

Ю.А. Венкова, Е.И. Крапивский

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАПРЯЖЕННЫХ СОСТОЯНИЙ НА ИНДУЦИРОВАННОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ТРУБОПРОВОДА

Исследованы корреляции напряженных состояний стального трубопровода с параметрами его магнитного поля. В ходе проведенного эксперимента на базе Горного университета, а так же расчета в программном комплексе ANSYS MAGNETOSTATIC 15.0 получены графики распределения трех взаимно ортогональных компонент магнитной индукции ненагруженной и нагруженной горизонтальной или слабо наклонной стальной трубы, помещенной в магнитное поле Земли. Данные зависимости хорошо качественно коррелируются с расчетными распределениями полей рассеяния намагниченности, ранее полученными другими авторами [5]. Установлено, что зависимости напряженности поля носят сложный характер и с увеличением нагрузки увеличиваются и абсолютные значения экстремумов. Полученные результаты могут быть использованы для интерпретации магнитограмм, полученных при диагностическом обследовании трубопроводов, определении напряженных состояний в металле трубопровода, а хорошая сходимость экспериментальных и расчетных значений магнитной индукции, дает возможность использовать ANSYS MAGNETOSTATIC для расчета распределений магнитного поля под действием нагрузки в случаях более сложных, чем рассмотренные.

Ключевые слова: напряженные состояния, трубопровод, коэрцитивная сила, магнитная индукция, диагностика, трубопровод, ANSYS.

Многие исследователи занимались вопросом корреляции механических напряжений, возникающих в металле при эксплуатации с другими параметрами, которые возможно контролировать при диагностировании газонефтепроводов. Наиболее явную связь с напряженными состояниями металла имеют магнитные параметры, такие как коэрцитивная сила металла, намагниченность и магнитная индукция, так как при наличии малого внешнего магнитного поля Земли эти напряжения приведут к значительному магнитоупругому приросту намагниченности, величина которого гораздо больше намагниченности, индуцированной магнитным полем Земли [1, 3–6].

При исследовании влияния напряженных состояний металла на коэрцитивную силу авторами работ [1, 2–4] были установлены зависимости коэр-

цитивной силы от толщины немагнитного покрытия, толщины стенки трубы, дефектов трубы и других факторов. В этих работах исследовано изменение коэрцитивной силы образцов трубной стали в условиях растяжения в диапазоне напряжений 0...200 МПа с помощью разрывной машины МР-100, размеры образцов 280×50×5 мм. Измерения до приложения нагрузки показали, что коэрцитивная сила образцов в продольном направлении (H_c^{\parallel}) меньше, чем в поперечном (H_c^{\perp}). Отношение значений $H_c^{\perp} / H_c^{\parallel}$ для всех испытанных образцов находилось в диапазоне 1,07–1,75. Установлено, что с приложением к образцам нагрузки H_c^{\perp} монотонно увеличивается, а изменения показаний H_c^{\parallel} находится в пределах погрешности измерений.

После проведения испытаний на стальных образцах, авторами было

предложено применять метод коэрцитометрии для получения данных о напряженных состояниях трубопровода. Исследование проводилось на магистральном газопроводе Ухта – Вой-Вож, где были получены зависимости величины анизотропии коэрцитивной силы от уровня напряжений и номограммы для их определения.

В работе [5] рассчитаны тангенциальная и нормальная составляющие поля рассеяния на поверхности упругоизогнутой стальной трубы, находящейся в магнитном поле.

Для графиков распределения тангенциальной составляющей характерно по три максимума (при $x = 0$; $x = \pm 86$ см) и два минимума ($x = \pm 43$ см), в то время как графики распределения нормальной составляющей имеют две точки экстремума (при $x = \pm 70$ см) и по две точки перегиба между ними.

Для решения задач технической диагностики важны обе составляющие поля рассеяния на поверхности трубы и они взаимно дополняют друг друга: тангенциальная составляющая более информативна и дает возможность определить области с напряжениями изгиба, превышающими допустимые для данной стали, но по нормальной составляющей можно восстановить распределение намагниченности. К недостаткам тангенциальной составляющей поля рассеяния можно отнести тот факт, что ее величина значительно меньше величины нормальной составляющей. Это повышает требования к точности ориентации магнитометра при ее измерении.

На базе Горного Университета были проведены эксперименты по измерению магнитной индукции при различной нагрузке с помощью феррозондового магнито-

метра-градиентометра НВ0204.5А Pi-reMag, разработанного по техническому заданию Горного Университета.

В ходе эксперимента измерялись три взаимно-перпендикулярные компоненты электромагнитной индукции (z – вдоль трубы, y – вверх, x – перпендикулярно оси трубы и оси y) на расстоянии 7 см от верхней образующей ненагруженной и нагруженной стальной трубы (Ст 20, $D = 60$ мм, $\delta = 5$ мм, $l = 3$ м), помещенной в магнитное поле Земли. Труба была закреплена неподвижно на концах и нагружалась домкратом, расположенным в центре B (схема нагружения представлена на рис. 1).

В результате эксперимента были получены кривые распределения трех взаимно ортогональных компонент магнитного поля под действием нагрузки (рис. 2, а):

Для нормальных составляющих x и y экспериментальные графики схожи с расчетными, ранее полученными другими авторами. Они имеют по две точки экстремума $x = 70$ см, $x = 330$ см, при увеличении нагрузки на трубу абсолютные значения экстремумов возрастают.

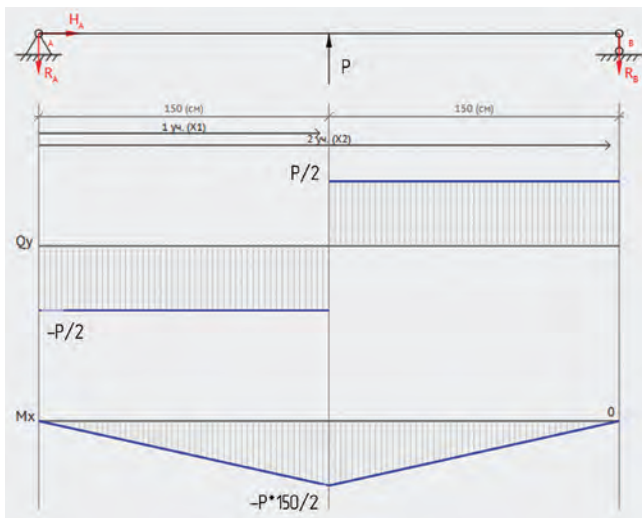


Рис. 1. Схема нагружения стальной трубы

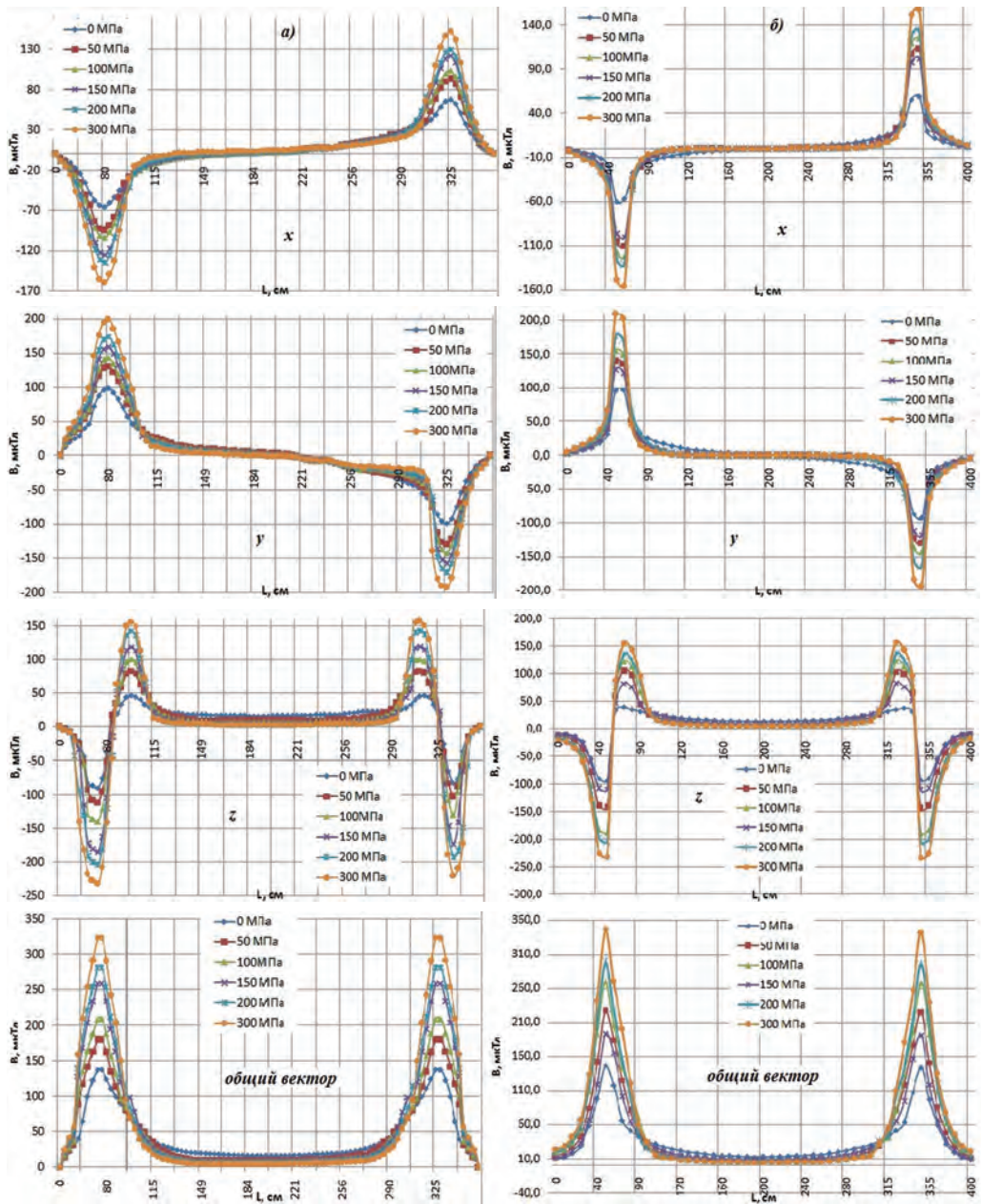


Рис. 2. Распределение трех компонент и полного вектора индукции магнитного поля по длине трубы: а) эксперимент, б) расчет

График тангенциальной составляющей магнитной индукции z имеет 5 точек экстремума $x = 70$ см, $x = 105$ см, $x = 200$ см, $x = 295$ см, $x = 330$ см. При возрастании нагрузки значение максимумов возрастает, а значение

минимум убывает, таким образом увеличивается «прогиб» графика в центре с увеличением нагрузки.

Согласно ранее полученным распределениям коэрцитивной силы по длине трубопровода, ранее полученны-

ми другими исследователями, был проведен расчет электромагнитной индукции стальной трубы (Ст 20, $D = 60$ мм, $\delta = 5$ мм, $l = 3$ м), помещенной в магнитное поле Земли. Для расчета был использован метод конечных элементов, реализованный в программном комплексе ANSYS MAGNETOSTATIC 15.0. Для этого была создана модель трубопровода, состоящего из 30 участков, на каждом из которых задавалось определенное значение коэрцитивной силы. Для данной модели была сгенерирована сетка с количеством ячеек 150 000 и сгущением на концах трубы. Результаты расчета представлены на рис. 2, б).

На рис. 3 представлены графики зависимости магнитной индукции от величины нагрузки на трубопровод, построенные по точкам экстремумов.

Графики, полученные в результате расчета в ANSYS хорошо коррелируются с ранее полученными экспериментальными данными (погрешность не более 15%). На графиках нормальных составляющих магнитной индукции имеется также 2 точки экстремума и их абсолютные значения возрастают с ростом нагрузки. Расчетное распределение тангенциальной составляющей качественно совпадает с экспериментальными данными. Также можно отметить и то, что при расчете в ANSYS пики графиков более острые, чем у полученных экспериментально. Возможно, это объясняется тем, что при проведении экспери-

мента использовался датчик размером в 1 см, а при проведении расчета в ANSYS размер элемента разбиения был равен 1 мм.

Поэтому для получения более универсальной формулы, связывающей величину индукции магнитного поля, толщину стенки, диаметр трубопровода и напряжения в металле трубопровода в программном комплексе ANSYS был проведен теоретический эксперимент, который состоял из 54 опытов, в которых поочередно изменялись параметры трубы и напряжения (рис. 4). В результате была получена зависимость:

$$B = 10^{-0,948 + 1,32\sqrt{D} + \frac{0,015}{D} + 11,35\sqrt{\delta} + \frac{0,00198}{\delta} - 0,0148\sqrt{\sigma}}$$

где B – индукция магнитного поля, мкТл; D – внешний диаметр трубы, м; δ – толщина стенки трубы, м; σ – напряжение в стенке, МПа.

Графики, полученные в результате расчета в ANSYS хорошо коррелируются с ранее полученными экспериментальными данными (погрешность не более 15%). На графиках нормальных составляющих магнитной индукции имеется также 2 точки экстремума и их абсолютные значения возрастают с ростом нагрузки. Расчетное распределение тангенциальной составляющей качественно совпадает с экспериментальными данными, но точки перегиба при расчете методом конечных элементов находятся на торцах трубы, при том, что при эксперименте и статье [5] данные точки смещены на

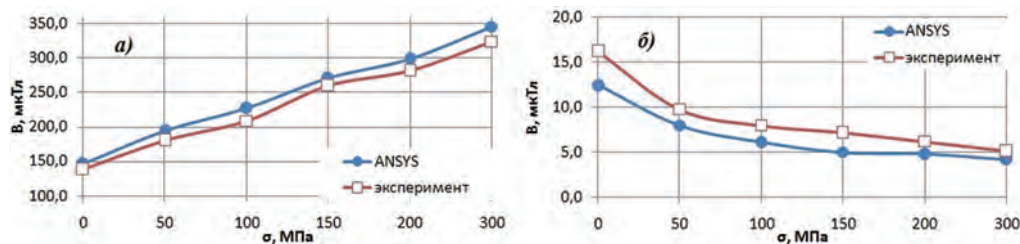


Рис. 3. Зависимость величины полного вектора магнитной индукции от приложенной нагрузки: а) в точке максимума б) в точке минимума

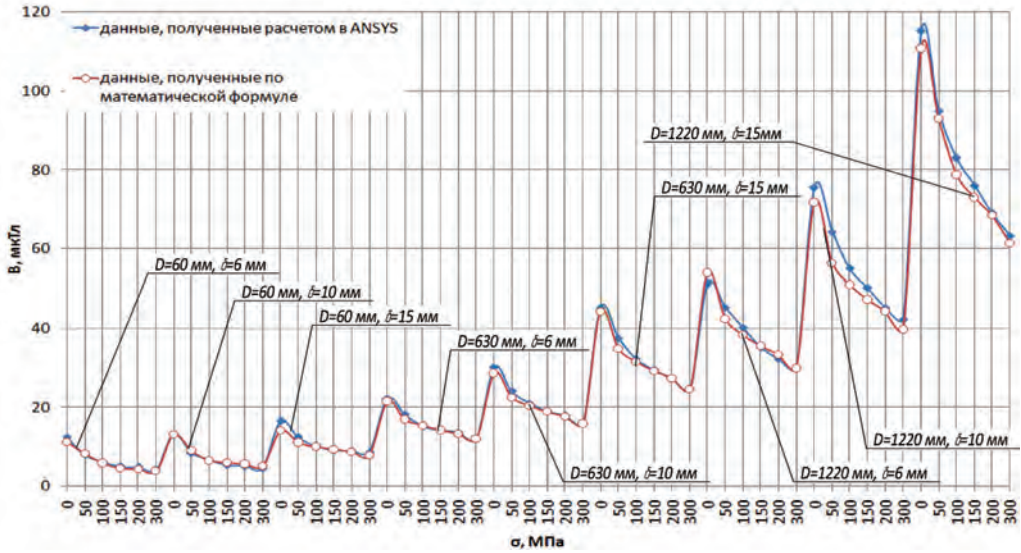


Рис. 4. Ряд зависимостей полного вектора магнитной индукции от напряжений в стенке для труб с различной конфигурацией

25 см к центру трубы, соответственно имеется разница в расположении экстремумов. Так же можно отметить и то, что при расчете в ANSYS пики графиков более острые, чем у полученных экспериментально и приведенных в статье [5]. Возможно, это объясняется тем, что при проведении эксперимента использовался датчик размером в 1 см, а при проведении расчета в ANSYS размер элемента разбиения был равен 1 мм.

Выводы

1. Напряжения, возникающие в металле трубы можно диагностировать по тангенциальной и нормальным составляющим магнитной индукции, причем по тангенциальной составляющей можно определить зоны растяжения и сжатия.

2. С увеличением нагрузки на трубу абсолютные значения магнитной индукции в точках экстремума возрастают, при этом возрастает прогиб на графиках распределения компонент магнитной индукции в точке прило-

жения нагрузки относительно торцов трубы. Его величину можно рассматривать как основной параметр при диагностике напряженных состояний трубопровода на практике.

3. Результаты расчета в программном комплексе ANSYS MAGNETO-STATIC 15.0 хорошо коррелируются с ранее полученными авторами статьи [5] данными по распределению поля рассеяния магнитного поля, а также с полученными при экспериментах, проведенных в ходе данной работы.

4. Полученные результаты могут быть использованы для расшифровки магнитограмм, полученных при диагностическом обследовании трубопроводов, определении напряженных состояний в металле трубопровода, а хорошая сходимость экспериментальных и расчетных значений магнитной индукции, дает возможность использовать ANSYS MAGNETOSTATIC для расчета распределений магнитного поля под действием нагрузки в более сложных случаях, чем рассмотренные в данной статье.

1. Агине́й Р.В. Разработка методики оценки напряженного состояния нефтегазопроводов по коэрцитивной силе металл. Автореф. дисс. канд.: техн. наук. 25.00.19. Ухтинский гос. техн. ун-т. – Ухта, 2005. – 21 с.
2. Градиентометр НВ0204.5А. Комплект эксплуатационных документов. ООО «НПО ЭНТ». – 35 с.
3. Михеев М.Н., Морозова В.М., Морозов А.П. и др. Коэрцитиметрические методы контроля качества термических и химико-термических обработок стальных и чугуновых изделий // Дефектоскопия. – 1978. – № 1. – С. 14–22.
4. Зацепин Н.Н. Магнитостатика деформированных тел // Контроль. Диагностика. – 2006. – № 12. – С. 62–69.
5. Кулеев В.Г., Лопатин В.В. Магнитное поле рассеяния упругоизогнутой ферромагнитной стальной трубы // Дефектоскопия. – 2003. – № 5. – С. 61–67.
6. Кулеев В.Г. Экспериментальное изучение полей рассеяния упруго- и пластически изогнутых стальных труб в поле Земли // Дефектоскопия. – 2002. – № 10. – С. 48–62. **ПЛАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Венкова Юлия Андреевна – аспирант, e-mail: ju_letta@mail.ru,
Крапивский Евгений Исаакович – доктор геолого-минералогических наук,
профессор, e-mail: eikrapivsky@mail.ru,
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный».

UDC 620.179.14

**STUDY OF THE STRESS STATE INFLUENCE
ON INDUCED PIPELINES MAGNETIC FIELD**

Venkova Y.A.¹, Graduate Student, e-mail: ju_letta@mail.ru,
Krapivsky E.I.¹, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor,
e-mail: eikrapivsky@mail.ru,
National Mineral Resource University «University of Mines»,
199106, Saint-Petersburg, Russia.

The paper studies the correlation of the steel pipe mechanical stresses with its magnetic field parameters. Stress states in the pipe metal can lead to the serious accidents, but they are difficult diagnosed at the predestruction stage. This question was studied by different authors, in particular Aginey R.V. [1] Kuleev V.G. [5, 6], Lopatin V.V. [5]. During the experiment on Mining University basis, and the calculation in the software package ANSYS MAGNETOSTATIC 15.0 authors obtained three mutually orthogonal components of the magnetic induction distribution graphs of unloaded and loaded horizontal or slightly inclined steel pipe placed in a magnetic field of the Earth. The data are in good qualitative correlation with the calculated distribution of the stray fields of the magnetization, previously obtained by other authors [5]. It was found that the dependence of the field strength are complex and increasing load leads increasing of the extrema absolute values. The results can be used to magnetograms interpretation obtained by diagnostic examination of pipelines, determining stress states in the metal pipe, and good agreement of the magnetic induction experimental and calculated values enables the use of ANSYS MAGNETOSTATIC to calculate the magnetic field distribution under loading in more complex cases, than considered in this article.

Key words: stress stage, pipeline, coercive force, magnetic induction, diagnostic, pipeline, ANSYS.

REFERENCES

1. Aginey R.V. *Razrabotka metodiki otsenki napryazhennogo sostoyaniya neftegazoprovodov po koersitivnoy sile metall* (Разработка методики оценки напряженного состояния нефтегазопроводов по коэрцитивной силе металл), Candidate's thesis, Ukhta, UGTU, 2005, 21 p.
2. Gradientometr НВ0204.5А. Komplekt ekspluatatsionnykh dokumentov (Градиентометр НВ0204.5А. Комплект эксплуатационных документов), ООО «НПО ЭНТ», 35 p.
3. Mikheev M.N., Morozova V.M., Morozov A.P. *Defektoskopiya*. 1978, no 1, pp. 14–22.
4. Zatsepin N.N. *Kontrol'. Diagnostika*. 2006, no 12, pp. 62–69.
5. Kuleev V.G., Lopatin V.V. *Defektoskopiya*. 2003, no 5, pp. 61–67.
6. Kuleev V.G. *Defektoskopiya*. 2002, no 10, pp. 48–62.