ИЗМЕНЕНИЕ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН В МАТЕРИАЛЕ ЗМЕЕВИКА РЕАКЦИОННОЙ ПЕЧИ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

CHANGE OF ULTRASONIC WAVES SPEED SPREADING IN A MATERIAL OF THE REACTION FURNACE COIL DURING OPERATION PROCESS

Д. Н. Шерматов
Jamshed N. Shermatov

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

И. Р. Кузеев
Iskander R. Kuzeev

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

Е. А. Наумкин
Evgeny A. Naumkin

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

А. В. Рубцов
Aleksey V. Rubtsov

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

Пиролиз, или крекинг с водяным паром, является основным процессом, используемым для производства олефинов. Термическое разложение органических соединений происходит в змеевиках, изготовленных из высоколегированных сплавов. Условия работы печей считаются наиболее агрессивными с точки зрения воздействия на металл труб, с одной стороны — химически активный продукт, а с другой — жесткое термическое воздействие. Высокая активность углерода на внутренней поверхности трубы, где протекают химические реакции, приводит к образованию и отложению кокса на внутренней поверхности реакционных труб. Отложение кокса увеличивает расход топлива, снижает производительность печи, а также приводит к интенсивной диффузии углерода в глубь металла. Наружная поверхность трубы также подвергается воздействию высоких температур и печных газов, в результате чего протекает процесс обезуглероживания. Диффузионные процессы, в свою очередь, приводят к изменению структуры стали и образованию карбидов и интерметаллидов, которых не было в составе материала в состоянии поставки. По существу возникает «новая» сталь, и в результате фазовых превращений материала изменяются эксплуатационные характеристики змеевика реакционной печи. Чтобы обезопасить змеевик от разрушения проводится экспертиза промышленной безопасности, по результатам которой оценивается остаточный ресурс.

При оценке остаточного ресурса основной информацией является измеренная толщина стенки, которая проводится согласно СТО СА-03-004-2009. Однако такой подход не охватывает контроль толщины на всей площади поверхности змеевика. Зачастую наиболее

Ключевые слова

скорость ультразвука; змеевик;
микроструктура; аустенитная сталь;
науглероживание;
реакционная печь

подверженные деградации материала участки не контролируются, поэтому определение данных зон современными неразрушающими методами контроля является необходимым. Ранее было показано, что в поверхностных слоях змеевиков после эксплуатации формируются ферромагнитные свойства и магнитные методы измерения чувствительны к потенциально опасным зонам, поэтому предложено контроль толщины стенки осуществлять в тех местах, где проявляются магнитные свойства.

Измерение толщины стенки требует калибровки скорости ультразвука, которая, как правило, выбирается из справочных источников. Однако при этом не учитывается тот факт, что скорость ультразвуковых волн в процессе эксплуатации изменяется. Поэтому остается актуальным определение истинной толщины стенки, так как это позволит получать более точные результаты при оценке остаточного ресурса.

В связи с этим объектом исследования были выбраны фрагменты труб реакционной печи пиролиза из стали 20Х25Н20С2, отработавшие 0, 750, 1300, 8000 и 10000 ч.

В статье показаны результаты исследования закономерностей изменения скорости ультразвуковых продольных волн, которые были измерены по толщине стенки змеевика до и после снятия поверхностного слоя, проявляющего ферромагнитные свойства материала реакционной трубы. Анализ результатов измерения показал, что с увеличением длительности эксплуатации скорость ультразвука в материале стенки снижается. Было обнаружено, что при достижении 10000 ч данное снижение составило 16 % по сравнению с состоянием поставки. Также зарегистрировано снижение скорости ультразвука до 8 % при полном удалении науглероженного и обезуглероженного слоев с поверхности металла труб.

В целях установления причин, влияющих на снижение скорости ультразвука в стенке змеевика, были проведены металлографические исследования, которые показали, что в объемной части происходят структурные изменения. В приповерхностной зоне было обнаружено образование большого количества пустот, а в объемной части выявлены поры, которые играют основную роль в снижении продольных ультразвуковых волн.

Результаты проведенных исследований могут применяться при оценке технического состояния и разработке критерия отбраковки змеевиков реакционных печей.

Pyrolysis, or steam cracking, is the main process used to produce olefins. Thermal decomposition of organic compounds occurs in highly alloyed coils. Operating conditions of the furnaces are considered the most aggressive in terms of the influence on the metal pipes, on the one hand a chemically active product, and on the other a rigid thermal effect. High carbon activity on the inner surface of the pipe, where chemical reactions occur, leads to the formation and deposition of coke on the inner surface of the reaction tubes. Coke deposition increases fuel consumption, reduces furnace productivity, and also leads to intense diffusion of carbon into the metal. The outer surface of the pipe is also exposed to high temperatures and furnace gases, resulting in a decarburization process. Diffusion processes, in turn, lead to a change in the structure of steel and the formation of carbides and intermetallic compounds, which were not in the composition of the material in the delivery state. Essentially, «new» steel arises, and as a result of phase transformations of the material, the operational characteristics of the reaction furnace coil change. To protect the coil from destruction, an industrial safety examination is carried out, according to the results of which the residual resource is estimated.

When assessing the residual life, the basic information is the measured wall thickness, which is carried out according to STO SA-03-004-2009. However, this approach does not cover thickness control over the entire surface area of the coil. Often, the most prone to degradation of the material areas are not controlled, so the definition of these areas with modern non-destructive testing methods is necessary. It was shown earlier

Key words

ultrasound speed; coil; microstructure; austenitic steel; carburization; reaction furnace

that ferromagnetic properties and magnetic methods of measurement are sensitive to potentially dangerous zones in the surface layers of coils after operation, so it is proposed to control the wall thickness in those places where magnetic properties are manifested.

Wall thickness measurement requires calibration of the ultrasound velocity, which is usually selected from reference sources. However, this does not take into account the fact that the speed of ultrasonic waves during operation changes. Therefore, it remains vital to determine the true wall thickness, as this will provide more accurate results in assessing the residual life.

In this regard, as the object of the study there were selected fragments of pipes of the pyrolysis reaction furnace of steel 20X25H20C2, which were in operation 0, 750, 1300, 8000 and 10000 h.

The article shows the results of the study of the regularities of changes in the speed of ultrasonic longitudinal waves, which were measured by the thickness of the coil surface before and after removal of the surface layer exhibiting ferromagnetic properties of the reaction tube material. The analysis of the measurement results showed that the speed of ultrasound in the wall material decreases with increasing duration of operation. It was found that upon reaching 10,000 h, this reduction was 16 %, compared with the delivery condition. It was also recorded reduction in ultrasonic velocity up to 8 % in the complete removal of the carbonized and decarbonized layers from the surface of the metal pipe.

In order to determine the causes that affect the decrease in the speed of ultrasound in the wall of the coil, metallographic studies were conducted, which showed that structural changes occur in the bulk part. The formation of a large number of voids was found in the near-surface area, and in the bulk of the identified pairs, which play a major role in reducing the longitudinal ultrasonic waves.

The results of the research can be applied in the assessment of the technical condition and the development of the rejection criterion of reaction furnace coils.

Введение

Змеевики реакционных печей подвергаются воздействию высоких температур при взаимодействии с открытым пламенем горелок, давлений и объемных скоростей сырьевых потоков, а также конвективных токов разогретых дымовых газов с наружной стороны, которые способствуют развитию различных коррозионных и эрозионных процессов. А отложения на внутренних поверхностях труб продуктов конденсации снижают теплопередачу, увеличивают локальную температуру стенки и, тем самым, ускоряют процессы коксования продукта и деградации материала змеевиков. Одним из опасных факторов, который снижает эксплуатационные характеристики материала змеевика, является протекание диффузионных процессов в металле труб, что приводит к науглероживанию с внутренней стороны и обезуглероживанию поверхностных слоев с наружной стороны стенки [1, 2]. Образовавшиеся слои с различающимися свойствами увеличивают склонность металла к зарождению и развитию трещин, и поэтому их контроль является важнейшей задачей. В ранних исследованиях было установ-

лено, что в зонах, где произошли диффузионные явления с участием углерода, поверхностные слои проявляют ферромагнитные свойства [3]. Причем с увеличением глубины этого слоя значения магнитных характеристик повышались [3]. Поэтому появляется возможность двухпараметрического контроля: по магнитным измерениям устанавливаются наиболее изношенные зоны, в которых определяется реальная скорость ультразвуковых волн и толщина стенки трубы. Такой подход снижает риски потери прочности материала змеевиков, возникновения формоизменения труб, и, в конечном счете, разгерметизации и разрушения.

В настоящее время в целях определения остаточного ресурса змеевиков проводятся измерения толщины стенки труб согласно [4]; каждый плановый ремонт включает следующие операции: измерение толщин стенок труб и калачей (отводов) для радиантной части змеевиков печей в зонах максимального коррозионного износа; для конвекционной части змеевика печи — в доступных местах.

Перед контролем толщины стенки змеевика реакционной печи, осуществляемым

переносными ультразвуковыми толщиномерами, требуется проведение калибровки по известной скорости ультразвука, которая выбирается из справочника для конкретной стали. При этом такой подход не охватывает контроль толщины на всей площади змеевика, и зачастую наиболее подверженные деградации материалы участки не контролируются.

Следует также добавить, что многие исследователи отмечают высокую чувствительность ультразвуковых волн к изменениям, происходящим в микроструктуре материала [5–9]. Исследования [10, 11] показали, что в процессе ползучести материала змеевика образующиеся пустоты преимущественно формируются на границе раздела G-фаза/матрица, и это снижает скорость распространения ультразвуковых волн. В дальнейшем, когда эти пустоты соединяются, образуются микротрещины, которые могут привести к разрушению змеевика.

Наличие множественности факторов, влияющих на скорость распространения ультразвуковых волн, повышает актуальность раз-

работки метода, позволяющего оценить остаточный ресурс змеевика путем снижения неточности в определении толщины стенки с учетом закономерностей изменения скорости продольных ультразвуковых волн.

Оборудование и методика проведения эксперимента

Известно, что для изготовления змеевиков реакционных печей используют высоколегированные хромоникелевые стали аустенитного класса типов 20X23H18, 20X25H20C2, 45X25H20C2, 15X5M и др. В качестве объекта исследований для установления закономерностей распространения продольных ультразвуковых волн были использованы фрагменты змеевиков из аустенитной высоколегированной стали 20X25H20C2. Во время ремонтных работ были отобраны фрагменты змеевиков из пиролитических печей с различной длительностью эксплуатации, прослуживших от 750 до 10000 ч. Для сравнения полученных результатов использовали фрагмент трубы, который не был в эксплуатации.

Рисунок 1. Порядок изготовления образцов

На участках (рисунок 1), где были обнаружены проявления магнитных свойств [12], вырезаны кольца длиной 60 мм (б), которые в дальнейшем для удобства проведения эксперимента были разделены на 2 равные части (в). Измерения проводились на поверхности труб, без удаления науглероженной и обезуглероженной зон, и после снятия этих слоев, что осуществлялось согласно методике, приведенной в статье [3].

Измерение скорости продольных ультразвуковых волн осуществлялось ультразвуковым толщиномером Olympus 2MG-DL на образцах (з), в 10 точках. Перед измерением с

помощью микрометра (предел допускаемой погрешности $\delta = \pm 2$ мкм) измерялась толщина образца на каждом участке измерения. При этом обеспечивалась шероховатость поверхности образцов не более $R_z = 40$ мкм. Фиксация скорости ультразвука в контролируемом образце производилась в подрежиме прибора «Калибровка по Н».

Исследование структуры металла змеевика было осуществлено согласно ГОСТ 5639-82 [13] с использованием анализатора изображения Thixomet PRO, установленного на базе оптического микроскопа AXIO Scope.A1 фирмы Zeiss. Шлифование и полирование

образцов осуществлялось на автоматическом полировальном станке МЕТСО. Травление образцов проводилось с помощью приготовленного раствора с содержанием: HCl — 10 мл, спирта — 110 мл, пикриновой кислоты $\text{C}_6\text{H}_2(\text{NO}_2)_3\text{OH}$ — 0,8 г.

Результаты и их обсуждение

Полученные результаты показывают, что скорость ультразвуковых продольных волн при увеличении длительности эксплуатации в зонах с максимальным значением магнитного поля снижается. Данные измерения были проведены

сначала с учетом наличия поверхностных слоев, проявляющих ферромагнитные свойства, а затем после их удаления (рисунок 2).

Снижение скорости продольных ультразвуковых волн связано с деградацией микроструктуры (рисунок 3), а также с фазовыми превращениями, которые способствовали потере энергии из-за рассеяния, отражения и дифракции волн. На рисунке 3 в качестве иллюстрации показаны микроструктуры змеевика в состоянии поставки и после эксплуатации 10000 ч.

Рисунок 2. Зависимости скорости прохождения ультразвуковых продольных волн от периода эксплуатации змеевиков реакционных печей: полная толщина стенки трубы (а), толщина образца после удаления науглероженной зоны (б)

а) с внутренней поверхности змеевика в состоянии поставки; б) с внутренней поверхности змеевика после 10000 ч эксплуатации; в) с объемной части змеевика в состоянии поставки; г) с объемной части змеевика после 10000 ч эксплуатации; д) с наружной поверхности змеевика в состоянии поставки; е) с наружной поверхности змеевика после 10000 ч эксплуатации

Рисунок 3. Микроструктуры змеевика реакционной печи в состоянии поставки, а также после 10000 ч эксплуатации с торцевой поверхности стенки

Микроструктура стали 20Х25Н20С2 (рисунк 3, а) представляет собой аустенитную матрицу с карбидами различной дисперсности, располагающимися в межосных пространствах литой дендритной структуры. Структура стали после 10000 ч эксплуатации показана на рисунке 3, б, г, е. Из-за воздействия агрессивной среды на наружной поверхности трубы наблюдается окисленный слой, а на внутренней поверхности — окисленный и науглероженные слои. Процесс окисления часто приводит к образованию зародышей трещин, развивающихся далее в процессе термической усталости. В объемной части змеевика встречается много мелких вторичных и первичных карбидов (рисунк 3, г).

Атомы углерода, проникая в глубь металла по границам зерен, способствуют осаждению различных карбидов. В результате этого происходит процесс охрупчивания и потери стойкости к окислению, что приводит к науглероживанию, поскольку легирующие элементы связаны в виде Me_{23}C_6 , Me_3C или Me_7C_3 [14, 15].

Эксперименты показали, что изменение скорости ультразвуковой волны происходит как за счет структурных превращений в объеме материала, так и за счет специфических изменений в поверхностных слоях. При этом влияние поверхностных слоев имеет существенное значение.

Снижение скорости продольных ультразвуковых волн может быть объяснено увели-

чением объемной доли вторичных карбидов, а также уменьшением их размера (рисунк 3 б, г, е), что способствует затуханию ультразвуковых продольных волн. Например, при эксплуатации 10 000 ч скорость ультразвука снизилась на 16 % по сравнению с состоянием поставки, а в объемной части стенки реакционной трубы снижение произошло на 8 %.

Выводы

Представленное исследование показывает, что с увеличением времени эксплуатации скорость ультразвука при достижении 10000 ч снижается до 16 %. Данное обстоятельство связано с образованием микропустот и образованием науглероженных, обезуглероженных, а также обедненных карбидами зон. Также зарегистрировано снижение скорости ультразвука до 8 % при полном удалении слоя, проявляющего ферромагнитные свойства, с поверхности металла труб. Что касается самой сердцевины материала змеевика, снижение связано с образованием пор и микроструктурными изменениями, которые произошли в процессе термосилового воздействия и агрессивной среды.

Использование полученных результатов позволяет более точно оценить толщину стенки труб, что можно применить при оценке технического состояния, разработке критерия отбраковки змеевиков реакционных печей и определении остаточного ресурса.

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Barbabela G.D., Almeida L.H., Silveir T.L., Le May I. Role of Nb in Modifying the Microstructure of Heat-Resistant Cast HP Steel // *Materials Characterization*. 1991. Vol. 26. P. 193–197.
2. Ентус Н.Р., Шарихин В.В. Трубчатые печи в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности. М.: Химия, 1987. 304 с.
3. Naumkin E.A., Shermatov J.N., Gaysina A.I. Distribution of Magnetic Field Parameters in the Surface Layer of the Material of Reaction Furnace Coils after Operation Period // *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 945. P. 653–659.
4. СТО-СА-03-004-2009. Трубчатые печи, резервуары, сосуды и аппараты нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств. Требования к техническому надзору, ревизии и отбраковке. Волгоград: ВНИКТИнефтехимоборудование, 1993. 75 с.
5. Щипачев А.М., Наумкин Е.А., Кузеев И.Р. Изменение закона распределения скорости ультразвуковых волн при циклическом нагружении стали 09Г2С в малоцикловой области // *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*. 2012. Т. 16. № 5 (50). С. 89-92.
6. Трутнев Р.Н., Кузеев И.Р., Наумкин Е.А. Особенности усталостного разрушения двухслойных сталей // *Башкирский химический журнал*. 2007. Т. 14. № 4. С. 142–145.
7. Наумкин Е.А. Оценка долговечности аппаратов, подверженных малоцикловой усталости, по скорости ультразвука (на примере стали 09Г2С): дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2000. 125 с.
8. Наумкин Е.А., Прохоров А.Е. Оценка уровня усталостных повреждений в зоне сварного шва стали 09Г2С с использованием акустических методов контроля // *Мировое сообщество: проблемы и пути решения*: сб. ст. Уфа: УГНТУ, 2003. С. 135–142.
8. Xi Chen, Zhenggan Zhou, Guanhua Wu. Influence of Heat Treatment on the Microstructure, Ultrasonic Attenuation and Ultrasonic Velocity of GH4169 Alloy // *Advances in Engineering Research. 7th International Conference on Mechatronics, Control and Materials (ICMCM 2016)*. Changsha, China, 2016. P. 140–143.
10. de Almeida L.H., Ribeiro A.F., Le May I. Microstructural Characterization of Modified 25Cr-35Ni Centrifugally Cast Steel Furnace Tubes // *Materials Characterization*. 2002. No. 49 (3). P. 219-229. DOI: 10.1016/j.ndteint.2010.05.012.

11. Sposito G., Ward C., Cawley P., Nagy P.B., Scruby C. A Review of Non-destructive Techniques for the Detection of Creep Damage in Power Plant Steels // *NDT & E International*. 2010. No. 43. P. 555–567. DOI: 10.1016/j.ndteint.2010.05.012.

12. Шерматов Д.Н., Кузеев И.Р., Наумкин Е.А. Изменение напряженности магнитного поля и ударной вязкости стали при длительной эксплуатации змеевиков реакционных печей // *Нефтегазовое дело*. 2019. Т. 1. № 1. С. 99–106. DOI: 10.17122/ngdelo-2019-1-99-106.

13. ГОСТ 5639-82. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна. М.: ИПК издательство стандартов, 1983. 21 с.

14. Silva I.C., Silva R.S., Rebello J.M.A., Bruno A.C., Silveira T.F., Characterization of Carburization of HP Steels by Non-Destructive Magnetic Testing // *NDT&E International*. 2006. No. 39. P. 569–577. DOI: 10.1016/j.ndteint.2006.03.004.

15. Silva I.C., Rebello J.M.A., Bruno A.C., Jacques P.J., Nysten B., Dille J., Structural and Magnetic Characterization of a Carburized Cast Austenitic Steel // *Scripta Mater.* 2008. No. 59 (9). P. 1010–1013. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2008.07.015.

REFERENCES

1. Barbabala G.D., Almeida L.H., Silveir T.L., Le May I. Role of Nb in Modifying the Microstructure of Heat-Resistant Cast HP Steel. *Materials Characterization*, 1991, Vol. 26, pp. 193–197.

2. Entus N.R., Sharikhin V.V. *Trubchatye pechi v neftepererabatyvayushchei i neftekhimicheskoi promyshlennosti* [Tubular Furnaces in the Oil Refining and Petrochemical Industries]. Moscow, Khimiya Publ., 1987. 304 p. [in Russian].

3. Naumkin E.A., Shermatov J.N., Gaysina A.I. Distribution of Magnetic Field Parameters in the Surface Layer of the Material of Reaction Furnace Coils after Operation Period. *Materials Science Forum*, 2019, Vol. 945, pp. 653–659.

4. STO-SA-03-004-2009. *Trubchatye pechi, rezervuary, sosudy i apparaty neftepererabatyvayushchikh i neftekhimicheskikh proizvodstv. Trebovaniya k tekhnicheskomu nadzoru, revizii i otbrakovke* [STO-SA-03-004-2009. Tubular Furnaces, Tanks, Vessels and Apparatus of Oil Refining and Petrochemical industries. Requirements for Technical Supervision, Audit and Rejection]. Volgograd, VNIKTneftekhimoborudovanie Publ., 1993. 75 p.

5. Shchipachev A.M., Naumkin E.A., Kuzeev I.R. Изменение закона распределения скорости ультразвуковых волн при циклическом нагружении стали 09G2S в малоскоростной области [Change of the Law of Distribution of Speed of Ultrasonic Waves at Cyclic of Steel in Low-Cyclic Area]. *Vestnik UGATU — Bulletin of USATU*, 2012, Vo. 16, No. 5 (50), pp. 89–92. [in Russian].

6. Trutnev R.N., Kuzeev I.R., Naumkin E.A. Особности усталостного разрушения двукратно нагруженных сталей

[Features of Fatigue Failure of Two-Layer Steels]. *Bashkirskii khimicheskii zhurnal — Bashkir Chemical Journal*, 2007, Vol. 14, No. 4, pp. 142–145. [in Russian].

7. Naumkin E.A. *Otsenka dolgovechnosti apparatov, podverzhennykh malotsiklovoi ustalosti, po skorosti ul'trazvuka (na primere stali 09G2S): dis. kand. tekhn. nauk* [Assessment of the Durability of Devices Subject to Low-Cycle Fatigue, the Speed of Ultrasound (for Example Steel 09G2S): Cand. Engin. Sci. Diss.]. Ufa, 2000. 125 p. [in Russian].

8. Naumkin E.A., Prokhorov A.E. Otsenka urovnya ustalostnykh povrezhdenii v zone svarnogo shva stali 09G2S s ispol'zovaniem akusticheskikh metodov kontrolya [Assessment of the Level of Fatigue Damage in the Weld Area of Steel 09G2C Using Acoustic Control Methods]. *Mirovye soobshchestvo: problemy i puti resheniya: sbornik statei* [Collection of Articles «World Community: Problems and Solutions»]. Ufa, UGNTU Publ., 2003. pp. 135–142. [in Russian].

9. Xi Chen, Zhenggan Zhou, Guanhu Wu. Influence of Heat Treatment on the Microstructure, Ultrasonic Attenuation and Ultrasonic Velocity of GH4169 Alloy. *Advances in Engineering Research. 7th International Conference on Mechatronics, Control and Materials (ICMCM 2016)*. Changsha, China, 2016, pp. 140–143.

10. de Almeida L.H., Ribeiro A.F., Le May I. Microstructural Characterization of Modified 25Cr–35Ni Centrifugally Cast Steel Furnace Tubes. *Materials Characterization*, 2002, No. 49 (3), pp. 219–229. DOI: 10.1016/j.ndteint.2010.05.012.

11. Sposito G., Ward C., Cawley P., Nagy P.B., Scruby C. A Review of Non-destructive Techniques for the Detection of Creep Damage in Power Plant Steels. *NDT & E International*, 2010, No. 43, pp. 555–567. DOI: 10.1016/j.ndteint.2010.05.012.

12. Shermatov D.N., Kuzeev I.R., Naumkin E.A. Изменение напряженности магнитного поля и ударной вязкости стали при длительной эксплуатации змеевиков реакционных печей [Change in Magnetic Field Tension and Steel Impact Elasticity during the Long-Term Operation of the Reaction Furnace Coil]. *Нефтегазовое дело — Petroleum Engineering*, 2019, Vol. 1, No. 1, pp. 99–106. DOI: 10.17122/ngdelo-2019-1-99-106 [in Russian].

13. ГОСТ 5639-82. *Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна*. ИПК издательство стандартов [State Standard 5639-82. Steel and Alloys. Methods of Detection and Determination of Grain Size. IPK Publishing House of Standards.]. Moscow, 1983. 21 p. [in Russian].

14. Silva I.C., Silva R.S., Rebello J.M.A., Bruno A.C., Silveira T.F., Characterization of Carburization of HP Steels by Non-Destructive Magnetic Testing. *NDT&E International*, 2006, No. 39, pp. 569–577. DOI: 10.1016/j.ndteint.2006.03.004.

15. Silva I.C., Rebello J.M.A., Bruno A.C., Jacques P.J., Nysten B., Dille J., Structural and Magnetic Characterization of a Carburized Cast Austenitic Steel. *Scripta Mater.*, 2008, No. 59 (9), pp. 1010–1013. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2008.07.015.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ
ABOUT THE AUTHORS

Шерматов Джамшиед Наимджонович, аспирант кафедры «Технологические машины и оборудование», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация,

Jamshed N. Shermatov, Post-graduate Student of Process Machinery and Equipment Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: jamshed8808@mail.ru

Наумкин Евгений Анатольевич, д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологические машины и оборудование», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Evgeny A. Naumkin, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Process Machinery and Equipment Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: ynaumkin@mail.ru

Кузеев Искандер Рустемович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологические машины и оборудование», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Iskander R. Kuzeev, Doctor of Engineering Sciences, Professor Head of Process Machinery and Equipment Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: kuzeev2002@mail.ru

Рубцов Алексей Вячеславович, канд. техн. наук, доцент, заместитель декана Механического факультета, УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Aleksey V. Rubtsov, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Deputy Dean of Mechanics Faculty, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: sunset202@mail.ru