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

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
Yevgeniy A. Naumkin

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

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

В процессе эксплуатации змеевиков реакционных печей происходят процессы науглероживания поверхности, вследствие чего изменяются физико-химические свойства металла. Это приводит к снижению эксплуатационных характеристик материала труб и пластичности, появлению внутренних напряжений, деградации структуры, и, как следствие, преждевременному выходу из строя змеевиков.

Анализ публикаций показал, что в аустенитных сталях змеевиков реакционных печей после длительной эксплуатации в условиях высоких температур и контакта с углеродсодержащей средой зарегистрировано проявление ферромагнитных свойств. В связи с этим были проведены исследования особенностей распределения магнитных характеристик по поверхности фрагментов труб печей пиролиза, изготовленных из стали 20Х25Н20С2, которые отработали 750, 1300, 8000, 10000 ч. Анализ результатов измерения показал, что в начальной стадии эксплуатации магнитные свойства проявляются лишь в локальных зонах. При более длительной работе данные проявления встречаются по всей поверхности труб, и локальных зон становится больше как по количеству, так и по значениям результирующей напряженности постоянного магнитного поля. Дальнейшее продолжение эксплуатации приводит к увеличению площади участков с высокими значениями магнитных параметров.

Анализ литературы показал, что проявление ферромагнетизма в аустенитных сталях, эксплуатируемых в условиях реакционных печей, может происходить по двум механизмам. С одной стороны, это связано с диффузией углерода в поверхностные слои металла из-за длительного воздействия богатой углеродом среды, при котором образовавшиеся в результате науглероживания различные типы карбидов истощают легирующие элементы в поверхностной области стенки реакционных труб. Одновременно идет другой процесс, постепенный рост оксидов во внутреннем направлении растворяет в подповерхностной области исходные карбиды и приводит к более глубокому науглероживанию, а также дополнительному истощению легирующих элементов. Однако данное явление в змеевиках реакционных печей на сегодняшний день до конца не изучено, и этот вопрос остается актуальным.

Данные исследования магнитных характеристик дополняются также рассмотрением ударной вязкости. Анализ результатов испытаний на ударный изгиб показал, что в зонах с высоким значением магнитного поля ударная вязкость снижается на 2 порядка по сравнению

Ключевые слова

змеевики реакционных печей,
науглероживание,
карбидообразование,
ударная вязкость,
диффузия углерода,
напряженность
магнитного поля

с состоянием поставки. При этом необходимо отметить, что наибольшее снижение ударной вязкости наблюдается в зонах с максимальным проявлением магнитных свойств. Данные результаты могут быть применены в качестве метода для определения потенциально опасных зон змеевиков реакционных печей, а также разработки критерия отбраковки труб.

During the operation of the reaction furnace coils, carburizing processes take place, as a result of which the physicochemical properties of the metal change. This leads to a decrease in the operational characteristics of the pipe material and plasticity, the appearance of internal stresses, degradation of the structure, and, as a result, premature failure of the coils.

An analysis of the publications showed that in austenitic steels of the coils of the reaction furnaces after long-term operation under conditions of high temperatures and contact with the carbon-containing medium, the development of ferromagnetic properties was registered. In this regard, studies were carried out on the peculiarities of the distribution of magnetic characteristics over the surface of the fragments of pyrolysis furnace tubes made of steel 20X25H20C2, which worked 750, 1300, 8000, 10,000 hours. Analysis of the measurement results showed that in the initial stage of operation, magnetic properties are developed only in local areas. With longer operation, these phenomenon occur over the entire surface of the pipes and local zones become larger, both in quantity and in values of the resultant tension of a constant magnetic field. Further continuation of the operation leads to an increase of areas with high values of magnetic parameters.

An analysis of the literature has shown that the development of ferromagnetism in austenitic steels, which are operated in the conditions of reaction furnaces, can occur by two mechanisms. On the one hand, this is caused by the diffusion of carbon into the surface layers of the metal due to the long-term exposure to a carbon-rich environment, in which various types of carbides formed as a result of carburization deplete alloying elements in the surface section of the reaction tube walls. At the same time, there is another process, the gradual growth of oxides in the internal direction dissolves the original carbides in the subsurface section and leads to deeper carburization, as well as additional depletion of the alloying elements. However, this phenomenon in the coils of reaction furnaces has not been fully studied to date, and this question remains relevant.

These studies of magnetic characteristics are also complemented by a consideration of toughness. Analysis of the results of tests on impact bending showed that in areas with a high magnetic field, the impact strength decreases by 2 orders of magnitude compared with the delivery condition. It should be noted that the greatest reduction in toughness is observed in areas with the maximum development of magnetic properties. These results can be applied as a method for determining potentially dangerous zones of reaction furnace coils, as well as developing a criterion for rejecting pipes.

Введение

В процессе пиролиза этилена происходит образование кокса на внутренних стенках труб пиролизной печи, что препятствует передаче тепла и приводит к перегреву металла, науглероживанию и увеличению скорости ползучести [1–3]. В результате длительного воздействия высокой температуры (950–1100 °C) структура материала змеевиков реакционной печи подвергается изменениям, при этом первичные карбиды M_7C_3 в процессе эксплуатации преобразуются в $M_{23}C_6$, а также образуется 6-фаза [4]. Из-за длительного воздействия богатой углеродом среды образовавшиеся в результате

Key words

reaction furnace coils,
carburizing, carbide forming,
impact strength,
carbon diffusion,
magnetic field strength

науглероживания термостойких сталей различные типы карбидов снижают сопротивление к коррозионным и эрозионным процессам поверхности змеевика и механическую прочность металла трубы [5–7].

Авторами [8] показано, что из-за нарушения нормального режима эксплуатации печи, связанного с повышенным коэффициентом избытка воздуха, либо с избытком топлива или работой при температуре, превышающей нормативное значение, наружная поверхность змеевика подвергается высокотемпературному окислению металла, которое также

является одним из основных факторов, способствующих преждевременному износу.

Таким образом, исходя из анализа причин возникновения повреждений труб реакционных печей науглероживание металла с внутренней и его высокотемпературное окисление с наружной поверхности стенки является одним из основных факторов преждевременного выхода из строя змеевиков.

В последнее время появляются публикации, посвященные проявлению магнетизма в аустенитных сталях, что дает основание использования результатов магнитных измерений в диагностических целях. Например, в статьях авторов [7, 8] была выявлена корреляция между ферромагнитным поведением реакционных труб и истощением хрома в матрице, вызванной образованием карбида. Эти измерения показали, что образующиеся карбиды типа $M_{23}C_6$ и M_7C_3 являются парамагнитными. Из этих результатов было установлено, что аустенитная матрица, близкая к наружной и внутренней поверхностям труб, становится парамагнитной с тонкими ферромагнитными доменными областями, прилегающими к карбидам хрома.

Изучение микроструктуры стали 20Х23Н18 после эксплуатации различной продолжительности в условиях пиролиза печи показало, что в процессе эксплуатации уже после 2256 ч происходит распад твердого раствора аустенита с образованием вторичных фаз. Анализ фазового состава позволил установить, что в структуре стали содержатся, кроме аустенита, вторичные фазы-интерметаллиды с тетрагональной кристаллической решеткой: $CrNi$, Cr_5Fe_7 , $FeCr$, именуемые δ -фазами. Сравнительный анализ содержания интерметаллидов и пластических свойств показал, что охрупчивание стали сопровождается увеличением количества интерметаллидов в структуре [9–11].

Известен факт [12] того, что δ -фаза в различных сплавах подвергается переходу из парамагнитного состояния в ферромагнитное при криогенных температурах. Хотя выявлена ферромагнитная природа δ -фазы, образующаяся в нержавеющих высоколегированных сталях при низких температурах, но систематического исследования температурной зависимости этой природы в них проведено не было.

Следовательно, исследования, посвященные проявлению ферромагнитных свойств в процессе эксплуатации змеевиков реакцион-

ных печей, а также использование магнитного метода контроля в диагностических целях являются актуальными.

Материал и методика исследования

В данной работе в целях изучения распределения магнитных характеристик по поверхности труб и выявления связи с работой разрушения, отнесенной к площади сечения образца, были отобраны фрагменты змеевиков пиролизной печи, изготовленные из аустенитной жаропрочной высоколегированной стали 20Х25Н20С2, которые эксплуатировались 750, 1300, 8000 и 10000 ч. На поверхности труб была нанесена сетка размером 30×10 мм по длине образующей.

Исследования проводились в два этапа: сначала измерялись магнитные характеристики по поверхности фрагмента змеевика 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, что позволило исключить факторы, искажающие результаты измерения. При этом каждый участок нанесенной сетки на трубе подводился под стационарно установленный и закрепленный штатив преобразователя. Перед началом измерения трубы определялась величина напряженности магнитного поля под преобразователем в отсутствии трубы, которая впоследствии вычиталась. В каждой ячейке определялось среднее значение нормальной (H_n), тангенциальной (H_t) и результирующей (H_r) составляющих вектора напряженности постоянного магнитного поля.

Затем были проведены испытания на ударный изгиб. С этой целью в зонах с высоким и низким значениями магнитных характеристик были вырезаны темплеты, из которых изготовлены образцы с U-образным концентратором согласно [13]. Вырез образца осуществлялся параллельно образующей трубы, а концентратор нанесен перпендикулярно. Определение ударной вязкости производилось с помощью универсального электродинамического стенд-копра СЕАСТ 9340 с падающим грузом.

Результаты и их обсуждение

По результатам измерения были построены графические зависимости в виде поверхности в программном комплексе Excel, которые приведены на рисунках 1–4.

Рисунок 1. Распределение результирующей напряженности постоянного магнитного поля по внешней поверхности фрагментов труб змеевиков трубчатых печей после 750 ч эксплуатации

Рисунок 2. Распределение результирующей напряженности постоянного магнитного поля по внешней поверхности фрагментов труб змеевиков трубчатых печей после 1300 ч эксплуатации

Рисунок 3. Распределение результирующей напряженности постоянного магнитного поля по внешней поверхности фрагментов труб змеевиков трубчатых печей после 8000 ч эксплуатации

Рисунок 4. Распределение результирующей напряженности постоянного магнитного поля по внешней поверхности фрагментов труб змеевиков трубчатых печей после 10 000 ч эксплуатации

Полученные результаты магнитных измерений показывают, что магнитное поле по поверхности труб с различными сроками эксплуатации распределено неравномерно. Например, измерения элементов труб после 750 и 1300 ч эксплуатации показали, что по всей поверхности регистрируются незначительные проявления магнитного поля. Однако имеются локальные участки с повышенным значением напряженности магнитного поля, указывающие на наличие потенциально опасных зон (рисунки 1, 2). На фрагментах труб после эксплуатации 8000 и 10000 ч (рисунки 3, 4) формируются области экстремальных напряженностей магнитного поля, что связано с увеличением количества углерода в поверхностных слоях змеевика печи. Результаты измерения $H_{r_{max}}$ и $H_{r_{min}}$ сведены в таблице 1.

При этом необходимо отметить, что наружный осмотр змеевиков показал удовлетворительное состояние труб: прогары, отдулины, свищи и трещины отсутствуют, изменений геометрических размеров и форм основных элементов змеевиков не обнаружено.

При высоких температурах эксплуатации в змеевиках трубчатых печей происходит интенсивное науглероживание, которое приводит к резкому снижению пластичности и охрупчиванию и постепенному изменению

структуры, приводящей к снижению ударной вязкости.

Анализ полученных результатов в таблицах 1 и 2, показывает, что величина ударной вязкости образцов снижается с увеличением результирующей напряженности постоянного магнитного поля. Результаты ударной вязкости в максимальных и минимальных зонах напряженности постоянного магнитного поля приведены в таблице 2, из которой видно, что ее величина даже при эксплуатации 750 ч имеет низкое значение. Это связано с выделением карбидов различного состава и образованием δ -фазы. При длительности эксплуатации 8000 и 10000 ч в зонах с максимальным значением магнитного поля, помимо дальнейшего снижения ударной вязкости, наблюдается существенное снижение толщины стенки трубы.

Представленные выше результаты доказывают, что высокая температура и перераспределение углерода неизбежно приводят к фазовым переходам, вызывающим изменения механических характеристик змеевика. Образование карбидов и интерметаллидов по границам зерен аустенита или в теле зерна также непосредственно влияет на механические свойства стали, вызывая уменьшение пластичности и значительное снижение ударной вязкости.

Таблица 1. Результаты измерения в зонах с максимальным и минимальным значениями результирующей напряженности постоянного магнитного поля

Время эксплуатации t, тыс. ч	Результирующая напряженность постоянного магнитного поля в зонах с максимальным значением $H_{r_{max}}$, А/м	Результирующая напряженность постоянного магнитного поля в зонах с минимальным значением $H_{r_{min}}$, А/м
0	0	0
750	4,5	0,66
1300	10,8	1,39
8000	17,8	4,935
10000	25,3	7,056

Таблица 2. Изменение ударной вязкости в зонах с максимальным и минимальным значением результирующей напряженности постоянного магнитного поля

Время эксплуатации t, тыс. ч	Ударная вязкость в зоне с максимальным значением результирующей напряженности постоянного магнитного поля КСУ, Дж/см ²	Ударная вязкость в зоне с минимальным значением результирующей напряженности постоянного магнитного поля, КСУ, Дж/см ²
0	207,0	207,0
750	10,1	15,2
1300	5,6	10,3
8000	1,8	2,7
10000	1,7	2,3

Выводы

Проведенный анализ результатов измерения магнитных параметров в исследуемых фрагментах труб показал неравномерность

распределения напряженности постоянного магнитного поля по всей поверхности. При этом, как показали исследования, в начальный период эксплуатации регистрируются

незначительные проявления магнитного поля, с увеличением срока эксплуатации значение магнитного поля по всей поверхности трубы увеличивается, и формируются области экстремальных значений.

Проявление ферромагнетизма, на наш взгляд, происходит по двум механизмам. С одной стороны, это связано с диффузией углерода из-за длительного воздействия богатой углеродом среды, при котором образовавшиеся в результате науглероживания различные типы карбидов истощают легирующие элементы в поверхностной области стенки реакционных труб. С другой стороны, постепенный рост оксидов во внутреннем направлении растворяет в подповерхностной области исходные карбиды и приводит к более глубо-

кому науглероживанию, а также дополнительному истощению легирующих элементов. Однако механизм проявления ферромагнитных свойств в процессе эксплуатации змеевиков реакционных печей требует дополнительных исследований.

Проведенные эксперименты на ударный изгиб показали, что в зонах с высоким значением параметров магнитного поля ударная вязкость труб снижается на 2 порядка по сравнению с состоянием поставки.

Таким образом, обнаруженная связь между напряженностью магнитного поля и ударной вязкостью может служить основой для разработки метода по определению потенциально опасных зон змеевиков реакционных печей, а также критерия отбраковки труб.

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Borjali S., Allahkaram S.R., Khosravi H. Effects of Working Temperature and Carbon Diffusion on the Microstructure of High-Pressure Heat-Resistant Stainless-Steel Tubes used in Pyrolysis Furnaces during Service Condition // *Materials & Design*. 2012. No. 34. P. 65–73.

2. Чиркова А.Г., Рубцов А.В., Наумкин Е.А., Гайдукевич У.П. Испытание сварной оболочковой конструкции, выполненной из стали 10X23N18T, эксплуатируемой в печи пиролиза // *Мировое сообщество: проблемы и пути решения*: сб. ст. Уфа: УГНТУ, 2007. С. 33–42.

3. 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.

4. Otegui J. Luis, De Bona J., Fazzini P.G. Effect of Coking in Massive Failure of Tubes in an Ethylene Cracking Furnace // *Eng. Fail. Anal.* 2015. No. 48. P. 201–209.

5. 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.

6. Ul-Hamid A., Tawancy H.M., Mohammed A.-R.I., Abbas N.M. Failure Analysis of Furnace Radiant Tubes Exposed to Excessive Temperature // *Eng. Fail. Anal.* 2006. No. 13 (6). P. 1005–1021.

7. Stevens K.J., Parbhu A., Soltis J., Stewart D. Magnetic Force Microscopy of a Carburized Ethylene Pyrolysis Tube // *J. Phys. D (Appl. Phys.)*. 2003. No. 36(2). P. 164–168.

8. 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 // *Scr. Mater.* 2008. No. 59 (9). P. 1010–1013.

9. Авдеева Л.Г. Изменение структуры и механических свойств аустенитной стали 20X23N18 в условиях пиролиза углеводородов: дис. канд. техн. наук. Уфа: УГНТУ, 2003. 108 с.

10. Чиркова А.Г. Снижение повреждений в металле труб печей пиролиза в процессе паровоздушного выжига: дис. ... канд. техн. наук. Уфа: УГНТУ, 1998. 165 с.

11. Закирничная М.М., Чиркова А.Г., Кузеев И.Р. Изменение структуры и свойств металла труб змеевиков печей пиролиза в процессе эксплуатации // *Тюмень, нефть и газ*, 1998. № 2. С. 87–92.

12. Сагарадзе В.В., Земцова Н.Д., Старченко Е.И. Влияние магнитного упорядочения на свойства аустенитных сплавов // *Физика металлов и металловедение*, 1983. Т. 55. № 1. С. 113–124.

13. ГОСТ 9454-78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженной, комнатной и повышенной температурах. М.: Изд-во стандартов, 1979. 12 с.

REFERENCES

1. Borjali S., Allahkaram S.R., Khosravi H. Effects of Working Temperature and Carbon Diffusion on the Microstructure of High Pressure Heat-Resistant Stainless Steel Tubes used in Pyrolysis Furnaces during Service Condition. *Materials & Design*, 2012, No. 34, pp. 65–73.

2. Chirkova A.G., Rubtsov A.V., Naumkin E.A., Gaidukevich U.P. Ispytanie svarnoi obolochkovoi konstruktssii, vpolnennoi iz stali 10Kh23N18T, ekspluatiruemoi v pechi piroliza [Testing of a Welded Shell Structure Made of 0Kh23N18T steel Operated in a Pyrolysis Furnace]. *Sbornik statei «Mirovye soobshchestvo: problemy i puti resheniya»* [Collection of Articles «The World Community: Problems and Solution»]. Ufa, UGNTU Publ., 2007, pp. 33–42. [in Russian]

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

4. Otegui J. Luis, De Bona J., Fazzini P.G. Effect of Coking in Massive Failure of Tubes in an Ethylene Cracking Furnace. *Eng. Fail. Anal.*, 2015, No. 48, pp. 201–209.

5. Kuzeev I.R., Naumkin E.A., Sungatullina A.G., Kuchukov T.M. Formirovanie ochagov razrusheniya v trubakh zmeevikov reaktionnykh pechei [The Formation of

Foci of Destruction in the Tubes of the Coils of the Reaction Furnaces]. *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2015, Vol. 13, No. 3, pp. 181–186. [in Russian].

6. Ul-Hamid A., Tawancy H.M., Mohammed A.-R.I., Abbas N.M. Failure Analysis of Furnace Radiant Tubes Exposed to Excessive Temperature. *Eng. Fail. Anal.*, 2006, No. 13 (6), pp. 1005–1021.

7. Stevens K.J., Parbhu A., Soltis J., Stewart D. Magnetic Force Microscopy of a Carburized Ethylene Pyrolysis Tube. *J. Phys. D (Appl. Phys.)*, 2003, No. 36 (2), pp. 164–168.

8. 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. *Scr. Mater.* 2008, No. 59 (9), pp. 1010–1013.

9. Avdeeva L.G. *Izmenenie struktury i mekhanicheskikh svoystv austenitnoi stali 20X23H18 v usloviyakh piroliza uglevodorodov: dis. ... kand. tekhn. nauk.* [Changes in the Structure and Mechanical Properties of Austenitic Steel 20X23H18 under Conditions of the Pyrolysis of Hydrocarbons: Cand. Engin. Sci. Dis.]. Ufa, UGNTU Publ., 2003. 108 p. [in Russian].

10. Chirkova A.G. *Snizhenie povrezhdenii v metalle trub pechei piroliza v protsesse parovozdushnogo vyzhiga: dis. kand. tekhn. nauk* [Reducing Damage in the Metal Pipes of Pyrolysis Furnaces in the Process of Steam-Air Burning: Cand. Engin. Sci. Diss.]. Ufa, UGNTU Publ., 1998. 165 p. [in Russian].

11. Zakirnichnaya M.M., Chirkova A.G., Kuzeev I.R. *Izmenenie struktury i svoystv metalla trub zmeevikov pechei piroliza v protsesse ekspluatatsii* [Changes in the Structure and Properties of Metal Pipes of Pyrolysis Furnace Coils During Operation]. *Neft i gaz — Oil and Gas*, 1998, No. 2, pp. 87–92. [in Russian].

12. Sagaradze V.V., Zemtsova N.D., Starchenko E.I. *Vliyanie magnitnogo uporyadocheniya na svoystva austenitnykh splavov* [Effect of Magnetic Ordering on the Properties of Austenitic Alloys]. *Fizika metallov i metallovedenie — Metal Physics and Metallography*, 1983, Vol. 55, No. 1, pp. 113–124. [in Russian].

13. GOST 9454-78. *Metally. Metod ispytaniya na udarnyi izgib pri ponizhennoi, komnatnoi i povyshennoi temperaturakh* [GOST 9454-78. Metals. Impact Test Method at Low, Room and Elevated Temperatures]. Moscow, Standards Publ., 1979, 12 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, Post-graduate Student of Process Machinery and Equipment Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: jamshed8808@mail.ru

Кузеев Искандер Рустемович, д-р техн. наук, профессор, зав. 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

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

e-mail: ynaumkin@mail.ru