ВЛИЯНИЕ СХЕМЫ ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ ОБРАЗЦОВ ИЗ ГИБКИХ ТРУБ КОЛТЮБИНГОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА ИЗМЕНЕНИЕ СКОРОСТИ УЛЬТРАЗВУКА В СТАЛИ

THE INFLUENCE OF THE CYCLIC LOADING SCHEME OF SAMPLES FROM FLEXIBLE TUBES OF COIL-TUBING TECHNOLOGIES ON THE CHANGE OF THE ULTRASONIC SPEED IN STEEL

Р. Ф. Джураев

Rustam F. Dzhuraev

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

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

А. А. Кирханов

Arsen A. Kirkhanov

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

И. Р. Кузеев

Iskander R. Kuzeev

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

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

В процессе проведения технологической операции с применением колтюбинговой установки гибкая насосно-компрессорная труба (ГНКТ) при перемещении по направляющей дуге, наматывании на барабан установки, а также при эксплуатации внутри скважины подвергается циклическому изгибу таким образом, что верхние образующие участки трубы циклически растягиваются, а нижние — циклически сжимаются. Такое механическое воздействие вызывает различный процесс накопления усталостных повреждений по окружности материала нагружаемого объекта. Данный факт вызывает сложности при достоверной оценке состояния материала ГНКТ. Широкое распространение при оценке технического состояния объектов получили ультразвуковые методы контроля. Учитывая, что при толщинометрии используется скорость распространения продольных ультразвуковых волн в материале, в работе рассматриваются закономерности их изменения при различной степени поврежденности материала ГНКТ, подверженной циклической нагрузке. Испытания проводились на образцах плоского типа, изготовленных из стали 20, на одноосное нагружение по схеме «отнулевого цикла», одни из которых были подвержены циклическому растяжению, а другие — циклическому сжатию. Скорость ультразвука определялась через каждые 500 циклов нагружения вплоть до разрушения образцов, а также в их исходном состоянии перед проведением испытаний.

Ключевые слова

циклическое растяжение;
циклическое сжатие; гибкие трубы
колтюбинговых технологий;
уровень накопленных
повреждений; скорость
ультразвука

Анализ результатов эксперимента позволил установить, что скорость распространения продольной ультразвуковой волны является параметром, чувствительным к переходу процесса разрушения с микроуровня на макроуровень, которое является предельным состоянием материала. Основное различие между результатами, полученными при циклическом растяжении, и результатами, полученными при циклическом сжатии, заключается в характере изменения скорости ультразвука. После перехода процесса разрушения на макроуровень при растяжении наблюдается снижение исследуемого параметра, а при сжатии — увеличение.

Снижение скорости ультразвука после достижения предельного состояния материала объекта, подверженного циклическому растяжению, обусловлено образованием внутренних пор, рассеивающих ультразвуковые волны, а рост данного параметра при циклическом сжатии обусловлен образованием внутренней трещины, препятствующей возникновению внутренних пор.

In the process of technological operation using a coiled tubing unit, a coiled tubing (CT), when moving along a guide arc, winding on a unit drum, as well as during operation inside a well, is subjected to cyclic bending in such a way that the upper forming sections of the pipe are cyclically stretched, and the lower — are cyclically compressed. Such mechanical action causes a different process of fatigue damage accumulation around the circumference of the material of the loaded object. This fact causes difficulties in a reliable assessment of the state of the CT material.

Ultrasonic control methods are widely used in assessing the technical condition of objects. Considering that the velocity of propagation of longitudinal ultrasonic waves in the material is used in thickness measurement, the work considers the regularities of their change at various degrees of damage to the CT material subjected to cyclic loading. The tests were carried out on flat-type specimens made of steel 20 for uniaxial loading according to the «zero cycle» scheme, some of which were subjected to cyclic tension, while others were subjected to cyclic compression. The ultrasound speed was determined every 500 loading cycles until the destruction of the samples, as well as in their initial state before testing.

Analysis of the results of the experiment made it possible to establish that the propagation velocity of the longitudinal ultrasonic wave is a parameter sensitive to the transition of the fracture process from the microlevel to the macrolevel, which is the limiting state of the material. The main difference between the results obtained with cyclic stretching and those obtained with cyclic compression is the nature of the change in the ultrasound velocity. After the transition of the fracture process to the macrolevel, a decrease in the investigated parameter is observed in tension, and an increase in compression.

A decrease in the speed of ultrasound after reaching the limiting state of the material of an object subjected to cyclic tension is due to the formation of internal pores that scatter ultrasonic waves, and an increase in this parameter during cyclic compression is due to the formation of an internal crack that prevents the formation of internal pores.

Введение

Колтюбинг находит широкое применение в области капитального ремонта, бурения скважин, заканчивания, добычи и разведки в нефтяной промышленности [1]. Разработанные технологии на основе использования гибких насосно-компрессорных труб (ГНКТ) имеют существенные преимущества по сравнению с традиционным способом бурения и ремонта скважин, которые заключаются в высокой рабочей эффективности, низкой стои-

мости, экономии времени и более высокой безопасности.

Однако условия эксплуатации колтюбинговых установок, включающих ГНКТ, являются очень сложными. Каждая спуско-подъемная операция сопровождается пластическими деформациями ГНКТ, возникновение которых возможно при ее выпрямлении после разматывания с барабана колтюбинговой установки, в процессе ее изгиба при прохождении через направляющую дугу, во время ее вы-

Keywords

cyclic stretching; cyclic compression; flexible pipes of coiled tubing technologies; level of accumulated damage; ultrasound velocity

прямления при входе в инжекторную головку, а также во время движения трубы через данные устройства в обратном направлении [2]. Следовательно, усталостное разрушение ГНКТ является серьезной проблемой из-за пластической деформации, вызванной многократным изгибом. Экспериментальные исследования и опыт работы с ГНКТ показывают, что наиболее опасным разрушающим фактором является циклическое нагружение материала в упруго-пластической области под действием изгиба [3, 4]. Согласно результатам предыдущих исследований [4, 5], прочностные свойства металла, подвергающегося переменному сжатию и растяжению, постепенно изменяются с каждым циклом нагружения. Это явление известно как усталость, которая происходит в результате образования микроскопических трещин на границе между прилегающими частицами (зернами) металла. Микротрещины распространяются вдоль зерен структуры металла до тех пор, пока не достигнут критического размера, после чего наступает разрушение. Также в работе [5] показано, что при различных уровнях накопления повреждений в материале ГНКТ происходит изменение микроструктуры, в процессе образования ячеистой структуры происходит и изменение среднего размера зерна.

Поскольку в большей степени ГНКТ работает на циклический изгиб по схеме «отнулевого цикла», то напряжения в поперечном сечении трубы распределяются по-разному: на ее верхней образующей возникают растягивающие напряжения, а на нижней – сжимающие. Механические свойства сталей на растяжение и сжатие различаются, поэтому при циклическом изгибе трубы вероятность зарождения очагов разрушения можно прогнозировать. Это можно реализовать путем применения неразрушающих методов контроля, определяя закономерности изменения физических характеристик материала со всех сторон трубы [6–8].

Одним из методов неразрушающего контроля, который широко используется для анализа материалов, является ультразвуковой

контроль. В работе [9] отмечено, что в процессе разрушения материала масса и плотность играют важную роль, а уменьшение плотности в материале является основной причиной разрушения. В работах [10, 11] отмечают высокую чувствительность скорости ультразвуковых волн к изменениям в структуре материала. Взаимодействие ультразвукового сигнала со структурой контролируемого материала может быть оценено с учетом изменения скорости распространения, потери амплитуды (или затухания) и анализа обратного рассеяния сигнала. Из вышесказанного следует, что разрыхление и порообразование в материале приводит к замедлению прохождения сигнала, что можно использовать для получения дополнительной информации о состоянии материала [12].

Оборудование и методика проведения эксперимента

В отечественной нефтегазодобывающей промышленности, помимо зарубежного оборудования, используется также оборудование российского производства, в том числе ГНКТ. Предприятие ООО «Завод гибких труб «Уралтрубмаш» (раннее АО «Уралтрубмаш») для производства ГНКТ применяют сталь 10ГМФ, сталь 10 и сталь 20 [13].

Для определения особенностей изменения механических свойств в материале ГНКТ во время циклического нагружения были использованы образцы плоского типа из стали 20. Образцы изготовлены согласно ГОСТ 25502-79 [14], толщиной $h = 4$ мм и рабочей зоной $l = 50$ мм. Испытания плоских образцов по схеме «отнулевого цикла» на циклическое растяжение и циклическое сжатие проводилось с применением разрывной машины ИР 5113-100-11.

На протяжении всего эксперимента через каждые 500 циклов нагружения испытуемого образца проводились измерения скорости прохождения продольных ультразвуковых волн через его толщину в каждой зоне измерения (рисунок 1), на которые предварительно была поделена рабочая зона данного образца.

Измерение скорости продольных ультразвуковых волн осуществлялось ультразву-

Рисунок 1. Схема расположения зон измерений на образце

ковым толщиномером Olympus 2MG-DL с датчиком D799 на частоте колебаний 5 МГц. Для определения исследуемого параметра в зоне измерения необходимо было знать фактическое значение толщины образца, которое определялось при помощи микрометра.

Скорости ультразвука в каждой зоне измерения (рисунок 1) также были определены у образца в исходном состоянии перед проведением эксперимента.

Результаты и их обсуждения

Известно, что скорость распространения ультразвуковых волн с ростом числа циклов изгибных нагружений непрерывно падает, причем наиболее быстрый спад наблюдается на последней стадии испытания непосредственно перед разрушением [15]. В работах [6–9] отмечено, что рост числа циклов нагружения ведет к образованию и накоплению микроповреждений в нагружаемом материале и снижению его плотности. Начиная с уровня накопленных повреждений $Ni/Np = 0,7$, согласно исследованиям [5, 8], число микропор и микротрещин в металле увеличивается, и начинается образование макротрещин, которое продолжается вплоть до разрушения. Также в работе [8] отмечено, что при уровнях накопленных повреждений $Ni/Np = 0,7$ насту-

пает момент начала страгивания магистральной трещины.

Согласно результатам исследований, зависимость скорости распространения ультразвуковых волн от уровня накопленных повреждений можно разделить на три стадии (рисунок 2).

На первой стадии, продолжающейся до $Ni/Np = 0,15$ после начала испытаний, наблюдается быстрое снижение скорости распространения ультразвуковых волн. На второй стадии, являющейся наиболее длительной и продолжающейся в интервале уровней накопленных повреждений от $Ni/Np = 0,15$ до $Ni/Np = 0,75$, характер распределения величин скорости ультразвуковых волн в зависимости от числа циклических нагружений представляет собой слабо убывающую линейную (почти монотонную) функцию. На заключительной стадии, которая длится от $Ni/Np = 0,75$ до разрушения испытуемого образца, происходит резкое снижение исследуемого параметра.

Зависимость скорости распространения ультразвуковых волн от уровня накопленных повреждений (рисунок 3), полученная при циклическом сжатии по схемам отнулевого цикла, также делится на три стадии.

На первой стадии, продолжающейся до $Ni/Np = 0,06$ после начала испытаний, наблюдается снижение скорости распространения

Рисунок 2. Зависимость скорости ультразвуковых продольных волн от уровня накопленных повреждений (Ni/Np) в стальных образцах при циклическом растяжении по схеме отнулевого цикла

ультразвуковых волн. На второй стадии, которая длится в интервале от $Ni/Np = 0,06$ до $Ni/Np = 0,77$ и является наиболее длительной, зависимость скорости ультразвуковых волн от числа циклов сжатия является монотонной функцией. Третья стадия, продолжающаяся от $Ni/Np = 0,77$ вплоть до разрушения, имеет тенденцию роста.

Распределение величин скорости распространения продольных ультразвуковых волн в материале стального образца, подвергаемого циклическому растяжению, на заключительной стадии (рисунок 2), начинающейся от $Ni/Np = 0,75$ и продолжающейся до разрушения, связано с образованием внутренних пор. Образование пор внутри материала приводит к рассеянию ультразвуковых волн, что вызывает снижение скорости ультразвука.

При циклическом сжатии образуется внутренняя трещина, препятствующая возникновению внутренних пор. Таким образом, распределение величин скорости распространения ультразвука в материале образца, подвергаемого циклическому сжатию, на заключительной стадии (рисунок 3), начинающейся от $Ni/Np = 0,77$ и продолжающейся вплоть до разрушения, имеет тенденцию роста.

В связи с тем, что циклическое растяжение образцов осуществлялось в упруго-пластической области, в процессе исследования имело

место их пластическое деформирование, что подтверждается снижением толщины всех рабочих зон испытываемых образцов при увеличении количества циклов нагружения. При этом в зоне разрушения снижение толщины было максимальным. В качестве иллюстрации на рисунке 4 показана зависимость снижения толщины одного из образцов.

Такой характер изменения толщины образцов обусловлен сохранением его объема после пластического деформирования: пластическое удлинение продольного размера (длины рабочей зоны) вызывает уменьшение поперечных размеров (ширины и толщины рабочей зоны).

Во избежание потери устойчивости образцов плоского типа при циклическом сжатии, нагружение осуществлялось в упругой области. В качестве иллюстрации на рисунке 5 показана зависимость изменения толщины одного из образцов при циклическом сжатии. Сначала наблюдалось небольшое снижение толщины его рабочей зоны, которое продолжалось до $Ni/Np = 0,06$. Затем до $Ni/Np = 0,63$ толщина рабочей зоны образца не изменялась, что являлось следствием упругого нагружения. Далее толщина образца снизилась на небольшую величину, а после $Ni/Np = 0,80$ наблюдалось ее резкое увеличение, что связано с разупрочнением материала и достижением текучести.

Рисунок 3. Зависимость скорости ультразвуковых продольных волн от уровня накопленных повреждений (Ni/Np) в стальных образцах при циклическом сжатии по схеме отнулевого цикла

Рисунок 4. Зависимость толщины от уровня накопленных повреждений в стальных образцах при циклическом растяжении по схеме отнулевого цикла

Рисунок 5. Зависимость толщины образца от уровня накопленных повреждений в стальных образцах при циклическом сжатии по схеме отнулевого цикла

Выводы

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что скорость распространения продольных ультразвуковых волн несет информацию о структурных изменениях в материале ГНКТ, подверженного ци-

клическому нагружению. При этом зависимость скорости распространения ультразвука в стали от уровня накопленных в ней повреждений зависит от направления прикладываемой нагрузки: при циклическом растяжении наблюдается снижение обследуемого пара-

метра перед разрушением, а при циклическом сжатии — увеличение. Это явление позволяет обнаружить растягиваемые и сжимаемые участки материала эксплуатируемой ГНКТ.

Скорость распространения ультразвука в материале, подверженного циклическому нагружению, позволяет, во-первых, выявить

переход процесса разрушения с микроуровня на макроуровень и, тем самым, предупредить разрушение данного объекта. Во-вторых, использование полученных результатов позволяет более точно оценить толщину стенки ГНКТ, что можно применить при оценке технического состояния и разработке критерия отбраковки.

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Gaddy D.E. Special Report: Practical Drilling Technology: Trend Analysis, Hydraulic Systems Expand Jack up Capabilities // *Oil and Gas Journal*. 2001. Vol. 99. No. 9. P. 76.
2. Behenna F.R., Myrick D.D., Stanley P.K., Tipton S.M., Hammond W.A. Field Validation of a Coiled Tubing Fatigue Model // *Coiled Tubing: Materials of SPE/ICoTA Conference and Exhibition*. Houston, Texas, USA. 2003. SPE-81726-MS. DOI: 10.2523/81726-ms.
3. Брылкин А.В., Буксбаум В.Б., Колесников К.И., Порошин В.Б., Усова М.В. К оценке долговечности длинномерных гибких труб // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математика. Механика. Физика*. 2012. № 34. С. 75–80.
4. Ньюман К. Рабочий ресурс непрерывной трубы (колтюбинга) // *Время колтюбинга. Время ГРП*. 2004. № 10. С. 48–52.
5. Кудашев, Р.Р., Наумкин Е.А., Кузеев И.Р., Рябов А.А., Коновалов В.В. Изменения механических характеристик материала гибких насосно-компрессорных труб в условиях циклического нагружения // *Научные труды НИПИ Нефтегаз ГНКАР*. 2015. № 2. С. 47–53. DOI: 10.5510/OGP20150200242.
6. Кудашев, Р.Р., Наумкин Е.А., Кузеев И.Р. Определение предельного состояния материала оболочковых конструкций по результатам измерения электрических свойств // *Нефтегазовое дело*. 2015. Т. 13. № 3. С. 176–180.
7. Ключев В.В. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник. М.: Машиностроение, 1995. 488 с.
8. Наумкин Е.А. Методология прогнозирования ресурса нефтегазового оборудования, эксплуатируемого в условиях циклического нагружения, на стадии проектирования и эксплуатации: дис. ... д-ра техн. наук. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2011. 244 с.
9. Муравьев В.В., Зуев Л.Б., Комаров К.Л. Скорость звука и структура сталей и сплавов. Новосибирск: Наука, 1996. 181 с.
10. Щипачев А.М., Наумкин Е.А., Кузеев И.Р. Изменение закона распределения скорости ультразвуковых волн при циклическом нагружении стали 09Г2С в малоцикловой области // *Вестник УГНТУ*. 2012. Т. 16. № 5 (50). С. 89–92.
11. 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. науч. ст.* Уфа: Изд-во УГНТУ, 2003. № 14. С. 135–142.
12. Наумкин Е.А. Оценка долговечности аппаратов, подверженных малоцикловой усталости, по скорости

ультразвука: на примере стали 09Г2С: дис. ... канд. техн. наук. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2000. 125 с.

13. Козловский А.М., Пыхов С.И., Кочетков И.М., Кривихин И.М., Пыхов Л.М., Байбулатов С.Р. Длинномерные сварные трубы из стали 10ГМФ. Челябинск: Изд-во ЦНТИ, 2003. 74 с.

14. ГОСТ 25.502-79. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость. М.: Изд-во стандартов, 1985. 32 с.

15. Зуев Л.Б., Соснин О.В., Чиракадзе Д.З., Громов В.Е., Муравьев В.В. Акустический контроль долговечности стальных образцов и восстановление их ресурсов // *Прикладная механика и техническая физика*. 1998. Т. 39. № 4 (230). С. 180–183.

REFERENCES

1. Gaddy D.E. Special Report: Practical Drilling Technology: Trend Analysis, Hydraulic Systems Expand Jack up Capabilities. *Oil and Gas Journal*, 2001, Vol. 99, No. 9, pp. 76.
2. Behenna F.R., Myrick D.D., Stanley P.K., Tipton S.M., Hammond W.A. Field Validation of a Coiled Tubing Fatigue Model. *Materials of SPE/ICoTA Conference and Exhibition «Coiled Tubing»*. Houston, Texas, USA, 2003, SPE-81726-MS. DOI: 10.2523/81726-ms.
3. Brylkin A.V., Buksbaum V.B., Kolesnikov K.I., Poroshin V.B., Usova M.V. K otsenke dolgovechnosti dlinnomernykh gibkikh trub [Estimation of Long Coiled Tubing Durability]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Matematika. Mekhanika. Fizika — Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematics. Mechanics. Physics*, 2012, No. 34, pp. 75–80. [in Russian].
4. N'yuman K. Rabochii resurs nepreryvnoi truby (kolyubinga) [Working Life of a Continuous Pipe (Coiled Tubing)]. *Vremya kolyubinga. Vremya GRP — Coiled Tubing Times Journal*, 2004, No. 10, pp. 48–52. [in Russian].
5. Kudashev, R.R., Naumkin E.A., Kuzeev I.R., Ryabov A.A., Kononov V.V. Izmeneniya mekhanicheskikh kharakteristik materiala gibkikh nasosno-kompressornykh trub v usloviyakh tsiklicheskogo nagruzheniya [Change of Mechanical Behavior of Elastic Tubing Material in Periodic Loading Conditions]. *Nauchnye trudy NIPI Neftgaz GNKAR — SOCAR Proceedings*, 2015, No. 2, pp. 47–53. DOI: 10.5510/OGP20150200242. [in Russian].
6. Kudashev, R.R., Naumkin E.A., Kuzeev I.R. Opredelenie predel'nogo sostoyaniya materiala obolochkovykh konstruksii po rezul'tatam izmereniya elektricheskikh svoistv [Limit State Definition of Shell Constructions by Results of Electrical Properties

Measurements]. *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2015, Vol. 13, No. 3, pp. 176-180. [in Russian].

7. Klyuev V.V. *Nerazrushayushchii kontrol' i diagnostika: Spravochnik* [Nondestructive Testing and Diagnostics: a Handbook]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1995. 488 p. [in Russian].

8. Naumkin E.A. *Metodologiya prognozirovaniya resursa neftegazovogo oborudovaniya, ekspluatiruemogo v usloviyakh tsiklicheskogo nagruzheniya, na stadii proektirovaniya i ekspluatatsii: dis. d-ra tekhn. nauk* [Methodology for Predicting the Resource of Oil and Gas Equipment Operated under Cyclic Loading at the Design and Operation Stage: Doct. Engin. Sci. Diss.]. Ufa, UGNTU Publ., 2011. 244 p. [in Russian].

9. Muravev V.V., Zuev L.B., Komarov K.L. *Skorost' zvuka i struktura staley i splavov* [Sound Speed and Structure of Steels and Alloys]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1996. 181 p. [in Russian].

10. Shchipachev A.M., Naumkin E.A., Kuzeev I.R. *Izmenenie zakona raspredeleniya skorosti ul'trazvukovykh voln pri tsiklicheskom nagruzhenii stali 09G2S v malotsiklovoi oblasti* [Hange of the Law of Distribution of Speed of Ultrasonic Waves at Cyclic of Steel in Low-Cyclic Area]. *Vestnik UGATU — Vestnik UGATU (Scientific Journal of Ufa State Aviation Technical University)*, 2012, Vol. 16, No. 5 (50), pp. 89–92. [in Russian].

11. 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 Zone of 09G2S Steel Using Acoustic Control Methods].

Sbornik nauchnykh statei «Mirovye soobshchestvo problemy i puti resheniya» [Collection of Scientific Articles «The World Community of Problems and Solutions»]. Ufa, UGNTU Publ., 2003, No. 14, pp. 135–142. [in Russian].

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

13. Kozlovskii A.M., Pykhov S.I., Kochetkov I.M., Krivikhin I.M., Pykhov L.M., Baibulatov S.R. *Dlinnomernye svarnye truby iz stali 10GMF* [Long-Length Welded Pipes Made of Steel 10 GMF]. Chelyabinsk, TsNTI Publ., 2003. 74 p. [in Russian].

14. *GOST 25.502-79. Raschety i ispytaniya na prochnost' v mashinostroenii. Metody mekhanicheskikh ispytaniy metallov. Metody ispytaniy na ustalost'* [State Standard 25.502-79. Strength Analysis and Testing in Machine Building. Methods of Metals Mechanical Testing. Methods of Fatigue Testing]. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 1985. 32 p. [in Russian].

15. Zuev L.B., Sosnin O.V., Chirakadze D.Z., Gromov V.E., Muravev V.V. *Akusticheskii kontrol' dolgovechnosti stal'nykh obraztsov i vosstanovlenie ikh resursov* [Acoustic Evaluation of the Endurance of Steel Specimens and Recovery of Their Serviceability]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika — Prikladnaya Mekhanika i Tekhnicheskaya Fizika*, 1998, Vol. 39, No. 4 (230), pp. 180–183. [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ABOUT THE AUTHORS

Джурсаев Рустам Фатхудинович, аспирант кафедры «Технологические машины и оборудование», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Rustam F. Dzhusraev, Post-graduate Student of Process Machinery and Equipment Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: juraev-rustam@mail.ru

Кирханов Арсен Артурович, магистрант кафедры «Технологические машины и оборудование», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Arsen A. Kirkhanov, Under-graduate Student of Process Machinery and Equipment Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: arsen-kirkhanov@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