

*Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2022. Вып. 1 (135). С. 114-126. ISSN 1998-8443 (print)*

*Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products. 2022. Issue 1 (135). P. 114-126. ISSN 1998-8443 (print)*

Научная статья

УДК 621.77.01

doi: 10.17122/ntj-oil-2022-1-114-126

## ИЗМЕНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ В ВЕРШИНЕ ТРЕЩИНОПОДОБНОГО ДЕФЕКТА ТРУБЫ, ПОДВЕРЖЕННОЙ ИЗГИБНЫМ ДЕФОРМАЦИЯМ, ПОСЛЕ ПРОВЕДЕНИЯ ВНУТРИТРУБНОЙ МАГНИТНОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ

Айгуль Ириковна Ильясова<sup>1</sup>, Евгений Анатольевич Наумкин<sup>2</sup>,  
Искандер Рустемович Кузеев<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup>Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

<sup>1</sup>[Bikbulatova@inbox.ru](mailto:Bikbulatova@inbox.ru)

<sup>2</sup>[y-naumkin@mail.ru](mailto:y-naumkin@mail.ru)

<sup>3</sup>[123tmo@mail.ru](mailto:123tmo@mail.ru)

Автор, ответственный за переписку: Айгуль Ириковна Ильясова, [Bikbulatova@inbox.ru](mailto:Bikbulatova@inbox.ru)

**Аннотация.** В целях обеспечения безопасности магистральных трубопроводов принято выполнять техническое диагностирование неразрушающими методами контроля. Одним из видов контроля является внутритрубная магнитная дефектоскопия, которую проводят, как правило, на магистральных газопроводах высокого давления. Намагничивание стенки трубопровода обеспечивается при помощи постоянных магнитов при прохождении дефектоскопа. После этого в материале возникает остаточная намагниченность, которая, в свою очередь, инициирует упругое поле механических деформаций, что оказывает существенное влияние на распределение напряжений в окрестности вершины трещины.

На это, в частности, в своих исследованиях указывал ряд авторов, таких как Y. Shindo, Д.Д. Асанян, Б.А. Кудрявцев, А.А. Асланян и др. Они демонстрировали влияние магнитного поля на напряженно-деформированное состояние в окрестности вершины трещины, причем оно служило как усиливающим фактором, так и уменьшающим. В работах Y. Shindo рассматривалось напряженно-деформированное состояние в окрестности трещины ферромагнитных материалов, и получены формулы коэффициентов интенсивности напряжений в теле с трещиной под действием внешнего магнитного поля.

Такая неоднозначность результатов исследований требует постановки специальных экспериментов для установления закономерностей распределения характеристик напряженности магнитного поля по поверхности трубного образца в зоне концентратора напряжений. Именно там возникает наибольшая вероятность формирования и развития трещин под воздействием изгибающей нагрузки и магнитного поля при длительном их действии.

Произведен расчет коэффициента интенсивности напряжений в зависимости от действия изгибающих напряжений в трубопроводах по ОСТ 153-39.4-010-2002, а от магнитного воздействия по Y. Shindo.

Разработан и изготовлен стенд, включающий в себя узлы создания изгибающей нагрузки и магнитного поля в виде движущегося снаряда внутри трубы.

Деформировали стальную трубу с концентратором напряжений и периодически подвергали воздействию магнитного поля три раза через каждые 20 сут. Изменения магнитных характеристик фиксировались на внешней поверхности трубы, их использовали при расчете коэффициента интенсивности напряжений.

Анализ результатов измерений показал, что магнитные воздействия, которые создаются при диагностировании труб методом внутритрубной магнитной дефектоскопии, вызывают повышение намагниченности металла, величина которой сохраняется длительное время. Сформировавшаяся намагниченность в металле данного объекта увеличивает значения коэффициента интенсивности напряжений в зоне концентрации напряжений, что не учитывается в стандартных методиках расчета коэффициента интенсивности напряжений.

---

---

**Ключевые слова:** магистральный трубопровод, внутритрубная магнитная дефектоскопия, изгибающие напряжения, напряженность магнитного поля, концентратор напряжений, намагниченность, коэффициент интенсивности напряжений

---

---

**Для цитирования:** Ильясова А. И., Наумкин Е. А., Кузеев И. Р. Изменение коэффициента интенсивности напряжений в вершине трещиноподобного дефекта трубы, подверженной изгибным деформациям, после проведения внутритрубной магнитной дефектоскопии // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2022. Вып. 1 (135), С. 114-126. <http://doi.10.17122/ntj-oil-2022-1-114-126>.

Original article

## CHANGE OF STRESS INTENSITY COEFFICIENT AT THE TIP OF A CRACK-LIKE DEFECT IN A PIPE SUBJECTED TO BENDING AFTER IN-LINE MAGNETIC FLAW DETECTION

Aigul I. Ilyasova<sup>1</sup>, Evgeniy A. Naumkin<sup>2</sup>, Iskander R. Kuzeev<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup>Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

<sup>1</sup>Bikbulatova@inbox.ru

<sup>2</sup>ynaumkin@mail.ru

<sup>3</sup>123tmo@mail.ru

Corresponding author: **Aigul I. Ilyasova**, [Bikbulatova@inbox.ru](mailto:Bikbulatova@inbox.ru)

**Abstract.** In order to ensure the safety of main pipelines, it is customary to perform technical diagnostics using non-destructive testing methods. One of the types of control is in-line magnetic flaw detection, which is carried out, as a rule, on high-pressure gas pipelines. Magnetization of the pipeline wall is provided by permanent magnets during the passage of the flaw detector. After that, residual magnetization appears in the material, which, in turn, initiates an elastic field of mechanical deformations, which has a significant effect on the stress distribution in the vicinity of the crack tip. This, in particular, was pointed out in their studies by a number of authors, such as Y. Shindo, D.D. Asanyan, B.A. Kudryavtsev, A.A. Aslanyan et al. They demonstrated the influence of the magnetic field on the stress-strain state in the vicinity of the crack tip, and it served both as an intensifying factor and as a decreasing one. In the works of Y. Shindo, the stress-strain state in the vicinity of a crack in ferromagnetic materials was considered, and formulas for the stress intensity factors in a body with a crack under the action of an external magnetic field were obtained.

Such ambiguity of the research results requires the setting up of special experiments to establish the regularities of the distribution of the characteristics of the magnetic field strength over the surface of the pipe sample in the zone of the stress concentrator.

It is there that the greatest probability of the formation and development of cracks occurs under the influence of a bending load and a magnetic field during their long-term action.

The stress intensity factor was calculated depending on the action of bending stresses in pipelines according to OST 153-39.4-010-2002, and on the magnetic effect according to Y. Shindo.

A stand was developed and manufactured, which includes units for creating a bending load and a magnetic field in the form of a moving projectile inside the pipe.

A steel pipe with a stress concentrator was deformed and periodically exposed to a magnetic field three times every 20 days. Changes in the magnetic characteristics were recorded on the outer surface of the pipe, and they were used in calculating the stress intensity factor.

An analysis of the measurement results showed that the magnetic effects that are created when diagnosing pipes by the method of in-line magnetic flaw detection cause an increase in the metal magnetization, the value of which remains for a long time. The formed magnetization in the metal of this object increases the values of the stress intensity factor in the stress concentration zone, which is not taken into account in standard methods for calculating the stress intensity factor.

---

---

**Keywords:** main pipeline, in-line magnetic flaw detection, bending stresses, magnetic field strength, stress concentrator, magnetization, stress intensity coefficient

---

---

**For citation:** Ilyasova A. I., Naumkin E. A., Kuzeev I. R. *Izmeneniye koeffitsiyenta intensivnosti napryazheniy v vershine treshchinopodobnogo defekta truby, podverzhennoy izgbnym deformatsiyam, posle provedeniya vnutritrubnoy magnitnoy defektoskopii.* [Change of Stress Intensity Coefficient at the Tip of a Crack-Like Defect in a Pipe Subjected to Bending after In-Line Magnetic Flaw Detection]. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefi i nefteproduktov - Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products.* 2022, Issue 1 (135), pp. 114-126. <http://doi.10.17122/ntj-oil-2022-1-114-126>.

*Введение*

Магистральные газопроводы относятся к особо опасным производственным объектам, поэтому обеспечение безопасной эксплуатации является приоритетной задачей. Согласно статистическим данным Ростехнадзора за 2020 г., из общего количества произошедших аварий на объектах магистрального газопровода 70 % связано с выбросом опасных веществ и разрушением трубопровода, 22 % аварий сопровождались взрывами, 44 % - возникновением пожаров [1]. При этом одним из главных факторов, влияющих на состояние безопасности опасных производственных объектов и возникновение аварийных ситуаций, таких как разгерметизация оборудования с выбросом опасного вещества, является накопление усталостных повреждений в металле, которые в пределе приводят к зарождению и развитию трещин.

Авторами работ [2, 3] представлен эксперимент, который заключается в воздействии магнитного поля 800 Гс на образцы из стали 4140 (отечественный аналог 40ХФА), подверженных циклическому нагружению. При этом в случае воздействия магнитного поля на испытываемые образцы до степени накопления усталостных повреждений  $N_i / N_p = 0,3$  долговечность сохранялась. В случае, когда намагничивание осуществлялось весь период циклического нагружения образцов, долговечность снижалась. При использовании образцов с надрезами и одновременным воздействием магнитного поля усталостная долговечность также снижалась.

В исследованиях [4-6] представлены результаты экспериментальных данных при циклических нагружениях образцов из стали 09Г2С, которые свидетельствуют о том, что в процессе накопления усталостных повреждений в области  $N_i / N_p = 0,3-0,4$  регистрируются изменения структуры материала и физических характеристик, увеличивающие вероятность разрушения в данной области.

Авторы статьи [7] рассматривали процесс страгивания трещины в конструкции пресс машины. В результатах исследований

было выявлено, что характер изменения магнитного поля в окрестности трещины также, как и изменение показаний давления масла на поршень, совпадает. Кроме того, было обнаружено, что с каждым циклом нагружения величина магнитного поля незначительно возрастала.

В результате данных измерений установлено, что через 6-7 циклов нагружений значение магнитного поля стабилизировалось. Важно отметить, что каждое увеличение длины трещины сопровождалось экстремальным увеличением величины магнитного поля.

В исследованиях [8-11] рассмотрены теоретические модели влияния механических напряжений на остаточную намагниченность. Авторы считают, что с ростом растягивающих напряжений продольная остаточная намагниченность насыщения достигает максимума, а затем медленно снижается до некоторого предельного значения в то время, как сжатие с одновременным воздействием внешнего магнитного поля приводит к монотонному снижению остаточной намагниченности насыщения.

Воздействие магнитным полем на материал магистрального газопровода может исходить не только от магнитного поля Земли, но и при техническом диагностировании методами внутритрубной магнитной дефектоскопии (ВМД). Согласно паспортным данным магнитного дефектоскопа [12] величина напряженности магнитного поля для толщины стенки 4,2-13,6 мм составляет от 10 до 30 кА/м, что приводит к значительной остаточной намагниченности материала газопровода [13].

Отсюда следует, что при воздействии на газопровод, изготовленный из углеродистых или низколегированных сталей, механических нагрузок в материале регистрируется изменение величины магнитных характеристик. Воздействие магнитным полем остается неучтенным фактором, который может увеличить напряжения в вершине трещины. По методу Y. Shindo [14, 15] можно рассчитать коэффициент интенсивности напряжений

(КИН) в зависимости от намагничивания ферромагнитного материала в вершине трещины, для этого необходимо после прохождения снаряда дефектоскопа, вызывающего магнитное насыщение металла, измерить длину трещины и величину напряженности магнитного поля стенок трубы.

При циклических испытаниях величина магнитного поля металла незначительно возрастает, но при формировании трещины его значение экстремально увеличивается. У образцов с концентратором напряжений, которые подвержены циклическому нагружению, из-за воздействия внешнего магнитного поля снижается величина усталостной долговечности [2, 3].

#### *Экспериментальные данные*

Для проведения эксперимента был использован трубный образец из стали 09Г2С длиной 1500 мм, рабочей длиной 815 мм, наружным диаметром 57 мм и толщиной стенки 4 мм. Предел текучести испытуемого образца равен  $\sigma_{0,2} = 342$  МПа, а предел прочности составляет  $\sigma_B = 470$  МПа.

На данный трубный образец был нанесен концентратор напряжений (рисунок 1, а) в виде надреза шириной 1 мм, длиной 20 мм, глубиной 2 мм, радиусом закругления в кончике надреза 0,5 мм.

При осуществлении эксперимента использован стенд [16] для создания в трубном образце сложнапряженного состояния, который представлен на рисунке 1, б. При проведении эксперимента стенд использован для создания контролируемого нагружения трубных образцов путем изгиба.

В целях реализации магнитного воздействия на трубный образец подобраны и установлены неодимовые магниты с такой же величиной напряженности магнитного поля, с какой осуществляется воздействие на газопроводы при проведении ВМД, то есть до технического насыщения.

Магнитное насыщение ферромагнетика согласно ГОСТ 19693-74 [17] составляет

400 А/м. В целях воздействия магнитным полем на трубный образец изготовлен модельный магнитный снаряд, который представлен на рисунке 2, а.

Известно, что средняя скорость ВМД согласно паспорту [12] составляет 2 м/с. В целях обеспечения подобия эксперимента реальному техническому диагностированию газопровода разработано и изготовлено устройство для передвижения магнитного снаряда, которое представлено на рисунке 2, б.

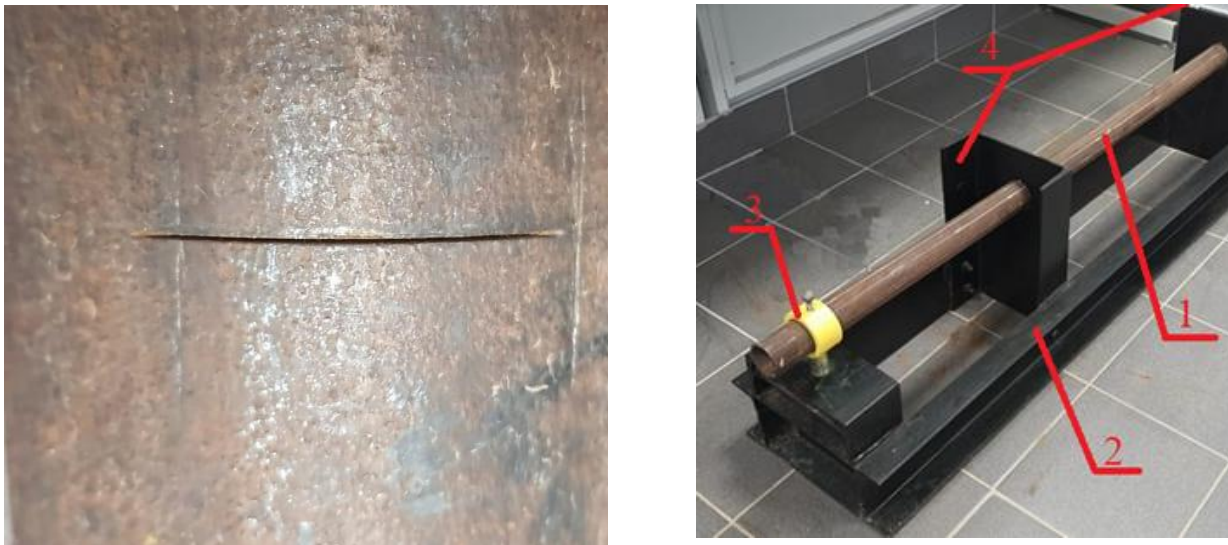
Данное устройство состоит из катушки (1), двигателя, редуктора (2) и блока питания (3).

Принцип действия устройства заключен в следующем: трос протягивается по внутренней полости трубы, после чего прикрепляется по двум отверстиям внутри модельного магнитного снаряда. Данное устройство устанавливается в конце трубы, и с помощью привода осуществляется движение модельного магнитного снаряда с заданной скоростью.

После того, как испытуемый образец был установлен на стенд, измерены величины напряженности магнитного поля измерителем концентрации напряжений ИКН-9М-12 [18] по 8 образующим с шагом 4 мм, то есть была измерена напряженность магнитного поля на трубном образце без воздействия магнитного поля и изгибающих напряжений. Затем трубный образец был подвержен изгибу, и проведены измерения напряженности магнитного поля с тем же шагом и по тем же образующим.

Изгибающие напряжения заданы 105 МПа, так как наличие надреза приводит к дополнительному увеличению максимальных напряжений в данной зоне.

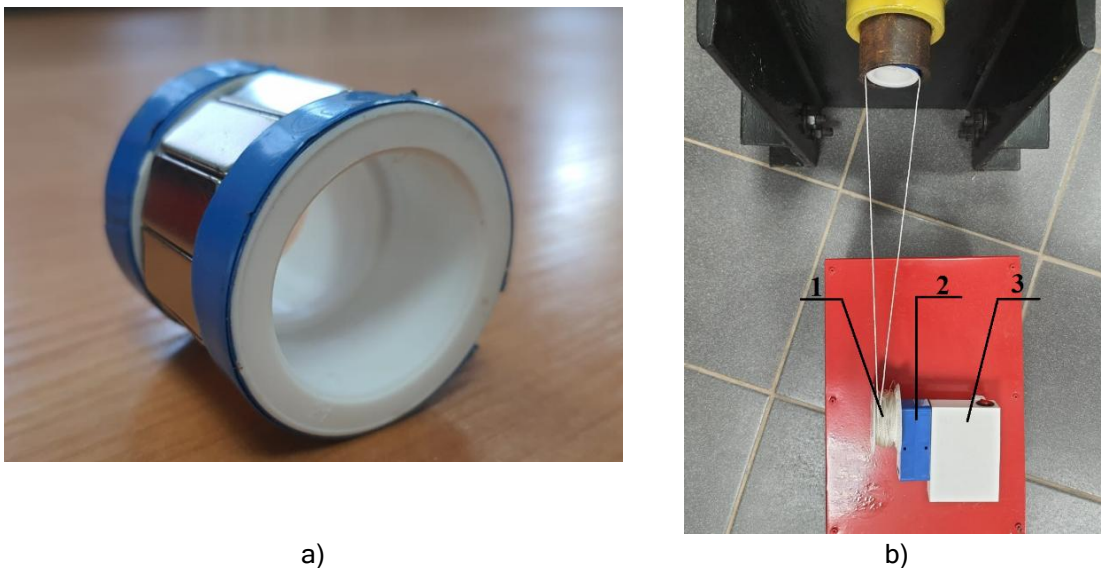
Деформации контролировались путем предварительного измерения прогиба индикатором часового типа. Далее трубный образец был намагничен 3 раза через каждые 20 дней модельным магнитным снарядом, после чего измерена напряженность магнитного поля трубы.



a)  
1 - трубный образец; 2 - станина; 3 - узел нагружения; 4 - опоры

**Рисунок 1.** Фото участка трубного образца с концентратором напряжений (а),  
стенд с установленным трубным образцом (б)

**Figure 1.** Photo of a pipe section with a stress concentrator (a),  
test stand with installed pipe sample (b)



**Рисунок 2.** Стенд для создания в трубном образце изгибающих напряжений:  
блок намагничивания (а) и устройство передвижения (б)

**Figure 2.** Test stand for creating bending stresses in a pipe sample:  
magnetization unit (a) and travel device (b)

Результаты проведенных исследований приведены на рисунках 3, 4.

На рисунке 3 в зоне надреза зарегистрирован экстремум из-за повышенных напряжений в вершине трещины. Кроме того, зарегистрирован экстремум в зоне захвата трубного образца, который представляет собой жесткую заделку.

На рисунке 4 представлена гистограмма изменения напряженности магнитного поля в зоне надреза при различных этапах проведения эксперимента (при создании изгибающих напряжений, после намагничивания образца, спустя 20 сут после I намагничивания, спустя 20 сут после II намагничивания, спустя 20 сут после III намагничивания). Поскольку в трубном образце имеется концентратор напряжений, то в целях установления максимальных напряжений необходимо рассчитать значения  $K_I$  по методике [19].

Коэффициент интенсивности напряжений определяется по формуле:

$$K_I = \sigma_p \sqrt{h} \cdot Y(\eta), \quad (1)$$

$$K_I = 23,55 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0,5}.$$

В связи с тем, что авторами [20-22] установлен факт увеличения КИН от действия магнитного поля, поэтому в данной работе проведен расчет КИН по методу Y. Shindo с использованием сингулярных интервальных уравнений [14, 15]. При этом необходима информация о следующих величинах:

$\chi$  - магнитная восприимчивость ферромагнетиков, которая зависит от напряженности магнитного поля  $H$  и марки стали [23];

$B_0$  - магнитная индукция 0,4Тл;

$G$  - модуль сдвига 77000 МПа для стали 09Г2С;

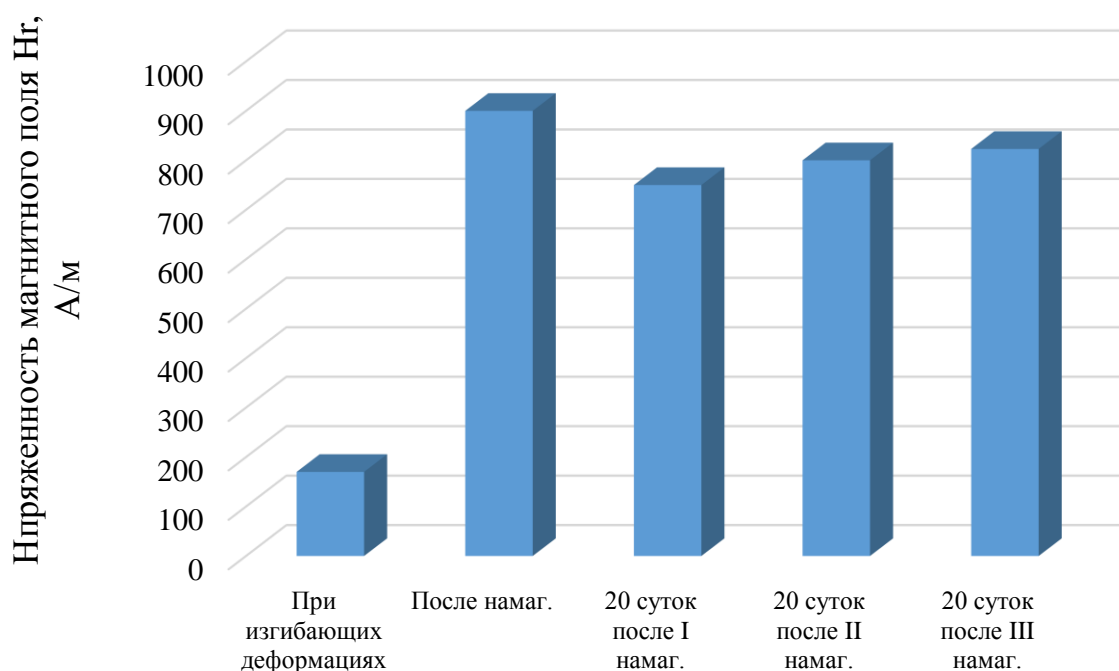
$\mu_0$  - магнитная постоянная,  
 $4\pi \cdot 10^{-7} = 12,56 \cdot 10^{-7} \text{ Н/А}^2$ ;

$\nu$  - коэффициент Пуассона для стали 09Г2С.



Рисунок 3. Зависимость результирующей напряженности магнитного поля от длины рабочей зоны трубного образца при изгибающих деформациях

Figure 3. Dependence of the resulting magnetic field strength on the length of the pipe working zone under bending deformations



**Рисунок 4.** Изменение напряженности магнитного поля в зоне надреза при различных этапах исследования

**Figure 4.** Change in the magnetic field strength in the incision zone at different stages of the study

Напряженности магнитного поля  $H_r$  в разные этапы намагничивания,  $\mu$ ,  $\chi$ , найденные с помощью кривой намагничивания [24], представлены таблице 1.

$$b_c^2 = \frac{Hr^2}{G}, \quad (2)$$

где  $b_c^2$  – коэффициент магнитоупругой связи;

$$P_{h0} = -(\chi(\chi - 2)B_0^2)[2(1 + \chi)^2\mu_0]^{-1}, \quad (3)$$

где  $P_{h0}$  – приложенная сила от магнитного воздействия.

Далее все рассчитанные коэффициенты используются для расчета коэффициента

интенсивности напряжений от действия магнитного поля:

$$K_I^{(m)} = \frac{2 \cdot [2(1+\chi)^2 + [2(1-\nu) + (5-6\nu)\chi]\chi b_c^2] P_{h0} \sqrt{b}}{\pi [2(1+\chi)^2 + [1-2\nu-2(1-\nu)\chi]\chi^2 b_c^2} \quad (4)$$

Затем, используя (4) и (1) для трещины испытываемого образца, получаем значение произведения КИН от воздействия магнитного поля и изгибающих напряжений:

$$K_I^{(m)} \cdot K_I = \frac{2 \cdot [2(1+\chi)^2 + [2(1-\nu) + (5-6\nu)\chi]\chi b_c^2] P_{h0} \sqrt{b}}{\pi [2(1+\chi)^2 + [1-2\nu-2(1-\nu)\chi]\chi^2 b_c^2} \cdot K_I \quad (5)$$

Результаты расчетов при различных этапах намагничивания образца представлены в таблице 1.

По результатам расчетов получили увеличение значений КИН по методу Y. Shindo и увеличение суммарных значений



КИН от механических и магнитных воздействий.

Известно [13], что при намагничивании металла до технического насыщения высокое значение магнитных характеристик сохраняется длительный период. При этом известно [20-22], что воздействие механических нагрузок также приводит к увеличению значений магнитных характеристик. Отсюда следует, что, если ферромагнитные материалы подвержены механическим нагрузкам и одновременному воздействию магнитного поля, то это приводит к более высокому значению напряженно-деформированного состояния в вершине трещины по сравнению с отсутствием действия магнитного поля. Данный эффект исследовал Y. Shindo [14, 15, 20-23], который применил линейную теорию магнитоупругости к трещинам различной геометрии, чтобы изучить влияние магнитного поля на КИН в ферромагнитных материалах при растягивающей нагрузке, было показано, что намагничивание материала увеличивает значение КИН. Данное изменение механических свойств ферромагнетика объясняется таким явлением, как магнитострикция, при котором материал изменяет свою длину под действием магнитного поля.

В результате вращения и переориентации малых магнитных доменов в материале происходят внутренние деформации, приводящие к растяжению исследуемого объекта в направлении магнитного поля [23].

Реальные трубопроводы, как правило, испытывают неравномерный характер нагружения и работают в циклическом режиме. При длительной эксплуатации в материале трубопровода происходит процесс роста трещин, длина которой имеет критическую величину, зависящую от напряжения в стенке и КИН в вершине трещины. Как описывалось выше, воздействие механических нагрузок и одновременное намагничивание приводят к высокому значению КИН. Однако данный факт не учитывается в стандартных методиках расчета остаточного ресурса [19]. Кроме того, при длительной эксплуатации критический коэффициент интенсивности нагружения ( $K_{IC}$ ) снижается, что отражено в работах [25, 4]. При увеличении значений КИН и снижении коэффициента  $K_{IC}$  наступает момент достижения КИН критического значения, что приводит к возникновению аварийной ситуации с разрывом трубопровода.

**Таблица 1. Результаты расчетов**  
**Table 1. Calculation results**

Этапы намагничивания	Магнитные характеристики					Коэффициенты интенсивности напряжений		
	$H_r$ , А/м	$\chi$	$\mu$	$P_{h0}$	$b_c^2$	$K_I$ , МПа·м <sup>0,5</sup>	$K_{Imb}$ , МПа·м <sup>0,5</sup>	$K_I \times K_{Imb}$ , МПа·м <sup>0,5</sup>
После намагничивания	900	799	800	-63376	10.51	23,55	3,93	92,55
20 сут после I намагничивания	750	849	850	-63394	7,3	23,55	3,74	88,077
20 сут после II намагничивания	800	819	820	-63383	8,31	23,55	3,89	91,6
20 сут после III намагничивания	823	816	817	-63382	8,79	23,55	3,89	91,6

### Выводы

В целях обеспечения безаварийной работы на магистральных газопроводах стенки трубопровода инспектируются внутритрубной магнитной дефектоскопией. Данный вид диагностирования намагничивает трубопровод до технического насыщения. Анализ литературы показал, что намагниченность металла изменяет значения КИН в вершине трещин.

В связи с этим в данной работе была рассчитана величина КИН по методу Y. Shindo на основе результатов предварительного измерения напряженности магнитного поля с наружной поверхности трубного образца и геометрических размеров трещины.

Анализ результатов исследования показал, что значения КИН с учетом намагничивания, вызванного внутритрубной магнитной дефектоскопией, значительно

выше, чем без воздействия магнитного поля. Кроме того, величина намагничивания металла трубы сохраняется длительное время, причем в зоне концентратора напряжений показано, что значение напряженности магнитного поля выше, чем в отдалении от данных зон. Это приводит к тому, что имеющиеся небольшие трещины в магистральных газопроводах, которые не были обнаружены диагностическим снарядами или не достигли критического размера, способны увеличиваться после проведения технического диагностирования.

В связи с этим в целях обеспечения промышленной безопасности и безотказной работы магистральных газопроводов полученные значения КИН в вершине трещины при наличии остаточной намагниченности до технического насыщения необходимо учитывать при расчете остаточного ресурса.

### Список источников

1. Годовой отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2020 году. М.: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2021. 369 с.
2. Celik A., Yetim A.F., Alsaran A., Karakan M. Effect of Magnetic Treatment on Fatigue Life of AISI 4140 Steel // *Materials and Design*. 2005. Vol. 26. Issue 8. P. 700-704. DOI: 0.1016/j.matdes.2004.09.003.
3. Sokolenko V.I., Mats A.V., Karas V.I., Okovit V.S., Chernyak N.A., Gorbatenko V.M. Changes in Physical-Mechanical Properties and Structure of Ferritic-Pearlitic Steel 15Kh2NMFA Caused by Severe Low-Temperature Deformation and Exposure to Alternating Magnetic Field // *Low Temperature Physics*. 2015. Vol. 41. Issue 4. P. 399-404. DOI: 10.1063/1.4916075.
4. Кузеев М.И., Наумкин Е.А. Усталостное повреждение стали 09Г2С // Проблемы строительного комплекса России: матер. X международ. науч.-технич. конф. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2006. Т. 1. С. 156-157.
5. Кузеев И.Р., Наумкин Е.А., Панкратьев С.А. Особенности локальной области 0,3-0,4 Ni/Np усталостной поврежденности металла // *Мировое сообщество: проблемы и пути решения: сб. науч. ст.* Уфа: Изд-во УГНТУ, 2007. С. 85-88.
6. Наумкин Е.А., Кузеев И.Р., Прохоров А.Е.

### References

1. *Godovoi otchet o deyatelnosti Federal'noi sluzhby po ekologicheskemu, tekhnologicheskemu i atomnomu nadzoru v 2020 godu* [Annual Report on the Activities of the Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service in 2020]. Moscow, Federal'naya sluzhba po ekologicheskemu, tekhnologicheskemu i atomnomu nadzoru Publ., 2021. 369 p. [in Russian].
2. Celik A., Yetim A.F., Alsaran A., Karakan M. Effect of Magnetic Treatment on Fatigue Life of AISI 4140 Steel. *Materials and Design*, 2005, Vol. 26, Issue 8, pp. 700-704. DOI: 0.1016/j.matdes.2004.09.003.
3. Sokolenko V.I., Mats A.V., Karas V.I., Okovit V.S., Chernyak N.A., Gorbatenko V.M. Changes in Physical-Mechanical Properties and Structure of Ferritic-Pearlitic Steel 15Kh2NMFA Caused by Severe Low-Temperature Deformation and Exposure to Alternating Magnetic Field. *Low Temperature Physics*, 2015, Vol. 41, Issue 4, pp. 399-404. DOI: 10.1063/1.4916075.
4. Kuzeev M.I., Naumkin E.A. Ustalostnoe povrezhdenie stali 09G2S [Fatigue Damage of Steel 09G2S]. *Materialy Kh Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Problemy stroitel'nogo kompleksa Rossii»* [Proceedings of the X International Scientific and Technical Conference «Problems of the Russian Construction Complex»]. Ufa, UGNTU Publ., 2006, Vol. 1, pp. 156-157. [in Russian].

Оценка степени поврежденности стали 09Г2С в условиях малоциклового усталости с учетом параметров поверхностной энергии // *Мировое общество: проблемы и пути решения: сб. науч. ст.* Уфа: Изд-во УГНТУ, 2005. С. 67-74.

7. Махутов Н.А., Дубов А.А., Денисов А.С. Исследование статических и циклических деформаций с использованием метода магнитной памяти металла // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2008. Т. 74. № 3. С. 42-46.

8. Афремов Л.Л., Панов А.В. Влияние механических напряжений на остаточную намагниченность насыщения системы наночастиц // *Физика металлов и металловедение*. 2008. Т. 106. № 3. С. 248-256.

9. Захаров В.Б., Боровкова М.В., Комаров В.А. Влияние внешних напряжений на коэрцитивную силу углеродистых сталей // *Дефектоскопия*. 1992. № 1. С. 41-46.

10. Горкунов Э.С., Царькова Т.В., Смирнов С.С., Вичужанин Д.И., Емельянов И.Г., Кузнецов В.Ю. Влияние отклонений от соосности между направлениями намагничивания и наложения механической нагрузки на результаты магнитного контроля упругих деформаций в сталях // *Дефектоскопия*. 2004. № 5. С. 40-52.

11. Кулеев В.Ф., Царькова Т.В., Ничипурок А.А. Исследование причин существенных различий коэрцитивной силы, остаточной намагниченности сталей в нагруженном состоянии при их пластическом растяжении // *Физика металлов и металловедение*. 2007. Т. 103. № 2. С. 136-146.

12. Инспекционный снаряд определения потери металла с высоким разрешением. Паспорт на оборудование. *Inspection Technologies*. 2007. 1 лист.

13. Загидулин Р.В., Мужичкий В.Ф. Оценка величины остаточного магнитного поля внутри трубопровода после контроля магнитным дефектоскопом // *Дефектоскопия*. 2003. № 7. С. 65-69.

14. Shindo Y. Magnetoelastic Interaction of a Soft Ferromagnetic Elastic Solid with a Penny-Shaped Crack in a Constant Axial Magnetic Field // *Journal of Applied Mechanics*. 1978. Vol. 45. Issue 2. P. 291-296. DOI: 10.1115/1.3424290.

15. Shindo Y. Singular Stresses in a Soft Ferromagnetic Material with a Flat Annular Crack // *Acta Mechanica*. 1983. Vol. 50. P. 50-56.

16. Пат. 184640 РФ, МПК G 01 N 3/08. Стенд для создания в трубном образце сложнонапряженного состояния / Е.А. Наумкин, А.Д. Мингажев, И.Р. Кузеев, Р.А. Амиров, Р.К. Давлеткулов, И.Ф. Махиянов, Д.И. Шарипов. 2018119209, Заявлено 24.05.2018; Оpubл. 01.11.2018.

17. ГОСТ Р 19693-74. Материалы магнитные. Термины и определения. М.: Госстандарт СССР, 1985. 34 с.

18. Измеритель концентраций напряжений ИКН-9М-12: Паспорт и инструкция по эксплуатации. М.: Энергодиагностика, 2010. 93 с.

19. ОСТ 153-39.4-010-2002. Методика определения остаточного ресурса нефтегазопромысло-

5. Kuzeev I.R., Naumkin E.A., Pankratev S.A. Osobennosti lokal'noi oblasti 0,3-0,4 Ni/Np ustalostnoi povrezhdennosti metalla [Features of the Local Area 0.3-0.4 Ni/Np of Metal Fatigue Damage]. *Sbornik nauchnykh statei «Mirovye soobshchestvo: problemy i puti resheniya»* [Collection of Scientific Articles «World Community: Problems and Solutions»]. Ufa, UGNTU Publ., 2007, pp. 85-88. [in Russian].

6. Naumkin E.A., Kuzeev I.R., Prokhorov A.E. Otsenka stepeni povrezhdennosti stali 09G2S v usloviyakh malotsiklovoi ustalosti s uchetom parametrov poverkhnostnoi energii [Assessment of the Degree of Damage to Steel 09G2S Under Conditions of Low-Cycle Fatigue, Taking into Account the Parameters of Surface Energy]. *Sbornik nauchnykh statei «Mirovye soobshchestvo: problemy i puti resheniya»* [Collection of Scientific Articles «World Community: Problems and Solutions»]. Ufa, UGNTU Publ., 2005, pp. 67-74. [in Russian].

7. Makhutov N.A., Dubov A.A., Denisov A.S. Issledovanie staticheskikh i tsiklicheskikh deformatsii s ispol'zovaniem metoda magnitnoi pamyati metalla [Study of Static and Cyclic Deformations Using the Metal Magnetic Memory Method]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov - Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*, 2008, Vol. 74, No. 3, pp. 42-46. [in Russian].

8. Afremov L.L., Panov A.V. Vliyanie mekhanicheskikh napryazhenii na ostatochnuyu namagnichennost' nasyshcheniya sistemy nanochastits [Effect of Mechanical Stresses on the Saturation Remanence of a System of Nanoparticles]. *Fizika metallov i metallovedenie - Fizika Metallov i Metallovedenie*, 2008, Vol. 106, No. 3, pp. 248-256. [in Russian].

9. Zakharov V.B., Borovkova M.V., Komarov V.A. Vliyanie vneshnikh napryazhenii na koertsitivnuyu silu uglerodistykh staley [Influence of External Stresses on the Coercive Force of Carbon Steels]. *Defektoskopiya - Defektoskopiya*, 1992, No. 1, pp. 41-46. [in Russian].

10. Gorkunov E.S., Tsarkova T.V., Smirnov S.S., Vichuzhanin D.I., Emelyanov I.G., Kuznetsov V.Yu. Vliyanie otklonenii ot soosnosti mezhdru napravleniyami namagnichivaniya i nalozheniya mekhanicheskoi nagruzki na rezul'taty magnitnogo kontrolya uprugikh deformatsii v stalyakh [Effect of Deviation from Coaxiality between the Directions of Magnetization and Mechanical Strain on the Results of Magnetic Testing of Elastic Strain in Steels]. *Defektoskopiya - Defektoskopiya*, 2004, No. 5, pp. 40-52. [in Russian].

11. Kuleev V.F., Tsarkova T.V., Nichipuruk A.A. Issledovanie prichin sushchestvennykh razlichii koertsitivnoi sily, ostatochnoi namagnichennosti staley v nagruzhenom sostoyanii pri ikh plasticheskom rastyazhenii [On the Origin of Essential Differences in the Coercive Force, Remanence, and Initial Permeability of Ferromagnetic Steels in the Loaded and Unloaded States Upon Plastic Tension]. *Fizika metallov i metallovedenie - Fizika Metallov i*

вых трубопроводов и трубопроводов головных сооружений. М.: Министерство энергетики РФ, 2002. 57 с.

20. Brown W.F.Jr. Magnetoelastic Interactions. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1966. 156 p. DOI: 10.1007/978-3-642-87396-6.

21. Shindo Y. The Linear Magnetoelastic Problem for a Soft Ferromagnetic Elastic Solid with a Finite Crack // *Journal of Applied Mechanics*. 1977. Vol. 44. Issue 1. P. 47-50. DOI: 10.1115/1.3424012.

22. Shindo Y. Singular Stresses in a Soft Ferromagnetic Elastic Solid with Two Coplanar Griffith Cracks // *International Journal of Solids and Structures*. 1980. Vol. 16. Issue 6. P. 537-543. DOI: 10.1016/0020-7683(80)90004-9.

23. Engdahl G. Handbook of Giant Magnetostrictive Materials. San Diego: Academic Press, 2000. 388 p. DOI: 10.1016/B978-0-12-238640-4.X5014-1.

24. Харитонов И.А., Родякина Р.В., Гончаров А.Л. Исследование магнитных свойств сталей различных структурных классов в слабых магнитных полях, характерных для условий генерации термоэлектрических токов при электронно-лучевой сварке // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. 2019. Т. 7. № 2. С. 35-40. URL: <https://journals.i-publ.ru/index.php/IndEng/article/view/2891> (дата обращения: 13.01.2022). DOI: 10.24892/RIJIE/20190206.

25. Наумкин Е.А. Методология прогнозирования ресурса нефтегазового оборудования, эксплуатируемого в условиях циклического нагружения, на стадии проектирования и эксплуатации: дис. ... д-ра техн. наук. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2011. 224 с.

*Metallovedenie*, 2007, Vol. 103, No. 2, pp. 136-146. [in Russian].

12. *Inspektsionnyi snaryad opredeleniya poteri metalla s vysokim razresheniem. Passport na oborudovanie* [Metal Loss Inspection Tool with High Resolution. Passport for Equipment]. Inspection Technologies. 2007. 1 Sheet. [in Russian].

13. Zagidulin R.V., Muzhitskii V.F. Otsenka velichiny ostatochnogo magnitnogo polya vnutri truboprovoda posle kontrolya magnitnym defektoskopom [Estimation of the Residual Magnetic Field Strength Inside a Pipeline after Testing by a Magnetic Flaw Detector]. *Defektoskopiya - Defektoskopiya*, 2003, No. 7, pp. 65-69. [in Russian].

14. Shindo Y. Magnetoelastic Interaction of a Soft Ferromagnetic Elastic Solid with a Penny-Shaped Crack in a Constant Axial Magnetic Field. *Journal of Applied Mechanics*, 1978, Vol. 45, Issue 2, pp. 291-296. DOI: 10.1115/1.3424290.

15. Shindo Y. Singular Stresses in a Soft Ferromagnetic Material with a Flat Annular Crack. *Acta Mechanica*, 1983, Vol. 50, pp. 50-56.

16. Naumkin E.A., Mingazhev A.D., Kuzeev I.R., Amirov R.A., Davletkulov R.K., Makhyanov I.F., Sharipov D.I. *Stend dlya sozdaniya v trubnom obratse slozhnonapryazhennogo sostoyaniya* [Stand for Creating a Complex Stressed State in a Pipe Specimen]. Patent RF, No. 184640, 2018. [in Russian].

17. *GOST R 19693-74. Materialy magnitnye. Terminy i opredeleniya* [State Standard R 19693-74. Magnetic Materials. Terms and Definitions]. Moscow, Gosstandart SSSR Publ., 1985. 34 p. [in Russian].

18. *Izmeritel' kontsentratsii napryazhenii IKN-9M-12: Passport i instruktsiya po ekspluatatsii* [Stress Concentration Meter IKN-9M-12: Passport and Operating Instructions]. Moscow, Energodiagnostika Publ., 2010. 93 p. [in Russian].

19. *OST 153-39.4-010-2002. Metodika opredeleniya ostatochnogo resursa neftegazopromyslovykh truboprovodov i truboprovodov glavnykh sooruzhenii* [OST 153-39.4-010-2002. Methodology for Determining the Residual Life of Oil and Gas Field Pipelines and Pipelines of Head Structures]. Moscow, Ministerstvo energetiki RF Publ., 2002. 57 p. [in Russian].

20. Brown W.F.Jr. *Magnetoelastic Interactions*. Berlin, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1966. 156 p. DOI: 10.1007/978-3-642-87396-6.

21. Shindo Y. The Linear Magnetoelastic Problem for a Soft Ferromagnetic Elastic Solid with a Finite Crack. *Journal of Applied Mechanics*, 1977, Vol. 44, Issue 1, pp. 47-50. DOI: 10.1115/1.3424012.

22. Shindo Y. Singular Stresses in a Soft Ferromagnetic Elastic Solid with Two Coplanar Griffith Cracks. *International Journal of Solids and Structures*, 1980, Vol. 16, Issue 6, pp. 537-543. DOI: 10.1016/0020-7683(80)90004-9.

23. Engdahl G. *Handbook of Giant Magnetostrictive Materials*. San Diego, Academic Press, 2000. 388 p. DOI: 10.1016/B978-0-12-238640-4.X5014-1.

24. Kharitonov I.A., Rodyakina R.V., Goncharov A.L. Issledovanie magnitnykh svoistv staley razlichnykh strukturnykh klassov v slabykh magnitnykh polyakh, kharakternykh dlya uslovii generatsii termoelektricheskikh tokov pri elektronno-luchevoi svarke [Investigation of Magnetic Properties of Various Structural Classes Steels in Weak Magnetic Fields Characteristic for Generation of Thermoelectric Currents in Electron Beam Wwelding]. *Mashinostroenie: setevoi elektronnyi nauchnyi zhurnal - Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2019, Vol. 7, No. 2, pp. 35-40. Available at: <https://journals.i-publ.ru/index.php/IndEng/article/view/2891> (accessed 13.01.2022). DOI: 10.24892/RIJIE/20190206. [in Russian].

25. Naumkin E.A. *Metodologiya prognozirovaniya resursa neftegazovogo oborudovaniya, ekspluatiruemogo v usloviyakh tsiklicheskogo nagruzeniya, na stadii proektirovaniya i ekspluatatsii: dis. d-ra tekhn. nauk* [Methodology for Predicting the Resource of Oil and Gas Equipment Operated Under Cyclic Loading Conditions at the Design and Operation Stage: Doct. Engin. Sci. Diss.]. Ufa, UGNTU Publ., 2011. 224 p. [in Russian].

#### Информация об авторах

• Ильясова Айгуль Ириковна  
Уфимский государственный нефтяной  
технический университет  
Преподаватель кафедры «Промышленная  
безопасность и охрана труда»  
Россия, 450064, Уфа, ул. Космонавтов, 1  
e-mail: Bikbulatova@inbox.ru

• Наумкин Евгений Анатольевич, д-р техн. наук,  
доцент  
Уфимский государственный нефтяной  
технический университет  
Профессор кафедры «Технологические машины  
и оборудование»  
Россия, 450064, Уфа, ул. Космонавтов, 1  
e-mail: ynaumkin@mail.ru

• Кузеев Искандер Рустемович, д-р техн. наук,  
профессор  
Уфимский государственный нефтяной  
технический университет  
Заведующий кафедрой «Технологические  
машины и оборудование»  
Россия, 450064, Уфа, ул. Космонавтов, 1  
e-mail: 123tmo@mail.ru

#### Information about the authors

• Ilyasova Aigul I.  
Ufa State Petroleum Technological University  
Lecturer of Industrial Safety and Labor Protection  
Department  
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450064, Russia  
e-mail: Bikbulatova@inbox.ru

• Naumkin Evgeniy A., Doctor of Engineering  
Sciences, Associate Professor  
Ufa State Petroleum Technological University  
Professor of Process Machinery and Equipment  
Department  
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450064, Russia  
e-mail: ynaumkin@mail.ru

• Kuzeev Iskander R., Doctor of Engineering  
Sciences, Professor  
Ufa State Petroleum Technological University  
Head of Process Machinery and Equipment  
Department  
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450064, Russia  
e-mail: 123tmo@mail.ru

Статья поступила в редакцию 20.12.2021; одобрена после рецензирования 10.01.2022; принята к публикации 10.01.2022.

The article was submitted 20.12.2021; approved after reviewing 10.01.2022; accepted for publication 10.01.2022.