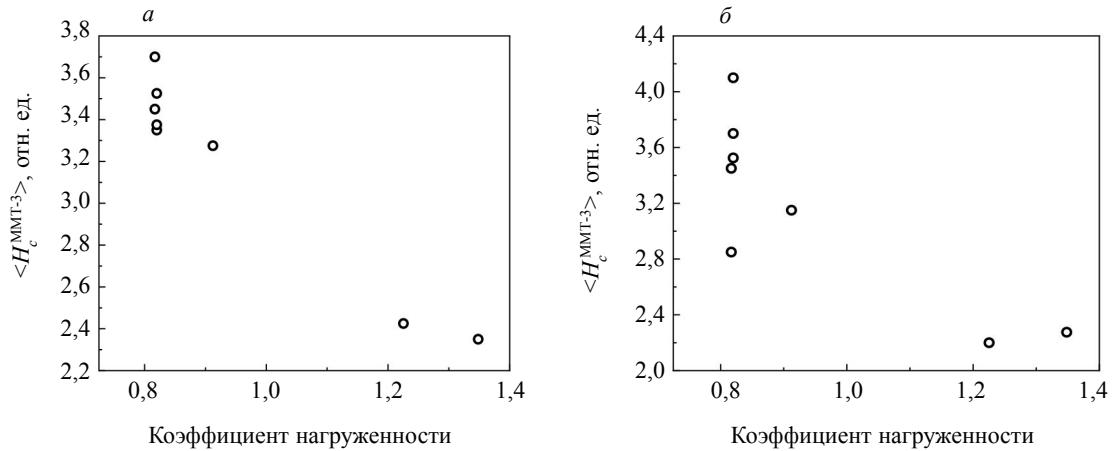


Рис. 10. Зависимость усредненной по четырем зонам в сечении трубы коэрцитивной силы, измеренной с помощью ММТ-3 по оси (a) и по кольцу (б), от коэффициента нагруженности.

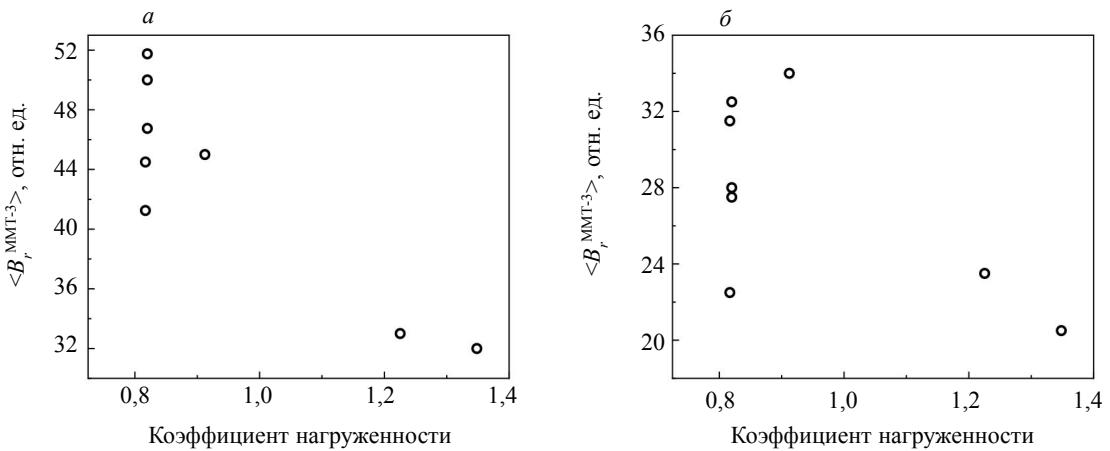


Рис. 11. Зависимость усредненной по четырем зонам в сечении трубы остаточной магнитной индукции, измеренной с помощью ММТ-3 по оси (а) и по кольцу (б), от коэффициента нагруженности.

На рис. 10—12 показаны усредненные по четырем зонам каждого поперечного сечения (см. рис. 3) значения магнитных характеристик в зависимости от определенного для каждого из этих сечений коэффициента нагруженности, а на рис. 13 — от фибрьных напряжений.

Из рис. 10—12 видно, что результаты измерений, полученные с помощью КРМ-Ц-К2М, не поддаются однозначной трактовке: одному и тому же значению коэрцитивной силы соответствует значение коэффициента нагруженности как меньше 1, так и больше 1,2. Однозначное различие между значениями коэффициента нагруженности в его критических значениях были

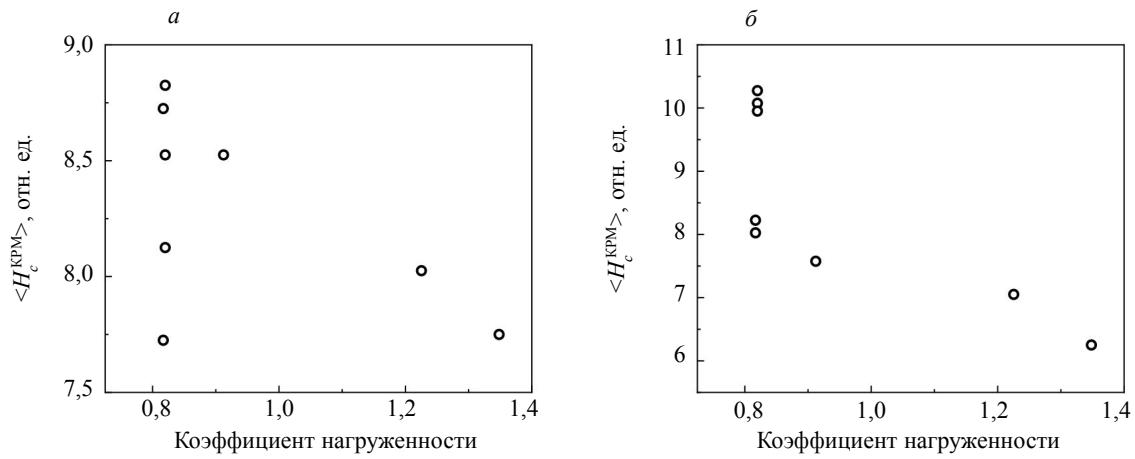


Рис. 12. Зависимость усредненной по четырем зонам в сечении трубы коэрцитивной силы, измеренной с помощью КРМ-Ц-К2М по оси (а) и по кольцу (б), от коэффициента нагруженности.

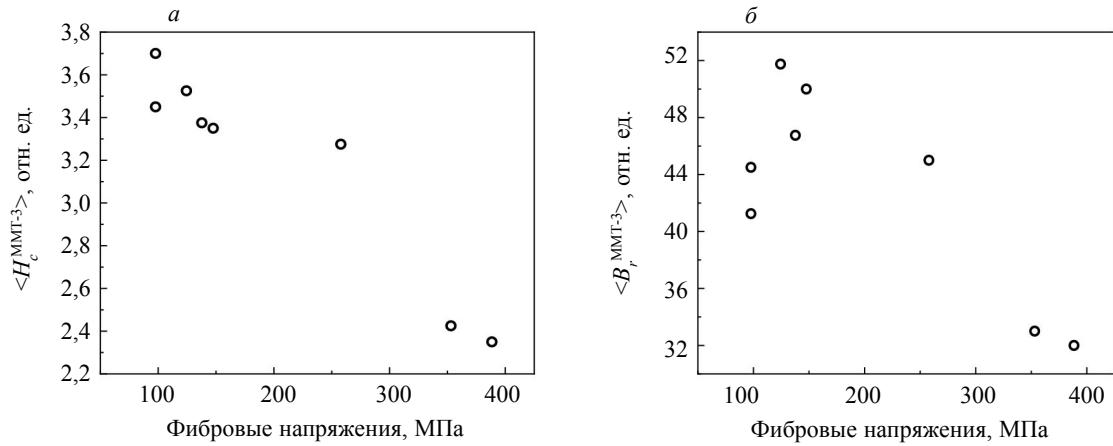


Рис. 13. Зависимость усредненных по четырем зонам в сечении трубы значений коэрцитивной силы (а) и остаточной магнитной индукции (б), измеренной с помощью ММТ-3 по оси, от фибровых напряжений.

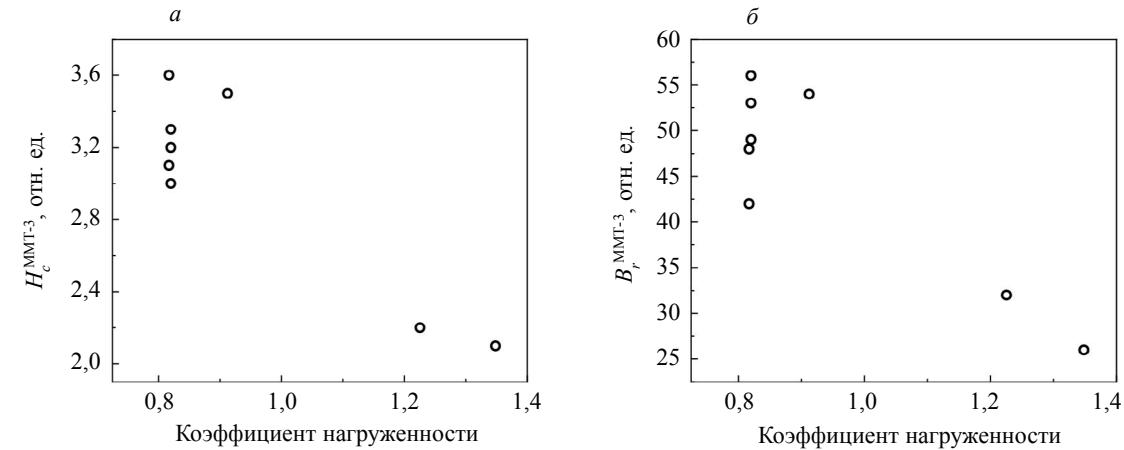


Рис. 14. Зависимость значений коэрцитивной силы (а) и остаточной магнитной индукции (б), измеренных с помощью ММТ-3 по оси, в зонах, расположенных на 12 ч, от коэффициента нагруженности.

получены косвенно по магнитным характеристикам, измеренным прибором ММТ-3 в направлении расположения датчика по оси. По этим результатам видно, что сечения трубопровода, характеризующиеся повышенными значениями коэффициента нагруженности и фибровых напряжений, отличаются от слабонагруженных сечений пониженными значениями H_c и B_r .

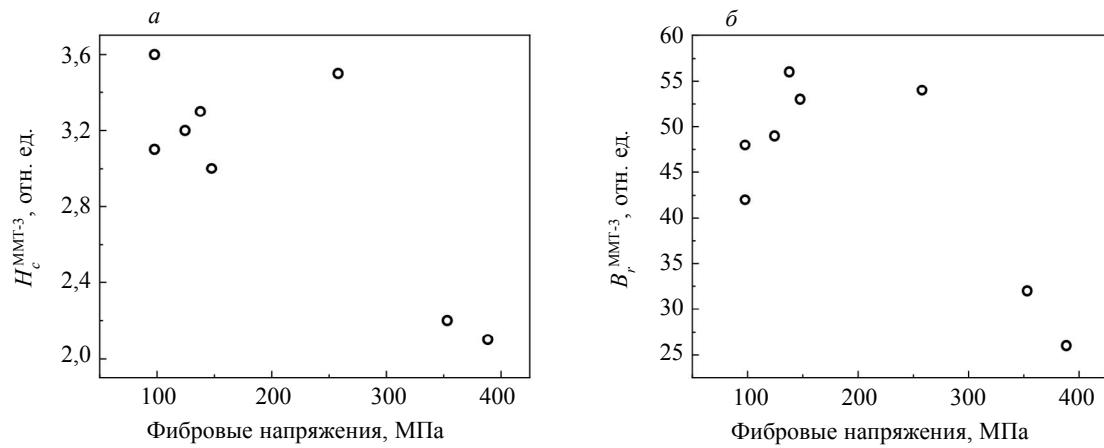


Рис. 15. Зависимость значений коэрцитивной силы (а) и остаточной магнитной индукции (б), измеренных с помощью ММТ-3 по оси, в зонах, расположенных на 12 ч, от фибровых напряжений.

Из рис. 13 видно, что коэрцитивная сила H_c монотонно убывает с увеличением фибровых напряжений, а при напряжении выше 300 МПа наблюдается резкое падение H_c в 1,4 раза. Значения B_r от фибровых напряжений меняются немонотонно. При напряжениях в диапазоне от 100 до 150 МПа чувствительность B_r к напряжениям значительно выше, чем у H_c .

Рассмотрим наиболее информативные для выявления разницы в значениях коэффициента нагруженности магнитные характеристики (см. рис. 14 и 15, характеристики, измеренные на 12 ч). Полученные зависимости аналогичны зависимостям, показанным на рис. 10, 11, из чего можно сделать заключение о возможности контроля НДС на одной стороне трубы на 12 ч.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что оптимальным местом для определения напряженно-деформированного состояния с помощью магнитных характеристик является сторона на 12 ч, т.е. верхняя часть трубы, а измерения лучше проводить при направлении измерения по оси.

ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований было установлено:

1. Наиболее опасным для разрушения сечениям, в которых коэффициент нагруженности превысил критическое значение 1,2, соответствуют измеренные пониженные значения коэрцитивной силы и остаточной магнитной индукции, полученные при направлении измерения вдоль оси трубопровода.

2. Измерение одновременно двух параметров петли магнитного гистерезиса, а именно коэрцитивной силы и остаточной магнитной индукции, позволит повысить достоверность контроля и чувствительность к напряженно-деформированному состоянию, избежать ошибок в интерпретации полученных результатов.

3. Оптимальным местом для определения напряженно-деформированного состояния с помощью магнитных характеристик является сторона на 12 ч, т.е. верхняя часть трубы, а измерения необходимо проводить при намагничивании вдоль оси трубы.

4. Для измерений вдоль кольца трубопровода перспективным является создание специальных наконечников, которые позволят усилить контакт между образцом и преобразователем.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России по теме «Диагностика», № 122021000030-1 и договора о сотрудничестве № 05с/22 от 15 ноября 2022 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Игнатик А.А. Расчетно-экспериментальная оценка напряженного состояния трубопровода под воздействием изгибающей нагрузки и внутреннего давления // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2021. № 2 (146). С. 114—126.
2. Игнатик А.А. Характеристика напряженно-деформированного состояния стенки трубопровода под воздействием внутреннего давления, изгиба и кручения // Газовая промышленность. 2020. № 4 (799). С. 102—107.
3. Рекомендации по оценке прочности и устойчивости эксплуатируемых МГ и трубопроводов КС / дата введения 24.11.2006. М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2007. 42 с.

4. СНиП 2.05.06-85. Магистральные трубопроводы. М.: ФГУП ЦПП, 2005. 60 с.
5. СП 36.13330.2012. Магистральные трубопроводы. М.: Госстрой, 2013. 93 с.
6. Захаров В.А., Ульянов А.И., Горкунов Э.С. Коэрцитивная сила ферромагнитных сталей при двухосном симметричном растяжении материала // Дефектоскопия. 2011. № 6. С. 3—15.
7. Безлюдько Г.Я., Соломаха Р.Н., Савлук С.В., Сирота В.Е., Сивирюк В.Л. Коэрцитиметрия для мониторинга напряженного и усталостного состояния кожуха доменной печи // В мире неразрушающего контроля. 2021. Т. 24. № 3 (93). С. 32—35.
8. Безлюдько Г.Я., Мужицкий В.Ф., Ремезов В.Б. Серия портативных приборов-структуроскопов, основанных на измерении величины коэрцитивной силы // Дефектоскопия. 2003. № 4. С. 43—51.
9. IEC 60404-4 Magnetic materials — Part 4: Methods of measurement of d.c. magnetic properties of magnetically soft materials.
10. Горкунов Э.С., Мушников А.Н. Магнитные методы оценки упругих напряжений в ферромагнитных сталях (обзор) // Контроль. Диагностика. 2020. Т. 23. № 12 (270). С. 4—23.
11. Агиней Р.В., Теплинский Ю.А., Кузьбожев А.С., Богданов Н.П. Применение магнитного метода для оценки напряженного состояния стальных конструкций // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. 2004. № 27. С. 95—97.
12. Андронов И.Н., Агиней Р.В., Леонов И.С. Анализ плосконапряженного состояния стальных трубопроводов по лепестковым диаграммам коэрцитивной силы // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013. Т. 79. № 12. С. 50—52.
13. Stashkov A.N., Schapova E.A., Nichipuruk A.P., Korolev A.V. Magnetic incremental permeability as indicator of compression stress in low-carbon steel // NDT & E International. 2021. V. 118. P. 102398.
14. Schapova E.A., Stashkov A.N., Tsar'kova T.P., Sazhina E.Y., Kochnev A.V. The comparison of two data processing techniques of magnetic method for elastic compressive stress determination // AIP Conference Proceedings: The VI International Young Researchers Conference Physics, Technologies Innovation, Ekaterinburg, May 20—23, 2019 / Ural Federal University. V. 2174. Ekaterinburg: American Institute of Physics, 2019. P. 020167.
15. Костин В.Н., Василенко О.Н., Бызов А.В. Мобильная аппаратно-программная система магнитной структуроскопии DIUS-1.15M // Дефектоскопия. 2018. № 9. С. 47—53.
16. Костин В.Н., Смородинский Я.Г. Многоцелевые аппаратно-программные системы активного электромагнитного контроля как тенденция // Дефектоскопия. 2017. № 7. С. 23—34.
17. Костин В.Н., Василенко О.Н., Михайлов А.В., Лукиных Н.П., Ксенофонтов Д.Г. О преимуществах локального измерения коэрцитивной силы ферромагнитных объектов по внутреннему полю // Дефектоскопия. 2020. № 7. С. 21—27.
18. Ничипурук А.П., Бида Г.В., Шанаурин А.М., Сташков А.Н. О функциональных возможностях магнитного структуроскопа СМ-401 // Дефектоскопия. 2003. № 1. С. 3.
19. Костин В.Н., Царькова Т.П., Ничипурук А.П., Лоскутов В.Е., Лопатин В.В., Костин К.В. Необратимые изменения намагниченности как индикаторы напряженно-деформированного состояния ферромагнитных объектов // Дефектоскопия. 2009. № 11. С. 54—87.
20. ГОСТ 19281—2014 Прокат повышенной прочности. Общие технические условия.
21. Горкунов Э.С., Захаров В.А. Коэрцитиметры с приставными магнитными устройствами (Обзор) // Дефектоскопия. 1995. № 8. С. 69—88.
22. ГОСТ Р 57512—2017 Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Термины и определения.

REFERENCES

1. Ignatik A.A. A computational and experimental assessment of the pipeline stress state under bending load and internal pressure // Oil and Gas Studies. 2021. No. 2. P. 114—126.
2. Ignatik A.A. Stress-strain state characteristics of pipeline wall under the internal pressure, bending, and torsion // Gas Industry Journal. 2020. No. 4. P. 102—107.
3. Recommendations on assessment of strength and stability of operated gas mains and pipelines of compressor stations / Effective as of 24 November 2006. Moscow: Gazprom VNIIGAZ, 2007. 42 p.
4. SNiP (Building Codes and Regulations) 2.05.06-85. Trunk pipelines, Moscow: FGUP TSPP, 2005, 60 p.
5. SP (Set of Rules) 36.13330.2012. Trunk pipelines, Moscow: Gosstroy, 2013. 93 p.
6. Zakharov V.A., Ul'yanov A.I., Gorkunov E.S. Coercive force of ferromagnetic steels under the biaxial symmetrical tension of a material // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2011. V. 47. No. 6. P. 359—368.
7. Bezlyud'ko G.Y., Sirona V.E., Solomakha R.N., Savluk S.V., Siviruk V.L. Coercimetry for stress-strain and fatigue state monitoring of blast furnace shell // NDT World. 2021. V. 24. No. 3. P. 32—35.
8. Bezlyud'ko G.Y., Muzhitskii V.F., Remezov V.B. Series of portable structuroscope-instruments based on measuring the coercive force // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2003. V. 39. No. 4. P. 43—51.
9. IEC 60404-4 Magnetic materials — Part 4: Methods of measurement of d.c. magnetic properties of magnetically soft materials.
10. Gorkunov E.S., Moshnikov A.N. Magnetic methods of evaluating elastic stresses in ferromagnetic steels (review) // Testing. Diagnostics. 2020. V. 23. No. 12. P. 4—23.

11. *Aginei R.V., Teplinsky Yu.A., Kuzbozhev A.S., Bogdanov N.P.* Application of magnetic method to assess the stress state of steel structures // Journal of Samara State Technical University. Ser. Physical and Mathematical Sciences. 2004. No. 27. P. 95—97.
12. *Andronov I.N., Aginei R.V., Leonov I.S.* Analysis of the plane stress state of steel pipelines by the radar charts of the coercivity // Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials. 2013. V. 79. No. 12. P. 50—52.
13. *Stashkov A.N., Schapova E.A., Nichipuruk A.P., Korolev A.V.* Magnetic incremental permeability as indicator of compression stress in low-carbon steel // NDT & E International. 2021. V. 118. P. 102398.
14. *Schapova E.A., Stashkov A.N., Tsar'kova T.P., Sazhina E.Y., Kochnev A.V.* The comparison of two data processing techniques of magnetic method for elastic compressive stress determination // AIP Conference Proceedings: The VI International Young Researchers Conference Physics, Technologies Innovation, Ekaterinburg, May 20–23, 2019 / Ural Federal University. V. 2174. Ekaterinburg: American Institute of Physics, 2019. P. 020167.
15. *Kostin V.N., Vasilenko O.N., Byzov A.V.* DIUS-1.15M Mobile Hardware–Software Structuroscopy System // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. V. 54. No. 9. P. 654—661.
16. *Kostin V.N., Smorodinskii Y.G.* Multipurpose software-hardware systems for active electromagnetic testing as a trend // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2017. V. 53. No. 7. P. 493—504.
17. *Kostin V.N., Vasilenko O.N., Mikhailov A.V., Lukinykh N.P., Ksenofontov D.G.* On the advantages of local measurement of coercive force of ferromagnetic objects based on internal field // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 7. P. 574—580.
18. *Nichipuruk A.P., Bida G.V., Shanaurin A.M., Stashkov A.N.* Functional Possibilities of SM-401 Magnetic Structuroscope // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2003. V. 39. No. 1. P. 1—9.
19. *Kostin V.N., Tsar'kova T.P., Loskutov V.E., Kostin K.V., Nichipuruk A.P., Lopatin V.V.* Irreversible changes in the magnetization as indicators of stressed-strained state of ferromagnetic objects // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2009. V. 45. No. 11. P. 786—796.
20. GOST (State Standard) 19281—2014 Rolled steel of increased strength. General technical conditions.
21. *Gorkunov E.S., Zakharov V.A.* Coercimeters with magnetic attachments (review) // Russian Journal of Nondestructive Testing. 1995. V. 31. No. 8. P. 625.
22. GOST (State Standard) R 57512—2017 Main pipeline transportation of oil and petroleum products. Terms and definitions.