ИЗМЕНЕНИЕ ГЕОМЕТРИИ ЗМЕЕВИКОВ РЕАКЦИОННЫХ ПЕЧЕЙ И ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПО ИХ ПОВЕРХНОСТИ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

CHANGES IN GEOMETRY OF COILS OF REACTION FURNACES AND REDISTRIBUTION OF THE MAGNETIC FIELD ON THEIR SURFACE DURING OPERATION

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
Yevgeny A. Naumkin

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

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

Особенностью большинства сталей аустенитного класса является то, что они относятся к парамагнитным материалам и слабо реагируют на внешнее воздействие магнитного поля. Одной из особенностей происходящих изменений в конструкционном материале является формирование магнитных свойств в поверхностных слоях стенок труб змеевиков, причем, чем длительнее эксплуатация, тем выше величина намагничивания. С одной стороны, этот факт позволяет интерпретировать происходящие изменения в стали, с другой, указывает на это явление как на диагностический метод, который может позволить идентифицировать структурные изменения неразрушающим методом и фиксировать наступление предельного состояния материала. Изменение свойств стали в процессе силового и температурного нагружения имеет сложный многопараметрический характер, в связи с этим и исследование данного явления включает в себя несколько стадий. На первом этапе были рассмотрены закономерности изменения геометрии труб и связанное с этим перераспределение магнитного поля в поверхностном слое в процессе эксплуатации.

Анализ предшествующих исследований показывает, что в результате высокотемпературного крекинга углеводородов появляются активные центры, рекомбинация которых приводит к образованию высокомолекулярных парамагнитных соединений, а при взаимодействии с поверхностью трубы образуется кокс. Отложение кокса носит нерегулярный характер, ухудшает теплопередачу к движущемуся потоку через стенку труб и приводит к запуску автокаталитического процесса интенсивной диффузии углерода в глубь металла. Сформировавшийся науглероженный слой имеет физико-механические свойства, отличающиеся от основного металла труб змеевика. Это приводит к локальной концентрации напряжений на границе науглероженного слоя. С другой стороны, ухудшение теплообмена с парожидкостным потоком приводит к увеличению температуры на внешней поверхности. При этом интенсифицируются процессы обезуглероживания стали, окаинообразования с отслоением окалины. Отслоение продуктов коррозии приводит к утонению стенки трубы и локальному перегреву в местах утонения. Изложенное показывает, что с течением времени износ интенсифицируется, и при этом реализуются различные процессы потери устойчивости формы.

Ключевые слова

змеевики реакционных печей;
напряженность магнитного поля;
науглероживание; деформация;
ползучесть; толщина стенки;
овальность трубы

Исследования, представленные в настоящей работе, показали, что наибольшее утонение стенки трубы сопряжено с максимальным проявлением магнетизма.

Измерение наружного и внутреннего радиусов трубы до эксплуатации показало, что его значения находятся в пределах установленных нормативными документами. Однако после эксплуатации змеевиков формируется овальность, которая при сопоставлении с результатами напряженности постоянного магнитного поля показывает, что в зонах, где произошли наибольшие изменения радиуса труб, было зафиксировано наибольшее увеличение постоянного магнитного поля.

При измерении распределения магнитного поля во всех исследуемых фрагментах труб как с внутренней, так и с наружной поверхностей, выявлено, что имеются зоны с экстремально высокими значениями. При этом, чем больше продолжительность эксплуатации, тем в большей степени значения постоянного магнитного поля с наружной и с внутренней поверхностей коррелируют.

Таким образом, в процессе эксплуатации возникшие физико-химические изменения в змеевиках реакционных печей повлияли на формирование ферромагнитных свойств в поверхностных слоях труб. Основное влияние на распределение параметров магнитных характеристик в змеевиках оказали внедрение углерода и образование новых фаз, имеющих ферромагнитные свойства. Эти изменения вызвали увеличение напряжений в трубах, что ускорило процесс ползучести, привело к локальным утонениям и изменению радиуса труб.

A feature of most steels of the austenitic class is that they belong to paramagnetic materials and react weakly to an external magnetic field. One of the features of the changes occurring in the structural material is the formation of magnetic properties in the surface layers of the walls of the coil pipes, and the longer the operation, the higher the magnetisation value. On the one hand, this fact allows us to interpret the changes occurring in steel, on the other hand, it indicates this phenomenon as a diagnostic method that can identify structural changes with a non-destructive method and record the onset of the ultimate state of the material. The change in the properties of steel in the process of force and temperature loading has a complex multiparameter character, and therefore the study of this phenomenon includes several stages. At the first stage, the patterns of changes in the pipe geometry and the associated redistribution of the magnetic field in the surface layer during operation were examined. Analysis of previous studies shows that as a result of high-temperature cracking of hydrocarbons, active centers appear, the recombination of which leads to the formation of high molecular weight paramagnetic compounds, and coke is formed when interacting with the surface of the pipe. Coke deposits are irregular, impair heat transfer to the moving stream through the pipe wall, and lead to the launch of an autocatalytic process of intense diffusion of carbon into the metal. The formed carburized layer has physicomechanical properties that differ from the base metal of the coil pipes. This leads to a local stress concentration at the boundary of the carburized layer. On the other hand, the deterioration of heat exchange with a vapor-liquid flow leads to an increase in temperature on the outer surface. At the same time, the processes of steel decarburization and scale formation with scale detachment are intensified. The detachment of corrosion products leads to thinning of the pipe wall and local overheating in places of thinning. The above shows that over time, wear is intensified and, thus, various processes of loss of form stability are realized.

Studies presented in this paper have shown that the greatest thinning of the pipe wall is associated with the maximum manifestation of magnetism.

Measurement of the outer and inner radius of the pipe before operation showed that its values are within the limits established by regulatory documents. However, after the operation of the coils, an ovality is

Key words

reaction furnace coils;
magnetic field strength;
carburizing; deformation; creep;
wall thickness; pipe ovality

formed, which, when compared with the results of the strength of a constant magnetic field, shows that in the zones where the greatest changes in the radius of the tubes occurred, the largest increase in the constant magnetic field was recorded.

When measuring the distribution of the magnetic field in all the investigated fragments of pipes, both from the inner and from the outer surface, it was revealed that there are zones with extremely high values. In this case, the longer the operation time, the more the values of the constant magnetic field from the external and internal surfaces correlate.

Thus, during the operation, the resulting physico-chemical changes in the coils of the reaction furnaces influenced the formation of ferromagnetic properties in the surface layers of pipes. The main influence on the distribution of parameters of magnetic characteristics in coils was made by the introduction of carbon and the formation of new phases with ferromagnetic properties. These changes caused an increase in the stresses in the pipes, which accelerated the creep process, led to local thinning and a change in the radius of the pipes.

Введение

Печи пиролиза используются для производства олефинов, таких как этилен и пропилен, которые впоследствии используются для производства таких сырьевых материалов, как полиэтилен и полипропилен. Технологический поток в печи состоит в основном из смеси пара и углеводородов, которые проходят через реакционные трубы и нагреваются снаружи до температуры 850–1150 °С, а время пребывания внутри змеевика составляет порядка 0,08 и 0,25 с [1].

Образовавшиеся на внутренней поверхности труб отложения кокса состоят из 95,56 % связанного углерода, остальные компоненты — это зола (0,37 %), остаточная влага (0,035 %) и летучие вещества (3,92 %). Имеет следующий элементный состав: углерод — 97,98 %, водород — 0,81 %, сера — менее 0,06 % [2, 3].

При высокотемпературном пиролизе углеводородов происходят активация молекул этилена и образование некоторого количества ароматических комплексов, которые на поверхности высоколегированной стали формируют структуру кокса. Атомы углерода диффундируют в металл и взаимодействуют с легирующими элементами, преимущественно с хромом, образуя карбиды типа M_2C_6 и M_7C_3 и влияя на структурную однородность. Также было установлено, что материал, из которого изготовлен змеевик реакционной печи, может влиять на состав продуктов пиролиза. Некоторые соединения хрома, например оксиды, способны по мере увеличения продолжительности процесса увеличивать суммарное содержание низших непредельных углеводородов [5]. Известно каталитическое

действие никеля и железа на процесс образование кокса [6]. Поскольку никель и железо составляют основу высоколегированной стали, то следует ожидать интенсивного образования кокса в их присутствии.

Образование кокса на внутренней поверхности труб включает несколько механизмов, влияющих как на процесс пиролиза, так и на изменение свойств металла. Равномерно покрывая поверхность, кокс существенно ухудшает теплообмен между нагретой трубой и потоком сырья. Вследствие этого условия для проведения пиролиза ухудшаются, а температура металла повышается. При этом углерод из кокса интенсивно диффундирует в металл, образуя науглероженную зону со свойствами, отличными от свойств стали. Изменяются механические характеристики и теплофизические свойства. Увеличение содержания углерода в поверхностном слое приводит к охрупчиванию металла, а различие в коэффициентах линейного расширения способствует возникновению дополнительных напряжений на границе «науглероженный слой — сталь». Как результат, наблюдаются отслоение металла и утонение стенки трубы. Здесь мы наблюдаем автокаталитический процесс, связанный с химическими реакциями на наружной поверхности. В присутствии кислорода, подаваемого в печь для поддержания горения факела, происходит образование окислов углерода и окалины. Утонение стенки трубы увеличивает напряжения, которые стимулируют все химические реакции на поверхности и процесс ползучести в стали [7, 8].

Исследование фрагментов труб змеевика печи пиролиза, отобранных во время ремонтных работ, позволило обнаружить появление

магнитных свойств на некоторых участках труб [9, 10], что было достаточно неожиданно, учитывая парамагнитные свойства конструкционного материала. Отмечено, что в магнитных зонах, как правило, присутствовали мелкие трещины в виде сетки. На этом эффекте основана методика диагностирования поврежденных участков и изготовлен прибор для осуществления диагностических работ [11].

В работах [12–14] показано, что возможен перевод парамагнитной стали в ферромагнитное состояние при образовании карбидов хрома и уменьшении хрома в матрице легирующих элементов. Также известно, что процесс науглероживания стимулирует ориентацию магнитных диполей, характерную для ферромагнитных материалов, и при этом показано, что число диполей увеличивается с приближением к поверхности труб с внутренней стороны змеевика [15].

Однако детального изучения распределения магнитных свойств в поверхностной зоне металла не проведено. Известно лишь, что распределение магнитных характеристик по глубине науглероженного слоя во фрагментах труб из стали 20Х25Н20С2, эксплуатируемых в условиях печи при высоких температурах и при различной длительности эксплуатации, неоднородно [16]. Анализ результатов показал, что магнитные свойства проявляются только в поверхностных слоях труб. При этом, чем больше продолжительность эксплуатации, тем глубже располагался слой, проявляющий магнитные свойства, и тем выше в этом слое были значения напряженности постоянного магнитного поля.

Авторами [17] при измерении остаточных деформаций змеевика было установлено, что геометрические отклонения от исходного на-

ходились в диапазоне от 0,67 до 9,46 мм, это указывает на хаотичное распределение данного параметра. Также было установлено, что на участках с наибольшим отклонением от первоначального диаметра, где происходили наибольшие механические напряжения, наблюдались максимальное увеличение среднего выходного напряжения и наименьшие значения коэффициента затухания отклика электрического сигнала. В зонах с наименьшим отклонением геометрии трубы, наоборот, наблюдались минимальное значение амплитуды среднего выходного напряжения отклика электрического сигнала и наибольшие значения коэффициента затухания.

Необходимо ответить на вопрос о распределении магнитных свойств в поверхностном слое науглероженного металла, и связано ли это распределение с интенсивными пластическими деформациями.

Материал и методика исследования

В данном исследовании были проведены измерения четырех параметров: толщины стенки трубы, радиуса по всей окружности, H_n нормальной и H_t тангенциальной составляющих вектора напряженности постоянного магнитного поля.

В целях определения характера распределения магнитных характеристик как с наружной, так и внутренней сторон труб были отобраны фрагменты змеевиков из пиролизных печей, прослужившие от 0 до 10000 ч. Из фрагмента змеевиков были вырезаны (рисунок 1, б) кольца длиной 60 мм, которые в дальнейшем для удобства проведения эксперимента были разделены на 2 равные части (рисунок 1, в). На наружной и внутренней поверхностях была нанесена сетка размером 10×20 мм.

Рисунок 1. Последовательность проведения исследования

Измерения проводились с помощью магнитоизмерительного феррозондового прибора Ф-205.30А. В целях обеспечения идентичности при измерениях преобразователь был закреплен в штатив и находился в стационарном положении на всех стадиях исследования.

Регистрировались нормальная (H_n) и тангенциальная (H_t) составляющие вектора напряженности постоянного магнитного поля, по результатам измерения которых определялась результирующая напряженность постоянного магнитного поля по формуле [11]:

$$H_R = \sqrt{H_n^2 + H_t^2}. \quad (1)$$

При определении закономерностей распределения толщины стенки по окружности труб после различной длительности эксплуатации был использован ультразвуковой толщиномер Olympus MG2.

Результаты и их обсуждение

В целях определения характера потери устойчивости формы змеевиков реакционных печей, эксплуатируемых в сложных условиях и с различной длительностью времени, были проведены измерения радиусов труб по окружности. На наш взгляд, формирование овальности происходит из-за комплексного действия изгиба труб вследствие неравномерности температурного поля трубы, ползуче-

сти, а также в процессе сжатия, из-за «прикипания» трубы к подвескам. Значения регистрировались с шагом 10 мм по длине окружности змеевика. По результатам измерения были построены диаграммы отклонений, показанные на рисунках 3 и 4. Параллельно с измерением геометрии труб в этих же точках измеряли другие параметры, в том числе утонение стенки труб и напряженность постоянного магнитного поля.

На рисунке 2 показано изменение относительного утонения толщины стенок в зависимости от периода эксплуатации. Измерение характеристик магнитного поля в тех же точках, где измерялась толщина стенки, показало симбатный характер зависимостей (рисунки 2, 3) от времени эксплуатации. Этот факт может быть использован при изучении причин изменения свойств металла.

Анализ распределения напряженности постоянного магнитного поля на наружной и внутренней поверхностях показал, что эти характеристики распределены хаотично и имеют, скорее, фрактальный характер, чем регулярный. В то же время имеются зоны, где распределение характеристик магнитного поля с наружной и внутренней сторон имеет идентичный характер.

Рисунок 2. Изменение относительного утонения стенок при длительной эксплуатации змеевиков реакционных труб печей пиролиза

Рисунок 3. Изменение относительной результирующей напряженности постоянного магнитного поля на наружной и внутренней поверхностях труб в процессе эксплуатации печей пиролиза

Изучение распределения магнитных характеристик фрагментов труб показывает, что существует корреляционная зависимость результирующей напряженности постоянного магнитного поля между внутренней и наружной поверхностями стенки трубы. Результаты измерений представлены на рисунках 5, 6. После 750 ч эксплуатации трубы змеевика наблюдается увеличение напряженности постоянного магнитного поля по внешней поверхности по сравнению с внутренней его стороной (рисунок 5, а). После 1300 ч эксплуатации также обнаружены зоны, где магнитные характеристики имеют высокое значение (рисунок 5, з). У фрагментов после 8000 и 10000 ч эксплуатации распределение магнитных характеристик с внешней и с внутренней поверхностей труб имеют идентичный характер, а разница в значениях магнитных характеристик минимальная (рисунок 6, а, з). Таким образом, во всех фрагментах труб зафиксированы зоны с экстремальным значением величины постоянного магнитного поля.

Во всех исследованных фрагментах труб в зонах, где были определены наибольшие отклонения распределения радиусов по окружности как с наружной, так и с внутренней сторон, было зафиксировано увеличение результирующей напряженности постоянного

магнитного поля. Возможно, это связано с неравномерным температурным полем в змеевике. При поиске причин корреляции между изменением геометрии труб и возникновением ферромагнитных зон следует учитывать, что в состоянии поставки у змеевика печи, изготовленной из марки стали 20Х25Н20С2, не было зафиксировано проявлений ферромагнитных свойств.

Измерение радиуса и толщины стенки в состоянии поставки показало, что предельные отклонения по наружному и внутреннему диаметрам, а также по толщине стенки труб не превышают указанных в таблице 2 [18] ГОСТ 9941-81 (рисунок 4, а, б).

После эксплуатации 750 ч также видны локальные изменения наружного и внутреннего радиусов трубы, которые незначительны, поэтому результирующая напряженность постоянного магнитного поля также изменяется незначительно. Это также указывает на связь механизмов этих двух явлений, что важно с точки зрения диагностирования очагов будущего разрушения.

На фрагменте трубы после эксплуатации в течение 1300 ч (рисунок 5, д) в зонах с высоким значением магнитных характеристик на расстоянии 270–350 мм и 0–50 мм по окружности трубы с наружной и с внутренней

Рисунок 4. Распределение значений толщины (а) и радиуса (б) труб в состоянии поставки

Рисунок 5. Распределение вектора результирующей напряженности постоянного магнитного поля внешней и внутренней поверхностей (а, г), геометрии (б, д) и толщины (в, е) фрагментов змеевиков реакционных печей после эксплуатации в течение 750 и 1300 ч

сторон также произошло отклонение радиуса по окружности. Измерения распределения радиуса стенки показали, что этот параметр претерпел несущественные изменения по сравнению с первоначальной величиной ($R_{\text{ном}} = 57 \text{ мм}$). Однако в зонах, где показатели $R = R_{\text{max}} - R_{\text{ном}}$ и $r = r_{\text{max}} - r_{\text{ном}}$ равны 1,2 мм, магнитное поле увеличивается.

На фрагменте трубы после 8000 ч эксплуатации показаны изменения радиуса с наружной и с внутренней сторон стенки (рисунок 6, б). Отмечается, что изменился характер потери устойчивости формы: так, например, по окружности на расстоянии от 40 до 110 мм наблюдается вогнутость, а на расстоянии от

Рисунок 6. Распределение вектора результирующей напряженности постоянного магнитного поля внешней и внутренней поверхностей (а, г), геометрии (б, д) и толщины (в, е) фрагментов змеевиков трубчатых печей после эксплуатации в течение 8000 и 10000 ч

10 до 120 мм с внутренней стороны выпуклость. Это, скорее всего, связано с утонением стенки трубы. При этом радиусы труб с наружной и с внутренней сторон стенки увеличились соответственно на $R_{\max} = 2\text{ мм}$ и $r_{\max} = 3,5\text{ мм}$. Представляет интерес тот факт, что параметры магнитных характеристик как с наружной, так и с внутренней поверхностей стенок в области вогнутости имеют высокое значение, а со стороны выпуклости имеют минимальное значение.

После эксплуатации 10000 ч (рисунок 6, д) радиус трубы как с наружной, так и с внутренней сторон стенок также увеличились. Общий характер изменения геометрических характеристик и параметров магнитного поля в целом сохранился. Также наблюдаются участки с различной ориентацией потери устойчивости формы, а геометрические отклонения трубы по поверхности труб с наружной и с внутренней сторон из-за изменения толщины стенки по окружности распределены хаотично.

В трубах, где наблюдается изгиб, деформации стеснены в наибольшей степени в меридиональных образующих цилиндра, перпен-

дикулярных к плоскости изгиба. В этих зонах наблюдается интенсивная диффузия углерода в металл. В этих зонах также увеличиваются параметры постоянного магнитного поля.

Характерно, что при времени эксплуатации в 10000 ч достигнуты недопустимые уменьшения толщины стенки в 4 мм (рисунок 6, е). В зоне, где обнаружена наименьшая толщина стенки, отмечается и увеличение вектора результирующей напряженности постоянного магнитного поля.

Наружный диаметр во всех фрагментах труб согласно [19] еще не достиг отбраковочного размера.

Измерение толщины печных змеевиков показало, что утонение по окружности трубы происходит с различными скоростями (рисунки 5, в, е, 6, в, е). Однако критическое утонение достигнуто только в исследованном фрагменте, проработавшем 10000 ч. Характерно, что при значительных изменениях геометрии труб и физических характеристик трубы продолжают функционировать в условиях повышенного риска возникновения трещин и разгерметизации змеевика.

В целях уточнения механизмов деградации материала труб змеевиков пиролизных печей и появления ферромагнетизма необходимо провести анализ эволюции фазового состава металла при воздействии комплекса факторов, что планируется сделать на следующем этапе исследований.

Вывод

В результате высоких температур на внутренней поверхности труб формируются отложения кокса, которые способствуют диффузии углерода в металл змеевика и формированию науглероженного слоя, который при достижении определенной толщины отслаивается, что приводит к утонению стенки.

Анализ распределения радиуса по окружности с наружной и внутренней сторон реакционной трубы показал, что после эксплуатации змеевиков формируется потеря устойчивости формы.

На наш взгляд, формирование овальности происходит из-за комплексного действия изгиба труб вследствие неравномерности температурного поля трубы, ползучести, а также в

процессе сжатия, из-за «прикипания» трубы к подвескам.

Подтвержден факт, что в процессе эксплуатации труб змеевиков печей пиролиза высоколегированная сталь аустенитного класса в локальных зонах проявляет ферромагнитные свойства, что связывается с образованием новых фаз, отсутствующих в состоянии поставки.

Обнаружена корреляция между изменениями геометрии труб в процессе эксплуатации и появлением ферромагнитных свойств в стали, причем, чем длительнее эксплуатация, тем выше величина намагничивания.

Таким образом, установление закономерностей формирования магнитного поля на поверхности стенки труб змеевиков реакционных печей и его связи с физико-механическими характеристиками материала дает возможность объяснить механизм зарождения дефектов, потери устойчивости формы и предсказать период наступления предельного состояния.

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Андреева М.М. Коксообразование при пиролизе углеводородного сырья // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. Вып. 2. С. 279–280.
2. Павлова И.В., Половняк В.К., Хабибрахманов А.Ф., Старков А.К., Чуклова М.Е. Ингибирование коксообразования в трубах пиролизных печей // Вестник Казанского технологического университета. 2009. № 1. С. 73–78.
3. Хисаева З.Ф. Повышение стойкости металла печных труб к коксоотложению силицированием поверхности: дис. ... канд. техн. наук. Уфа: УГНТУ, 2003. 114 с.
4. Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry // American Petroleum Institute, First edition, 2003. P. 3–270.
5. Основы предвидения каталитического действия // Тр. IV Междунар. конгресса по катализу. М.: Наука, 1970. С. 245.
6. Майоров В.И. О каталитическом влиянии промышленных легированных сталей на термическое разложение углеводородов. Л.: ГХИ, 1958. С. 41–47.
7. Чиркова А.Г., Кузеев И.Р., Попова С.В., Васильев А.Н. Изменение напряженно-деформированного состояния змеевиков печей пиролиза в процессе эксплуатации // Башкирский химический журнал. 2011. Т. 18. № 1. С. 78–82.
8. Tawancy H.M. Degradation of Alloy 800H Used in Ethylene Furnace Tube Application by the Combined Effects of Carburization and Thermal Fatigue // Metallurgy, Microstructure, and Analysis. 2017. Vol. 6. Issue 4. P. 332–339.
9. Махутов Н.А., Чиркова А.Г., Рубцов А.В., Наумкин Е.А., Гайдукевич У.П. Оценка прочности материала трубы змеевика реакционной печи от действия внутреннего давления // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2008. Т. 74. № 1. С. 58–62.
10. Чиркова А.Г., Наумкин Е.А., Рубцов А.В., Гайдукевич У.П. Предельное состояние трубы змеевика реакционной печи // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2007. № 5. С. 100–105.
11. Власов В.Т., Дубов А.А. Физические основы метода магнитной памяти металла. М.: ТИССО, 2004. 424 с.
12. Silva I.C., Silva L.L., Silva R.S., Rebello J.M.A., Bruno A.C. Carburization of Ethylene Pyrolysis Tubes Determined by Magnetic Measurements and Genetic Algorithm // NDT&E International. 2006. No. 39. P. 569–577.
13. Grabke H.J., Wolf I. Carburization and Oxidation // Materials Science and Engineering. 1987. Vol. 87. P. 23–33.
14. Klumper-Wetkamp T., Mayr P., Reimche W., Feiste K., Bernard M., Bach F. Nondestructive Determination of the Carbon Content in Iron Foils — A Quality Assurance of The Gas Carburizing Process // Proceedings of the International Symposium on Nondestructive Testing in Civil Engineering. Berlin, 2003.
15. Spinosa C.C., Marengo J.A., Ruch M.C., Garcia J.O. Desarrollo de un Equipo para la Evaluación de Variaciones de Conductividad por Relutancia Magnetica // Proceedings of the Third Pan American Conference for Non-Destructive Testing. Rio de Janeiro, 2003.

16. 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. Switzerland, Trans Tech Publications, 2017. Vol. 945. P. 653–659.

17. Кузеев И.Р., Наумкин Е.А., Сунгатуллина А.Г., Кучуков Т.М. Формирование очагов разрушения в трубах змеевиков реакционных печей // Нефтегазовое дело. 2015. Т. 13. № 3. С. 181–186.

18. ГОСТ 9941-81. Трубы бесшовные холодно- и тепло-деформированные из коррозионно-стойкой стали. М.: Издательство стандартов, 1983.

19. Инструкция по техническому надзору, методам ревизии, отбраковке и ремонту печей установок пиролиза этилена. Волгоград, 1986. 66 с.

REFERENCES

1. Andreeva M.M. Koksoobrazovanie pri pirolize uglevodородного syr'ya [Coke Formation in the Pyrolysis of Hydrocarbons]. *Vestnik Kazanskogo Tekhnologicheskogo Instituta — Bulletin of Kazan Technological University*, 2014, Vol. 17, Issue 2, pp. 279–280. [in Russian].

2. Pavlova I.V., Polovnyak V.K., Khabibrakhmanov A.F., Starkov A.K., Chuklova M.E. Ingibirovanie koksoobrazovaniya v trubakh piroliznykh pechei [Inhibition of Coke Formation in Pipes of Pyrolysis Furnaces]. *Vestnik Kazanskogo Tekhnologicheskogo Instituta — Bulletin of Kazan Technological University*, 2009, No. 1, pp. 73–78. [in Russian].

3. Khisaeva Z.F. *Povyshenie stoikosti metalla pechnykh trub k koksootlozheniyu silitsirovaniem poverkhnosti: dis. ... kand. tekhn. nauk.* [Increasing the Resistance of Metal Chimneys to Cokesilicon Surface: Cand. Engin. Sci. Diss.]. Ufa, USPTU, 2003. 114 p. [in Russian].

4. Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry. *American Petroleum Institute*, First Edition, 2003. pp. 3–270.

5. Osnovy predvideniya kataliticheskogo deistviya [Fundamentals of Predicting Catalytic Action]. *Trudy IV Mezhdunarodnogo kongressa po katalizu* [Proceedings of the IV International Congress on Catalysis]. Moscow, Nauka, 1970. pp. 245. [in Russian].

6. Maiorov V.I. *O kataliticheskom vliyaniy promyshlennykh legirovannykh stalei na termicheskoe razlozhenie uglevodородov* [Catalytic Effect of Industrial Alloy Steels on Thermal Decomposition of Hydrocarbons]. Leningrad, GHI, 1958. pp. 41–47. [in Russian].

7. Chirkova A.G., Kuzeev I.R., Popova S.V., Vasil'ev A.N. Izmenenie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zmeevikov pechei piroliza v protsesse ekspluatatsii [Change in the Stress-Strain State of Coils of Pyrolysis Furnaces During Operation]. *Bashkirskii khimicheskii zhurnal — Bashkir Chemical Journal*, 2011, Vol. 18, No. 1, pp. 78–82. [in Russian].

8. Tawancy H.M. Degradation of Alloy 800H Used in Ethylene Furnace Tube Application by the Combined Effects of Carburization and Thermal Fatigue. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 2017, Vol. 6, Issue 4, pp. 332–339.

9. Makhutov N.A., Chirkova A.G., Rubtsov A.V., Naumkin E.A., Gaidukevich U.P. Otsenka prochnosti materiala truby zmeevika reaktsionnoi pechi ot deistviya vnutrennego davleniya [Evaluation of the Strength of the Pipe Material of the Reaction Furnace Coil from the Action of Internal Pressure]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov — Industrial Laboratory*, 2008, Vol. 74, No. 1, pp. 58–62. [in Russian].

10. Chirkova A.G., Naumkin E.A., Rubtsov A.V., Gaidukevich U.P. Predel'noe sostoyanie truby zmeevika reaktsionnoi pechi [The Ultimate State of Coil Pipe of Reactionary Furnace]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Neft' i gaz — Oil and Gas Studies*, 2007, No. 5, pp. 100–105. [in Russian].

11. Vlasov V.T., Dubov A.A. Fizicheskie osnovy metoda magnitnoi pamyati metalla [Physical Basis of Metal Magnetic Memory Method]. Moscow, TISSO, 2004. 424 p. [in Russian].

12. Silva I.C., Silva L.L., Silva R.S., Rebello J.M.A., Bruno A.C. Carburization of Ethylene Pyrolysis Tubes Determined by Magnetic Measurements and Genetic Algorithm. *NDT&E International*, 2006, No. 39, pp. 569–577.

13. Grabke H.J., Wolf I. Carburization and Oxidation. *Materials Science and Engineering*, 1987, Vol. 87, pp. 23–33.

14. Klumper-Wetkamp T., Mayr P., Reimche W., Feiste K., Bernard M., Bach F. Nondestructive Determination of the Carbon Content in Iron Foils — A Quality Assurance of the Gas Carburizing Process. *Proceedings of the International Symposium on Nondestructive Testing in Civil Engineering*. Berlin, 2003.

15. Spinosa C.C., Marengo J.A., Ruch M.C., Garcia J.O. Desarrollo de um Equipo para la Evaluacio'n de Variaciones de Conductividad por Relutancia Magnetica. *Proceedings of the Third Pan American Conference for Non-Destructive Testing*. Rio de Janeiro, 2003.

16. 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. Switzerland, Trans Tech Publications, 2017. Vol. 945, pp. 653–659.

17. Kuzeev I.R., Naumkin E.A., Sungatullina A.G., Kuchukov T.M. Formirovanie ochagov razrusheniya v trubakh zmeevikov reaktsionnykh pechei [The Formation of Foci of Destruction in the Pipe Coils of the Reaction Furnace]. *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2015, Vol. 13, No. 3, pp. 181–186. [in Russian].

18. ГОСТ 9941-81. Трубы бесшовные холодно- и тепло-деформированные из коррозионно-стойкой стали [State Standard 9941-81. Seamless Cold- and Heat-Deformed Pipes of Corrosion-Resistant Steel]. Moscow, Standards Publishing, 1983. [in Russian].

19. Instruksiya po tekhnicheskomu nadzoru, metodam revizii, otbrakovke i remontu pechei ustanovok piroliza etilena [Instruction on Technical Supervision, Methods of Audit, Rejection and Repair of Ethylene Pyrolysis Furnaces]. Volgograd, 1986. 66 p. [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ
ABOUT THE AUTHORS

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

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

e-mail: jamshed8808@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

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

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

e-mail: ynaumkin@mail.ru