
**ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ,
ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ**

**INSTRUMENTS AND METHODS FOR MONITORING
THE NATURAL ENVIRONMENT, SUBSTANCES, MATERIALS AND PRODUCTS**

УДК53.091, 620.179.142, 620.174.21
DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-2-178-185

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ
РАССЕЯНИЯ ВДОЛЬ ПОВЕРХНОСТИ ПОДЗЕМНОГО МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА
И УПРУГОИЗОГНУТОЙ ТРУБЫ**

С. М. Кулак*, Д. Ф. Нерадовский, В. В. Проботюк

*Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия,
general@tyuiu.ru*

Аннотация. С целью установления причин периодического знакопеременного распределения магнитного поля рассеяния вдоль поверхности подземного газопровода исследована напряженность магнитного поля рассеяния H на поверхности протяженной трубы из стали Ст20 с упругоизогнутым в виде арки участком. Измерения H проводились касательно к трубе и по нормали. Установлено, что знакопеременные напряжения, возникающие в стенке упругоизогнутой трубы, являются причиной ее неравномерного и неоднородного намагничивания в магнитном поле Земли, а следовательно — периодического знакопеременного изменения магнитного поля рассеяния, измеренного на ее поверхности. Показано, что „длина волны“ изменения нормальной и тангенциальной составляющих напряженности магнитного рассеяния трубы сопоставима с протяженностью L созданной на ней арки, а их максимумы смещены друг относительно друга на $L/2$. Сделан вывод о том, что участки подземных нефтегазопроводов (арки), испытывающие изгибные деформации, намагничиваются в магнитном поле Земли неоднородно, что вызывает периодические изменения величины и направления магнитного поля рассеяния на их поверхности. Напряженное состояние в таких участках резко изменяется, по сравнению с расчетным, состояние изоляции отклоняется от нормы, и в совокупности возникают предпосылки к стресс-коррозионным разрушениям. Предлагается отслеживать изменения положения магистрального трубопровода в грунте в процессе эксплуатации относительно проектного, а также контролировать сезонную динамику напряженного состояния в области изгибной деформации магнитным методом с целью оценки ресурса и несущей способности.

Ключевые слова: магнитное поле рассеяния, деформация, напряженное состояние, газопровод, магнитоупругий эффект, арка газопровода

Ссылка для цитирования: Кулак С. М., Нерадовский Д. Ф., Проботюк В. В. Закономерности распределения магнитного поля рассеяния вдоль поверхности подземного магистрального газопровода и упругоизогнутой трубы // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 2. С. 178—185. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-2-178-185.

**PATTERNS OF MAGNETIC STRAY FIELD DISTRIBUTION ALONG THE SURFACE
OF AN UNDERGROUND MAIN GAS PIPELINE
AND AN ELASTICALLY BENT PIPE**

S. M. Kulak*, D. F. Neradovsky, V. V. Probotyuk

*Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia
general@tyuiu.ru*

Abstract. In order to establish the causes of the periodic alternating distribution of the magnetic stray field along the surface of an underground gas pipeline, the strength of the magnetic stray field H on the surface of an extended pipe

© Кулак С. М., Нерадовский Д. Ф., Проботюк В. В., 2024

made of St20 steel with an elastically bent section in the form of an arch is investigated. H measurements are carried out both tangentially to the pipe and normal to it. It is been established that the alternating stresses arising in the wall of an elastically curved pipe are the cause of its uneven and inhomogeneous magnetization in the Earth's magnetic field, and, consequently, the periodic alternating change in the magnetic stray field measured on its surface. The "wavelengths" of the changes in the normal and tangential components of the scattered magnetic field strength H of the pipe are shown to be comparable to the length L of the arch created on it, and their maxima are shifted relative to each other by half L . It is concluded that sections of underground oil and gas pipelines (arches), experiencing bending deformations, are magnetized in the Earth's magnetic field non-uniformly, which causes periodic changes in the magnitude and direction of the magnetic stray field on their surface. The stress state in such areas changes sharply compared to the calculated one, the state of the insulation deviates from the norm, and as a result, preconditions arise for stress-corrosion destruction. It is proposed to monitor changes in the position of the main pipeline in the ground during operation relative to the design one, as well as to monitor the seasonal dynamics of the stress state in the area of flexural deformation using the magnetic method in order to assess the service life and bearing capacity.

Keywords: magnetic stray field, deformation, stress state, gas pipeline, magnetoelastic effect, gas pipeline archway

For citation: Kulak S. M., Neradovsky D. F., Probotyuk V. V. Patterns of magnetic stray field distribution along the surface of an underground main gas pipeline and an elastically bent pipe. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 2. P. 178—185 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-2-178-185.

Введение. Напряженное состояние подземного трубопровода определяется во многом его проектным положением. Существующие методики расчета подземного трубопровода не учитывают изменений этого положения в процессе строительства и эксплуатации [1]*.

Механическое воздействие грунтов на трубопроводы, нерасчетные перемещения их участков за счет динамики грунтов, температурные деформации, отклонения от проекта при строительстве и т.д. приводят к появлению изгибов (арок), не предусмотренных проектом.

Образование арок в подземном трубопроводе влечет появление дополнительных напряжений в металле, превышающих предельные нагрузки и, как следствие, повышает вероятность его разрушения и снижает ресурс работы [2—4].

Напряженно-деформированное состояние (НДС) упругоизогнутых участков подземных трубопроводов оценивают расчетными и экспериментальными методами, например, методами конечных элементов и фотоупругости [5, 6]. На участках, доступных для тензометрирования, рекомендуются сезонно измерять приращения напряжения для получения более полной информации об устойчивом положении трубы [1, 7, 8].

В результате изгиба в стенках стального трубопровода появляются чередующиеся области деформации растяжения и сжатия. Вследствие магнитоупругого эффекта [9] это приведет к перераспределению намагниченности ферромагнитного материала. В работе [10] показано, что больше всего ферромагнитная труба намагничивается в магнитном поле Земли в области максимальных изгибных деформаций. Таким образом, можно полагать, что вблизи максимального изгиба трубы будут иметь место два разнонаправленно намагниченных участка. Тогда на половине арки будут укладываться максимум и минимум его магнитограммы. При этом пик тангенциальной составляющей магнитного поля на поверхности трубы должен соответствовать местам максимальных напряжений в ее стенке, а максимум нормальной составляющей напряженности магнитного поля трубы — смещен на четверть длины арки [11]. Поэтому величина измеряемого на поверхности трубы магнитного поля рассеяния является суммой (или разностью

СНиП 2.05.06-85 Магистральные трубопроводы. ВНИИСТ Миннефтегазстроя, 1997. 60 с.

ГОСТ Р 52330-2005. Контроль неразрушающий. Контроль напряженно-деформированного состояния объектов промышленности и транспорта. Общие требования. Введ. 2005-09-01. М.: Стандартинформ, 2005. 14 с.

СТО Газпром 2-2.3-253-2009. Методика оценки технического состояния и целостности газопроводов. М.: Газпром экспо, 2009. 57 с.

СТО Газпром 2-2.3-095-2007. Методические указания по диагностическому обследованию линейной части магистральных газопроводов. М.: Газпром, 2007. 51 с.

абсолютных значений) магнитных полей от растянутой и сжатой областей, что необходимо учитывать при калибровке физических параметров по механическим напряжениям.

Проведенные в работе [12] трехкратные исследования распределения магнитного поля рассеяния на внешней поверхности нескольких участков подземного газопровода (ГП) общей протяженностью ~ 2300 м и диаметром 1420 мм показали периодичность в распределении нормальной и тангенциальной составляющих напряженности магнитного поля рассеяния на поверхности ГП как по величине, так и по направлению.

Постановка цели и задач исследования. Цель настоящей работы — установить причины периодического знакопеременного распределения магнитного поля рассеяния вдоль поверхности подземного газопровода.

Ставились и решались следующие задачи:

- исследовать магнитное поле рассеяния трубопровода большого диаметра, не испытывающего внешних силовых воздействий со стороны грунта;
- изучить распределение магнитного поля рассеяния вдоль внешней поверхности протяженной трубы при ее намагничивании изнутри и отсутствии внешних силовых воздействий;
- измерить напряженность магнитного поля рассеяния на поверхности стальной трубы, испытывающей локальные изгибные деформации в магнитном поле Земли.

Исследовалось магнитное поле рассеяния надземной тепловой магистрали диаметром ~ 1200 мм, размещенной на стойках и поэтому не испытывающей внешних силовых воздействий со стороны грунта. Напряженно-деформированное состояние магистрали обусловлено, главным образом, термической деформацией, давлением, весом собственным и перекачиваемого продукта (воды). Распределение нормальной (H_n) составляющей магнитного поля рассеяния тепловой магистрали вдоль ее оси показано на рис. 1.

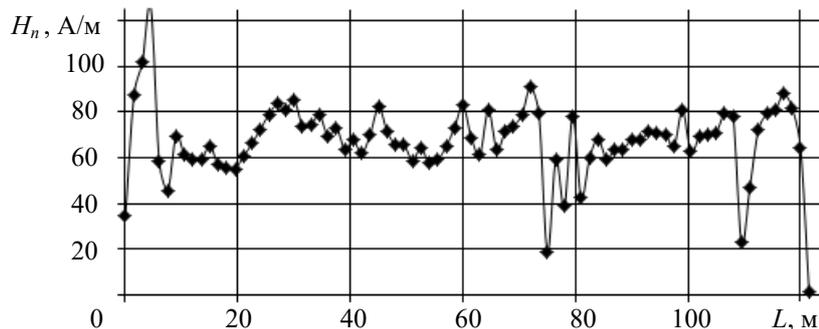


Рис. 1

Из рис. 1 видно, что изменяется только величина нормальной составляющей поля магистрали относительно значения 65—70 А/м, без смены ее знака (направления), со средним отклонением порядка ± 10 А/м. Величина магнитного поля Земли на момент проведения измерений на удалении 100 м от трубы равнялась ~ 30 А/м. Магнитное поле тепловой магистрали не имеет отрицательных аномалий, как на газопроводе [12].

Отсутствие периодичности изменения знака в распределении составляющих магнитного поля наземного трубопровода было также позднее установлено в работах авторов [13, 14]. Поэтому можно предположить, что периодические изменения величины и направления составляющих магнитного поля ГП [12] могут быть вызваны действием механических напряжений, обусловленных взаимодействием ГП и грунта.

Материалы и методы исследований. В ходе лабораторного исследования установлено периодическое изменение по величине и направлению магнитного поля рассеяния на поверхности стальной трубы с горизонтальной аркой.

Труба ($L \sim 13$ м, $D = 27$ мм) из стали Ст20, предварительно размагниченная в поле соленоида, была расположена на полу лаборатории под углом 15 — 20° к вектору напряженности магнитного поля Земли ($H_{T0} \sim 30$ А/м). Нормальная составляющая (H_n) магнитного поля рас-

сеяния измерялась вдоль верхней образующей трубы с шагом 10 см с помощью феррозондового магнитометра ИКНМ-2ФП, а также горизонтальной составляющей (H_t) — с помощью магнитоизмерительного феррозондового прибора Ф-205.38. Труба локально деформировалась изгибом в упругой области со стрелой $h = 30$ мм (рис. 2), и повторно измерялись H_t и H_n в тех же точках ее верхней образующей. Изгибающая нагрузка снималась, следовал повторный изгиб этого участка трубы с той же стрелой прогиба, и далее выполнялись аналогичные измерения магнитного поля рассеяния.

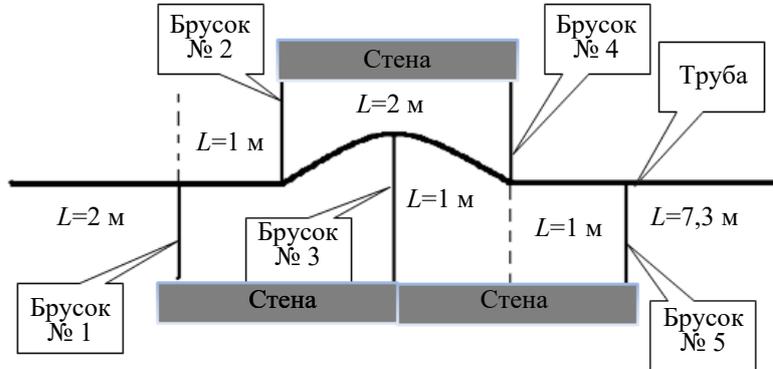


Рис. 2

Изгиб исследуемой трубы создавался с помощью пяти деревянных брусков, каждый из которых располагался упором в стену (на рис. 2 представлена схема создания арки в протяженной трубе, вид сверху). Брусок № 3 имел винтовой наконечник из немагнитного материала, позволяющий плавно механически увеличивать его длину и тем самым создавать изгибные деформации трубы. Максимальные расчетные продольные напряжения $\sigma_{пр}^{из}$ в стенках трубы, создаваемые ее изгибом [15], составили не более 180 МПа, что по уровню меньше допускаемых σ_r напряжений на растяжение для такой марки стали. При таком расположении исключалось влияние на напряженное состояние трубы ее собственного веса.

Результаты исследований и их обсуждение. На рис. 3 показаны горизонтальная арка трубы и силовые линии ее магнитного поля рассеяния (а); нормальная H_n и тангенциальная H_t составляющие магнитного поля рассеяния верхней образующей трубы, изогнутой в магнитном поле Земли (б).

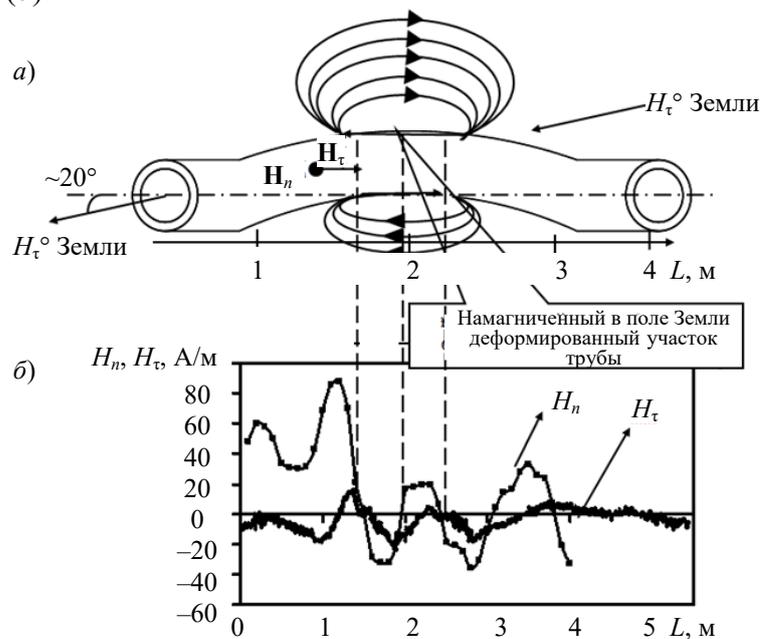


Рис. 3

На ненагруженных участках трубы (слева и справа от арки) наблюдаются небольшие, порядка ± 5 А/м, изменения поля рассеяния. На изогнутом участке трубы H_n и H_t периодически

ски изменяются по величине и направлению с амплитудой ~ 20 А/м и смещаются друг относительно друга примерно на 1 метр (половина длины арки). В вершине арки нормальная составляющая магнитного поля трубы равна нулю, а тангенциальная составляющая поля трубы приобретает отрицательное пиковое значение.

Установленное распределение магнитных полей рассеяния вдоль образующей трубы с локальным изгибом связано с появлением в ней магнитных диполей. Образование магнитных диполей объясняется тем, что при изгибе одна из образующих трубы испытывает деформацию растяжения, а диаметрально противоположная — деформацию сжатия. Как известно [16—18], при деформации во внешнем магнитном поле происходит неодинаковое намагничивание металла вдоль направления приложения растягивающих нагрузок и перпендикулярно прикладываемым сжимающим нагрузкам. При приложении напряжений, например сжимающих, к металлу магнитоупругое взаимодействие путем смещения или вращения доменных границ стремится повернуть векторы намагниченности в направлении, перпендикулярном направлению действующих напряжений. При этом доменные границы будут занимать новые метастабильные состояния с уже меньшей магнитоупругой энергией.

Изогнутая, как показано на рис. 3, а, труба имеет на боковых образующих чередующиеся области растяжения и сжатия. Причем они будут различаться по уровню нагрузки, испытываемой металлом, и на одной стороне эти области будут смещены на половину длины арки относительно областей с другой стороны. Очевидно, что вдоль боковой образующей изогнутой трубы при переходе от области растяжения к области сжатия происходит уменьшение растягивающих напряжений, затем смена знака и последующий рост сжимающих напряжений с максимумом в вершине изгиба. Таким образом, вдоль образующей трубы между областью растяжения и сжатия должно появляться следующее распределение ее намагниченности: в области вершины арки, где растягивающие напряжения максимальны, намагниченность наибольшая; при удалении от вершины напряжения убывают, что вызывает уменьшение намагниченности металла. В некоторой точке между областью растяжения и сжатия происходит смена знака напряжений и соответствующее изменение магнитного поля рассеяния трубы (направления намагниченности). По мере приближения к точке с максимальной сжимающей нагрузкой происходит неравномерное увеличение намагниченности металла со сменой знака. При движении датчика феррозондового магнитометра с осью, ориентированной, например на измерение тангенциальной составляющей магнитного поля, вдоль оси трубы с аркой, будет наблюдаться периодическое изменение измеряемой величины с максимумом в вершине изгиба. Максимум измеряемой нормальной составляющей должен находиться на некотором удалении от вершины изгиба, на участке выхода силовых линий, в точке, где, возможно, будет граница нагруженной области металла трубы. И действительно, как видно из рис. 3, б, в точке, где находится брусок № 3, тангенциальная составляющая принимает максимальное значение, а нормальная составляющая обращается в нуль. Таким образом „длина волны“ периодического изменения нормальной и тангенциальной составляющих магнитного поля рассеяния подземного трубопровода может быть соизмерима с протяженностью образованной в нем арки. По месту нахождения экстремумов этих величин можно определять координаты участков подземного трубопровода, где возможны его наибольшие изгибные деформации.

Авторами [11, 14] также был установлен периодический характер изменения трех ортогональных компонентов магнитного поля наземного и надземного подвешенного на деревянных опорах газопровода. В работе [13] установлено, что магнитное поле системы постоянных магнитов, представляющих собой модель трубопровода, изменяется периодически как по модулю, так и по направлению, и имеет схожий характер с магнитным полем подземного трубопровода, испытывающего изгибные деформации [12].

Результаты выполненных исследований магнитного поля рассеяния изогнутой трубы показывают, что сезонные изменения величины и направления напряженности магнитного поля подземного ГП [12] могут быть вызваны его изгибными деформациями.

Исследование магнитного поля рассеяния подземных трубопроводов позволит определить его истинные сезонные положения в грунте, а также участки с более интенсивным износом изоляционного покрытия, вызванным перемещением трубопровода в грунте.

Сочетание расчетного и приборного методов исследования напряженно-деформированного состояния подземных трубопроводов, в том числе в зонах арочных образований, позволит повысить качество прогнозирования их остаточного ресурса.

Выводы. В настоящей работе:

1) показано, что геометрия арки, созданной на протяженной трубе в лабораторных условиях, соизмерима с „длиной волны“ периодического распределения напряженности магнитного поля рассеяния вдоль ее поверхности;

2) установлено, что знакопеременные напряжения, возникающие в стенке упругоизогнутого в виде арки участка подземного газопровода, являются причиной его неравномерного и неоднородного намагничивания в магнитном поле Земли, а следовательно, и периодического знакопеременного изменения магнитного поля рассеяния, измеряемого на его поверхности;

3) предложено использовать магнитограммы полей рассеяния подземных трубопроводов для установления границ образования арок и оценивать максимальные напряжения изгиба в них, а также прогнозировать появление участков с высоким уровнем стресс-коррозионных разрушений;

4) изменение напряженности магнитного поля рассеяния подземного трубопровода в вершинах арок может служить метрологическим параметром при контроле максимальных напряжений, испытываемых им в процессе эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Харионовский В. В.* Надежность и ресурс конструкций газопроводов. М.: Недра, 2000. 467 с.
2. *Кузнецов А. Н.* Исследование влияния изгибов трубопроводов на их долговечность // Газовая промышленность. 2012. № 2. С. 59—61.
3. *Мирошниченко Б. И.* Роль напряженного состояния в формировании дефектов стресс-коррозии в трубопроводах // Дефектоскопия. 2008. № 6. С. 42—51.
4. *Кушнир С. Я., Новосёлов В. В., Иванов И. А.* Исследование влияния радиуса изгиба трубопровода на скорость коррозии его стенки // Нефть и газ. 2001. № 2. С. 91—95.
5. *Вагнер В. В.* Распределение стрелы прогиба арочного выброса по длине подземного газопровода // Изв. вузов. Нефть и газ. 2008. № 4. С. 101—105.
6. *Рыжков В. М., Рыжков Е. В.* Определение распределенной нагрузки на криволинейных участках трубопроводов, обусловленной внутренним давлением в трубе // Изв. Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2013. № 2-1(30). С. 218—222.
7. Контроль напряженно-деформированного состояния потенциально опасных участков трубопроводов // Газовая промышленность. 2009. № 7. С. 90—92.
8. *Бахтигареев А. А., Мустафин Ф. М.* Исследование напряженно-деформированного состояния упругоизогнутого участка трубопровода и повышение эксплуатационной надежности данного участка при неблагоприятных периодах эксплуатации // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2012. № 2. С. 18—22.
9. *Новиков В. Ф., Бахарев М. С.* Магнитная диагностика механических напряжений в ферромагнетиках. Тюмень: Вектор Бук, 2001. 220 с.
10. *Кулеев В. Г., Атангулова Л. В., Лопатин В. В.* Экспериментальное изучение полей рассеяния упруго- и пластически изогнутых стальных труб в поле Земли // Дефектоскопия. 2002. № 10. С. 48—61.

11. *Крапивский Е. И., Некучаев В. О.* Дистанционная магнитометрия газонефтепроводов. Ухта: УГТУ, 2011. 142 с.
12. *Бахарев М. С., Мосягин М. Н., Иванов И. А., Новиков В. Ф., Кулак С. М.* О возможности использования магнитных полей рассеяния магистрального газопровода для выявления сезонной динамики механических напряжений // Нефть и газ. 2004. № 4. С. 53—59.
13. *Любчик А. Н.* Повышение эффективности магнитометрического метода дистанционного контроля технического состояния подземных магистральных трубопроводов: Дис. ... канд. техн. наук. СПб, 2014. 151 с.
14. *Венкова Ю. А.* Мониторинг технического состояния нефтегазопроводов по индуцированной и остаточной намагниченности: Дис. ... канд. техн. наук. СПб, 2016. 149 с.
15. *Рудаченко А. В., Саруев А. Л.* Исследование напряженно-деформированного состояния трубопроводов: учеб. пос. Томск: Изд-во ТПУ, 2011. 136 с.
16. *Кокорин Н. В.* Контроль напряженного состояния нефтепромысловых труб. М.: Недра, 1980. 111 с.
17. *Акулов Н. С.* Ферромагнетизм. М.: Госиздат, 1939. 188 с.
18. *Вонсовский С. В., Шур Я. С.* Ферромагнетизм. М.—Л.: Гостехиздат, 1948. 816 с.

Сведения об авторах

- Сергей Михайлович Кулак** — канд. техн. наук, доцент; Тюменский индустриальный университет, кафедра физики и приборостроения; E-mail: kulaksm@tyuiu.ru
- Денис Фёдорович Нерадовский** — Тюменский государственный университет, физико-технический институт, кафедра моделирования физических процессов и систем; старший преподаватель; E-mail: denner81@mail.ru
- Владимир Викторович Проботюк** — канд. техн. наук; Тюменский индустриальный университет, кафедра физики и приборостроения; E-mail: probotjukvv@tyuiu.ru

Поступила в редакцию 04.10.2023; одобрена после рецензирования 29.10.2023; принята к публикации 17.12.2023.

REFERENCES

1. Kharionovskiy V.V. *Nadezhnost' i resurs konstruksiy gazoprovodov* (Reliability and Service Life of Gas Pipeline Structures), Moscow, 2000, 467 p. (in Russ.)
2. Kuznetsov A.N. *Gazovaya promyshlennost'*, 2012, no. 2, pp. 59–61. (in Russ.)
3. Miroshnichenko B.I. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2008, no. 6(44), pp. 403–408.
4. Kushnir S.Ya., Novoselov V.V., Ivanov I.A. *Neft' i gaz*, 2001, no. 2, pp. 91–95. (in Russ.)
5. Vagner V.V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Neft' i gaz*, 2008, no. 4, pp. 101–105. (in Russ.)
6. Ryzhkov V.M., Ryzhkov E.V. *Izvestiya nizhnevolszhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshye professional'noye obrazovaniye*, 2013, no. 2-1(30), pp. 218–222. (in Russ.)
7. *Gazovaya promyshlennost'*, 2009, no. 7, pp. 90–92. (in Russ.)
8. Bakhtigareev A.A., Mustafin F.M. *Transport i khraneniye nefteproduktov i uglevodorodnogo syr'ya* (Transport and Storage of Petroleum Products and Hydrocarbon Raw Materials), 2012, no. 2, pp. 18–22. (in Russ.)
9. Novikov V.F., Bakharev M.S. *Magnitnaya diagnostika mekhanicheskikh napryazheniy v ferromagnetikakh* (Magnetic Diagnostics of Mechanical Stresses in Ferromagnets), Tyumen, 2001, 220 p. (in Russ.)
10. Kuleev V.G., Atangulova L.V., Lopatin V.V. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2002, no. 10(38), pp. 755–766.
11. Krapivsky E.I., Nekuchaev V.O. *Distantcionnaya magnitometriya gazonefteprovodov* (Remote Magnetometry of Gas and Oil Pipelines), Ukhata, 2011, 142 p. (in Russ.)
12. Bakharev M.S., Mosyagin M.N., Ivanov I.A., Novikov V.F., Kulak S.M. *Neft' i gaz*, 2004, no. 4, pp. 53–59. (in Russ.)
13. Lyubchik A.N. *Povysheniye effektivnosti magnitometricheskogo metoda distantsionnogo kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya podzemnykh magistral'nykh truboprovodov* (Increasing the Efficiency of the Magnetometric Method for Remote Monitoring of the Technical Condition of Underground Main Pipelines), Candidate's thesis, St. Petersburg, 2014, 151 p. (in Russ.)
14. Venkova Yu.A. *Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya neftegazoprovodov po indutsirovannoy i ostatochnoy namagnichennosti* (Monitoring the Technical Condition of Oil and Gas Pipelines by Induced and Residual Magnetization), Candidate's thesis, St. Petersburg, 2016, 149 p. (in Russ.)
15. Rudachenko A.V., Saruyev A.L. *Issledovaniye napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya truboprovodov* (Study of the Stress-Strain State of Pipelines), Томск, 2011, 136 p. (in Russ.)
16. Kokorin N.V. *Kontrol' napryazhennogo sostoyaniya neftepromyslovykh trub* (Monitoring the Stress State of Oil Field Pipes), Moscow, 1980, 111 p. (in Russ.)
17. Akulov N.S. *Ferromagnetizm* (Ferromagnetism), Moscow, 1939, 188 p. (in Russ.)
18. Vonsovsky S.V., Shur Ya.S. *Ferromagnetizm* (Ferromagnetism), Moscow, Leningrad, 1948, 816 p. (in Russ.)

Data on authors

- Sergey M. Kulak** — PhD, Associate Professor; Industrial University of Tyumen, Department of Physics and Instrumentation; E-mail: kulaksm@tyuiu.ru
- Denis F. Neradovsky** — Tyumen State University, Institute of Physics and Technology, Department of Modeling of Physical Processes and Systems; Senior Lecturer; E-mail: denner81@mail.ru
- Vladimir V. Probotyuk** — PhD; Industrial University of Tyumen, Department of Physics and Instrumentation; E-mail: probotjukvv@tyuiu.ru

Received 04.10.2023; approved after reviewing 29.10.2023; accepted for publication 17.12.2023.