

УДК 620.1(075)

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПАКТНЫХ ОБРАЗЦОВ ПРИ АНАЛИЗЕ
ПРИЧИН РАЗРУШЕНИЯ КОМПЕНСАТОРА**

**COMPACT SPECIMENS USE
IN COMPENSATOR DESTRUCTION CAUSES ANALYSIS**

Р.Н. Хасанов, В.А. Гафарова, Г.Б. Гафаров, И.Р. Кузеев

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

**Rim N. Hasanov, Victoria A. Gafarova,
Gazinur B. Gafarov, Iskander R. Kuzeev**

Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation

e-mail: gafarova.vika@bk.ru

Аннотация. Использование компактных образцов для определения механических характеристик металлических материалов бывает необходимым с различных точек зрения. Главная причина заключается в том, что толщина материала не позволяет использовать стандартный образец. Особенно это актуально, когда образцы металла взяты из зоны разрушения и нет возможности выдержать требуемые геометрические размеры. Развито направление использования компактных образцов в виде тонких дисков различных диаметров, которые пенетрируют индентором. При действии индентора образцы получают изгибные деформации, которые носят пластический характер. В то же время диаграммы разрушения имеют сложный характер и появляются трудности при их интерпретации. Нами развивается направление использования компактных образцов в виде прямоугольных пластин различной толщины. Исследования показывают, что информативной, с точки зрения

интерпретации причин разрушения, является удельная работа разрушения. Однако этот параметр оказался зависимым от толщины образца, и анализ требует знания характера этой зависимости. Такие исследования были выполнены и получена логарифмическая зависимость работы разрушения от толщины образцов. Для реализации алгоритма определения причин разрушения использовали разрушенный компенсатор, из которого вырезали несколько фрагментов, прилегающих к поверхности трещины. Предварительно провели измерения распределения толщины оболочки во всех изучаемых фрагментах, определили химический состав образцов с внешней и внутренней сторон, оценили характер распределения твердости. Обнаружено, что измеряемые параметры имеют большой разброс значений. Анализ химического состава показал существенно повышенное содержание серы в стали. Авторы делают вывод о том, что компенсатор обречен на разрушение.

Abstract. Use of compact specimens for determination the mechanical characteristics of metallic materials can be necessary from different perspectives. The main cause is that the material thickness does not allow the use of standard specimen. This is particularly relevant when specimens of metals have been taken from destruction area and it is not possible to follow the required geometrical dimensions. It is developed the direction of compact specimens' use, represented by thin slices of different diameters which are penetrated by indenter. Under indenter, the specimens get flexural deformations which have a plastic nature. At the same time, the destruction diagrams are complex and it is difficult to interpret them. We develop the direction of compact specimens' use, represented by rectangular plates of different thickness. The researches show that the specific destruction work is informative from the perspective of destruction causes interpretation. However, this parameter turned out to be dependent on specimen thickness, and the analysis requires knowledge of the nature of this dependence. Such researches have been performed, and the logarithmic dependence of destruction work on specimens' thickness has been

obtained. For implementation of the algorithm of destruction causes determination it was used the destroyed compensator, from which there were cut several fragments adjacent to the fracture. The measurements of thickness distribution of cover in all studied fragments were preliminary held, the chemical composition of specimens from the inside and outside was determined, the nature of hardness distribution was assessed. It was found that measured parameters have a wide spread of values. The analysis of chemical composition showed the significant increase of sulphur content in steel. The authors conclude that the compensator is condemned to be destroyed.

Ключевые слова: компактные образцы, удельная работа разрушения, предел прочности, твердость, компенсатор

Key words: compact specimens, specific destruction work, breaking point, hardness, compensator

Аварии в нефтегазовой отрасли носят разрушительный характер. Особенно сложно проследить причинно-следственную связь между отдельными событиями при ее каскадном характере развития. Существует документ [1], который регламентирует порядок расследования причин аварий и инцидентов. В пункте 2.11 этого документа указано, что при необходимости комиссия по техническому расследованию причин аварии может привлекать специализированные экспертные организации, которые в пределах своей компетенции готовят заключения по ее запросу.

В этом документе не конкретизируется, какие именно сведения должны формироваться при расследовании. Традиционно определяются механические характеристики конструкционного материала с эпицентра разрушений. Измеряется распределение твердости в конструкционном материале, и, если позволяет объем материала изготовить стандартные образцы, то определяются другие механические характеристики: предел прочности, предел текучести, относительное сужение, ударная вязкость.

При этом изучают характер изломов, проводят металлографические исследования. Однако не всегда отобранная проба металла позволяет изготовить для испытания стандартные образцы, тогда ограничиваются определением твердости, которая коррелирует с другими механическими характеристиками. Как показывают наши исследования, металл с разрушенных объектов обладает существенной неравномерностью свойств. Твердость, измеренная в соседних точках поверхности металла, может отличаться на 40 % и более. При таком разбросе трудно апеллировать к результатам таких измерений как к объективным данным.

Нами предлагается разработать систему оценки причин аварий с применением компактных образцов различной конфигурации [2–5]. В этих работах показано, что свойства металла в процессе деформирования существенно меняются и это, в свою очередь, сказывается на механических показателях. В то же время удобные с точки зрения отбора проб образцы в виде тонких дисков требуют сложного анализа и интерпретации результатов. С этой точки зрения применение плоских компактных прямоугольных образцов упрощает испытания и анализ полученных результатов. Особенно чувствительным параметром к накопленным повреждениям является удельная работа разрушения образца, которая находится в логарифмической зависимости от толщины испытываемых образцов [6]:

$$A = 1178,8 \ln(h) + 5928,8, \quad (1)$$

где A – удельная работа разрушения; h – толщина образца.

Имея зависимость между толщиной образца и удельным значением работы разрушения типа (1), можно испытывать образцы любой толщины и оценивать степень деградации материала.

Методика, основанная на уравнении (1), реализуется на примере разрушенного во время масштабной аварии компенсатора, показанного на рисунке 1.



Рисунок 1. Разрушенный компенсатор

Фрагменты компенсатора были отделены и подвергнуты исследованию в следующей последовательности (рисунок 2).



Рисунок 2. Разметка и разделка фрагментов на образцы для проведения испытания

Поскольку на первом этапе испытаний было необходимо определить степень деградации материала компенсатора, фрагмент для исследований

был выбран не из зоны разрушения, а из зоны приварки компенсатора к трубе. Перед тем как образцы подвергались растяжению с последующим разрушением, определялась толщина образцов в соответствии со схемой на рисунке 3.

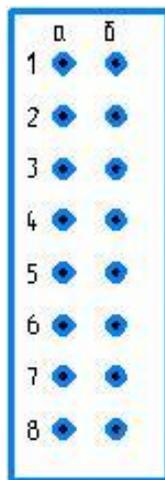


Рисунок 3. Схема измерения толщины образцов

Толщину измеряли ультразвуковым толщиномером марки ТУЗ-1. В области точек замера делали замеры твердости твердомером Роквелла Instron Wilson Hardness 574Т. Предварительно измеряли химический состав портативным рентгено-флуоресцентным спектрометром Olympus Innov-X Delta Premium.

При визуальном изучении образцов фрагмента компенсатора обратили внимание на отложения с внутренней стороны, которая соприкасалась со средой. Отложения черного цвета толщиной 0,05–0,10 мм, которые растрескивались при растяжении образцов и отслаивались фрагментарно. В таблицах 1, 2 показано распределение химических элементов на поверхности образцов без шлифовки и с удалением отложений до металлического блеска.

Таблица 1. Химический состав стали с внутренней стороны объекта, контактировавшего со средой без снятия поверхностного налета

Без шлифовки материала	%	%	%	Среднее значение
Fe	95,35	94,30	94,32	94,66
Si	1,47	0,94	0,97	1,13
S	1,337	3,605	3,217	2,720
Al	1,19	0,59	0,75	0,84
Mn	0,33	0,38	0,35	0,35
Cu	0,210	0,115	0,220	0,180
Cr	0,062	0,033	0,057	0,050
P	0,048	0,036	0	0,030
Ni	0	0	0,09	0,03

Таблица 2. Химический состав стали с внутренней стороны объекта, контактировавшего со средой с предварительной шлифовкой

С шлифовкой	%	%	%	Среднее значение
Fe	96,62	96,68	97,63	96,98
Si	1,27	1,20	0,80	1,09
S	0,254	0,287	0,220	0,250
Al	1,09	1,08	0,72	0,96
Mn	0,52	0,51	0,48	0,50
Cu	0,099	0,086	0,087	0,090
Cr	0	0	0,022	0,010
P	0,072	0,077	0,050	0,070
Zn	0,044	0,0410	0	0,030

В таблице 3 представлен химический состав материала 09Г2С, а в таблице 4 химический состав материала 16ГС.

Таблица 3. Химический состав материала 09Г2С, % [7]

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	V	N	Cu	As
до 0,12	0,5–0,8	1,3–1,7	до 0,3	до 0,035	до 0,03	до 0,3	до 0,12	до 0,008	до 0,3	до 0,08

Таблица 4. Химический состав материала 16ГС, % [7]

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	V	N	Cu	As
0,12–0,18	0,4–0,7	0,9–0,2	до 0,3	до 0,035	до 0,03	до 0,3	до 0,12	до 0,008	до 0,3	до 0,08

Сравнение данных таблиц 1 и 2 с данными таблиц 3 и 4 показывает, что реальные значения содержания элементов существенно отличаются от экспериментально полученных. Трудно идентифицировать по химическому составу сталь, хотя по паспортным данным это сталь 09Г2С. По механическим свойствам также наблюдается несоответствие стандарту. Средние значения элементного состава находили в результате трех измерений. Анализ измерений показывает, что существенно ниже стандартного содержание основного легирующего элемента марганца. Несколько выше стандартных значений содержание кремния. Обращают на себя внимание высокое содержание алюминия, который не регламентируется в стандарте, а также низкие значения содержания хрома. В некоторых точках замера хром отсутствовал. Основное несоответствие, которое может повлиять на свойства стали, заключается в высоком содержании серы. После шлифовки обнаруживается содержание серы, на порядок превышающее стандартное значение. При определении содержания серы без удаления отложений наблюдается превышение содержания этого элемента на два порядка величины: среднее значение 2,72 % при максимальном значении 3,6 %. Можно однозначно констатировать, что сера отложилась на поверхности из перерабатываемого продукта. Изучаемая сталь не предназначена для изготовления оборудования, работающего при переработке нефти с повышенным содержанием серы.

Повышенное содержание серы неизбежно приводит к увеличению скорости коррозии металла. Это подтверждается измерениями толщины стенки объекта исследования (таблица 5). Анализ измерений позволяет уточнить, что на небольшом исследуемом фрагменте толщина стенки может отличаться в 1,44 раза, а в отмеченных точках, расположенных рядом, в 1,18 раза. Этот результат показывает существенное с точки зрения обеспечения прочности расхождение в толщинах стенки.

Таблица 5. Результаты измерения толщины образцов

Номер образца	1В		1Н		2В		2Н		3В		3Н		4В		4Н	
	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б
1	3,50	3,48	3,08	3,32	3,19	3,18	3,41	3,34	2,82	2,77	4,01	3,81	3,58	3,51	3,24	3,07
2	3,42	3,55	2,94	3,07	3,3	3,25	3,38	3,3	2,95	2,92	3,78	3,65	3,69	3,6	3,15	3,02
3	3,47	3,56	2,85	3,05	3,32	3,27	3,41	3,34	3,07	3,00	3,78	3,57	3,76	3,63	3,11	2,98
4	3,55	3,62	2,81	3,03	3,36	3,25	3,35	3,30	3,12	3,05	3,69	3,46	3,77	3,65	3,09	2,95
5	3,55	3,61	2,79	2,97	3,37	3,26	3,32	3,31	3,16	3,12	3,66	3,44	3,78	3,61	3,08	2,95
6	3,53	3,56	2,86	3,01	3,32	3,23	3,41	3,36	3,18	3,14	3,67	3,48	3,67	3,56	3,13	3,04
7	3,47	3,56	3,00	3,14	3,29	3,17	3,61	3,38	3,15	3,12	3,61	3,4	3,57	3,48	3,24	3,10
8	3,42	3,47	3,15	3,21	3,63	3,12	3,67	3,48	3,30	3,23	3,7	3,48	3,44	3,49	3,32	3,27
Мин. толщина	3,42	3,47	2,79	2,97	3,19	3,12	3,32	3,30	2,82	2,77	3,61	3,40	3,44	3,48	3,47	2,95

На следующем, основном, этапе исследований испытанию на растяжение подверглись плоские компактные образцы. После испытания образцы выглядят следующим образом (рисунок 4).



Рисунок 4. Компактные образца после испытания на растяжение

Темный образец с неочищенным поверхностным слоем. Для анализа результатов испытания учитывались только те образцы, которые были разрушены в средней части вдали от захватов. Испытания были проведены на установке для статических и циклических испытаний конструкционных материалов Instron 8801.

Из таблицы 6 видно, что значения предела текучести могут отличаться в 1,6 раза, предел прочности в 1,4 раза. Это существенная неравномерность свойств. Фактически, такая неравномерность нивелирует используемый

для расчетов коэффициент запаса по пределу текучести. Обращает также на себя внимание уменьшение значения отношения предела прочности материала к пределу текучести. В стандарте на материалы для стали 09Г2С такое отношение находится в пределах 1,6, а для стали 16ГС – 1,9. Для исследуемой стали это соотношение изменяется в пределах от 1,27 до 1,53. Это говорит о том, что при эксплуатации происходило охрупчивание стали.

Таблица 6. Механические характеристики исследуемой стали

Минимальная толщина, мм	№ образца	Предел текучести, МПа	Предел прочности, Па
2,77	3В	423,06	542,00
2,79	1Н	261,82	401,57
3,12	2В	413,16	525,67
3,30	2Н	319,60	449,67
3,40	3Н	333,18	462,98
3,42	4Н	399,76	517,34
3,42	1В	319,81	413,01
3,44	4В	338,39	442,61

Используя диаграммы, полученные при испытании образцов, рассчитали удельную работу разрушения металла по схеме, показанной на рисунке 5.

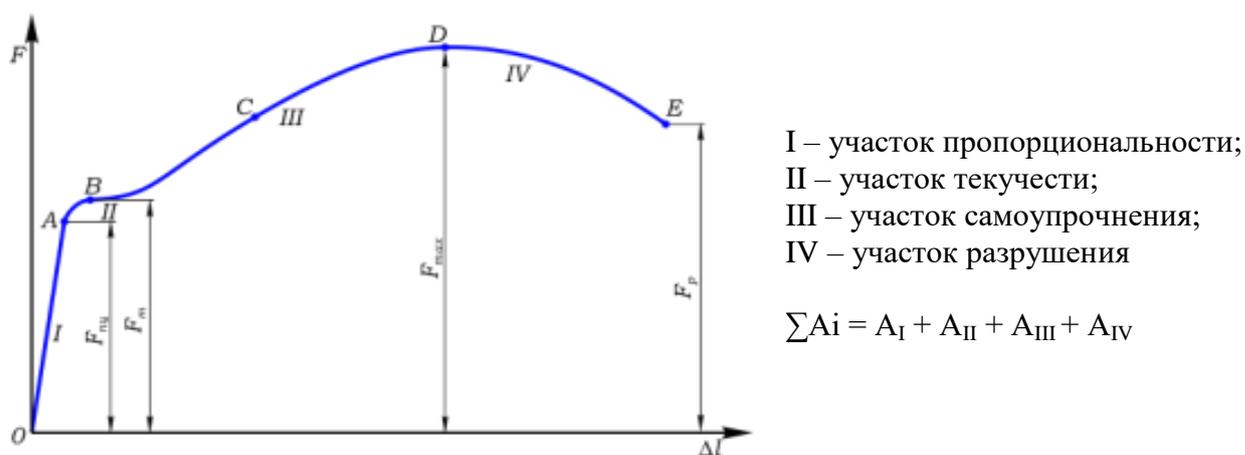


Рисунок 5. Схема определения удельной работы разрушения

Результаты расчета удельной работы разрушения металла показаны в таблице 7.

Таблица 7. Результаты определения удельной работы разрушения (Н/мм)

Ра-бота	Образец							
	1В	1Н	2В	2Н	3В	3Н	4В	4Н
A _I	6105,85	6269,22	4970,11	2500,00	7127,66	6364,48	3049,43	4324,95
A _{II}	16555,20	10686,41	17122,70	10433,00	15209,04	10150,28	10407,83	12469,81
A _{III}	269339,7	169525,3	230293,1	186350	158988,3	204733,5	167672	158751,9
A _{IV}	129985,00	7375,28	97487,01	78177,00	81505,05	77934,08	68241,51	55943,75
ΣA _i	421985,8	193856,2	349872,9	277460,0	262830,0	299182,3	249370,8	231490,4

Для анализа результатов и разработки алгоритма оценки причин разрушения конструкции полученные значения удельной работы разрушения совместили с зависимостью в соответствии с формулой (1). Эта зависимость с нанесенными экспериментальными точками показана на рисунке 6.

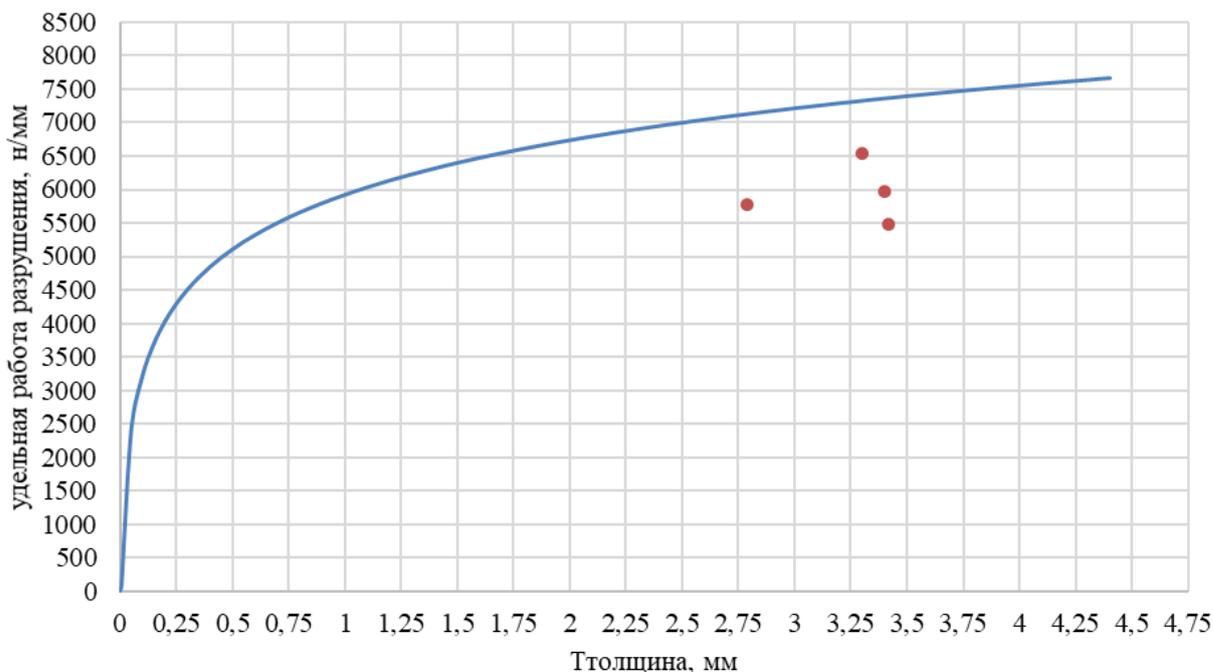


Рисунок 6. Зависимость удельной работы разрушения от толщины образцов с нанесенными экспериментальными значениями

Выводы

По данным, представленным на рисунке 6, можно сделать вывод о том, что, полученная зависимость (1) отражает действительную картину накопления повреждений. Все экспериментальные точки расположились ниже кривой, это подтверждает предварительное заключение об охрупчивании стали в процессе эксплуатации. При наличии экспериментально полученных кривых по уравнению типа (1), можно судить о степени деградации материала в процессе эксплуатации.

Список используемых источников

1. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору № 261. Об утверждении Порядка проведения технического расследования причин аварий и инцидентов на объектах, поднадзорных Федеральной службе по экологическому, технологическому и атомному надзору. URL: <http://docs.cntd.ru/document/902102877> (дата обращения: 05.05.2019).

2. Khasanov R.N., Valiev A.S., Kuzeev I.R. Assessment of Mechanical Characteristics of Steel Subject to Cyclic Loads Effect on Non-Standard Compact Specimens // MATEC Web of Conferences. 2018. № 224. URL: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201822404025> (дата обращения: 05.05.2019).

3. Khasanov R.N., Valiev A.S., Kuzeev I.R. Assessment of Steel Mechanical Characteristics of Non-Standard Compact Specimens under Statistical Tests // MATEC Web of Conferences. 2018. № 224. URL: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201822403010> (дата обращения: 05.05.2019).

4. Abdulganiev M.R., Khasanov R.N., Gafarova V.A. Determination of Specific Failure Work on Compact Steel Samples // Materials Science Forum. 2019. Vol. 945, pp 569-573. DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.945.569.

5. Hasanov R.N., Valieva A.S., Kuzeev I.R. Development of the Algorithm for Determination of Mechanical Properties of Steel 20 with Different Levels of Cumulative Fatigue Damage with the Application of Compact Samples // Solid State Phenomena Submitted. 2018. Vol. 284. pp 581-586. DOI:10.4028/www.scientific.net/SSP.284.581.

6. Хасанов Р.Н., Гафарова В.А., Пивоваров В.Ю., Кузеев И.Р. Особенности разрушения тонких стальных образцов при растяжении // Сетевое издание «Нефтегазовое дело». 2019. № 2. С. 94-111.

7. ГОСТ 19281-2014. Прокат повышенной прочности. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2015. 52 с.

References

1. Prikaz Federal'noi sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru № 261. Ob utverzhdenii Poryadka provedeniya tekhnicheskogo rassledovaniya prichin avarii i intsidentov na ob'ektakh, podnadzornykh Federal'noi sluzhbe po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru [On Approval of the Procedure of Technical Investigation of the Causes of Accidents on Sites under Control of the Federal Service for Ecological, Technological and Atomic Supervision]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/902102877> (accessed 05.05.2019). [in Russian]

2. Khasanov R.N., Valiev A.S., Kuzeev I.R. Assessment of Mechanical Characteristics of Steel Subject to Cyclic Loads Effect on Non-Standard Compact Specimens. MATEC Web of Conferences, 2018, No. 224. Available at: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201822404025> (accessed 05.05.2019).

3. Khasanov R.N., Valiev A.S., Kuzeev I.R. Assessment of Steel Mechanical Characteristics of Non-Standard Compact Specimens under Statistical Tests. MATEC Web of Conferences, 2018, No. 224. Available at: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201822403010> (accessed 05.05.2019).

4. Abdulganiev M.R., Khasanov R.N., Gafarova V.A. Determination of Specific Failure Work on Compact Steel Samples. Materials Science Forum, 2019, Vol. 945, pp 569-573. DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.945.569.

5. Hasanov R.N., Valieva A.S., Kuzeev I.R. Development of the Algorithm for Determination of Mechanical Properties of Steel 20 with Different Levels of Cumulative Fatigue Damage with the Application of Compact Samples. Solid State Phenomena Submitted, 2018, Vol. 284, pp 581-586. DOI:10.4028/www.scientific.net/SSP.284.581.

6. Khasanov R.N., Gafarova V.A., Pivovarov V.U., Kuzeev I.R. Osobennosti razrusheniya tonkikh stal'nykh obraztsov pri rastyazhenii [Peculiarities of Thin Steel Specimens' Fracture under Tension]. Setevoe izdanie «Neftegazovoe delo» – Online Edition «Oil and Gas Business», 2019, No. 2, pp. 94-111. [in Russian].

7. GOST 19281-2014. Prokat povyshennoi prochnosti. Obshchie tekhnicheskie usloviya [State Standard 19281-2014. Hire of the Increased Durability. General Technical Conditions]. Moscow, Standardinform Publ., 2015. 52 p. [in Russian]

Сведения об авторах

About the authors

Хасанов Рим Наилевич, соискатель кафедры «Технологические машины и оборудование», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Rim N. Hasanov, External Doctoral Candidate of Technological Machines and Equipment Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: hasanov_rim@mail.ru

Гафарова Виктория Александровна, преподаватель кафедры «Технологические машины и оборудование», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Victoria A. Gafarova, Lecturer of Technological Machines and Equipment Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: gafarova.vika@bk.ru

Гафаров Газинур Булатович, магистрант кафедры «Технологические машины и оборудование», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Gazinur B. Gafarov, Master Student of Technological Machines and Equipment Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: gazinurgafarov@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 Technological Machines and Equipment Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: kuzeev2002@mail.ru