

УДК 620.179.16

К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИИ НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ КОМПЛЕКСНОГО АКУСТИКО- ЭМИССИОННОГО И МАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ МЕТАЛЛА

© Т. Р. Загидулин¹, Р. В. Загидулин^{2*}, К. О. Осипов³¹ООО «НТЦ «Спектр»

Россия, Республика Башкортостан, 450077 г Уфа, ул. Кирова, 89.

²Башкирский государственный университет

Россия, Республика Башкортостан, 450076 г Уфа, ул. Заки Валиди, 32.

³ООО «Газпром Трансгаз Уфа»

Россия, Республика Башкортостан, 450099 г Уфа, ул. Сипайловская, 11.

Тел./факс: +7(347)234 02 12.

*Email: doctech.zagr@post.com

Исследована возможность оценки напряженно-деформированного состояния металла и прогнозирования разрушения металлоконструкции на основе микромеханической модели акустической эмиссии. Для решения этой задачи предлагается комплексное применение диагностических параметров акустической эмиссии и результатов магнитного контроля металла.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, акустический преобразователь, дефекты сплошности металла, напряженно-деформированное состояние металла, напряженность поля остаточной намагниченности, эффективное механическое напряжение.

Введение

Разрушение металлоконструкции представляют как сложный, многостадийный процесс, при этом в модели двухстадийного процесса разрушения металла, окончательной фрагментации металла предшествует стадия мелкодисперсного разрушения [1, 2].

Из теоретической модели временной зависимости диагностических параметров акустической эмиссии, учитывающей связь с параметрами повреждаемости металла, следует, что стадия мелкодисперсного разрушения имеет однородный и неоднородный этапы, которая ограничивается сверху, характеризующим остаточный ресурс металла, моментом времени накопления критической концентрации микротрещин [1, 3].

В работе [3] предложена микромеханическая модель акустической эмиссии металла, где в качестве первичного информативного акустического параметра используются суммарное число импульсов акустической эмиссии N_{Σ} и суммарная амплитуда A_{Σ} сигналов акустической эмиссии.

На этапе однородного разрушения металла при непрерывном нагружении металлоконструкции с постоянной скоростью роста механических напряжений, участки временных зависимостей суммарного числа импульсов акустической эмиссии N_{Σ} , регистрируемых акустическими преобразователями, описываются аналитическим выражением [4, 5]:

$$N_{\Sigma}(t) = k_{AE} C_0 K T \exp\left[\frac{\gamma \dot{\sigma} t - U_0}{KT}\right] / (\tau_0 \gamma \dot{\sigma}), \quad (1)$$

где k_{AE} – акустико-эмиссионный коэффициент («звучащий» объем), C_0 – начальная концентрация структурных элементов в металле до разрушения, K – универсальная газовая постоянная, T – абсолютная температура, γ – структурно-чувствительный параметр металла, t – время, $\dot{\sigma}$ – скорость роста механических напряжений металла, U_0 – энергия активации

процесса разрушения металла, τ_0 – период колебаний атомов кристаллической решетки.

На основе формулы (1) получается аналитическое выражение для временной зависимости логарифма суммарного числа импульсов акустической эмиссии металла N_{Σ} [3]:

$$\ln N_{\Sigma}(t) = \ln(k_{AE} C_0) + \frac{\gamma \dot{\sigma} t - U_0}{KT} - \ln\left(\frac{\tau_0 \gamma \dot{\sigma}}{KT}\right). \quad (2)$$

Из формулы (2) видно, что логарифм суммарного числа импульсов акустической эмиссии линейно зависит от времени, поэтому на графиках временной зависимости этап однородного мелкодисперсного разрушения металла будет описываться прямолинейным участком. Аналогичный характер имеет также временная зависимость логарифма суммарной амплитуды A_{Σ} сигналов акустической эмиссии металла.

Существует корреляция диагностических параметров на их основе с величиной разрушающей нагрузки, что свидетельствует о большом информативном преимуществе этих параметров по сравнению с первичными параметрами акустической эмиссии: суммарным числом импульсов акустической эмиссии N_{Σ} и суммарной амплитудой A_{Σ} сигналов.

На основе формулы (2) получено также аналитическое выражение для расчета величины прогнозируемых разрушающих нагрузок металла. Однако из-за методических погрешностей и погрешностей измерения величин диагностических параметров акустической эмиссии, разница между расчетными значениями прогнозируемых и действительных величин разрушающих нагрузок, меняется в довольно широком диапазоне: от 4% до 113%, что нельзя считать удовлетворительной [3].

Метод расчета

Из формулы (2) следует, что при определении фактического напряженно-деформированного состояния (НДС) металла, по временной зависимости

логарифма суммарного числа импульсов и логарифма суммарной амплитуды акустической эмиссии можно оценивать изменение механического напряжения в процессе однородного мелкодисперсного разрушения металла:

$$\Delta\sigma(t) = \sigma(t) - \sigma(t_0) = \frac{\ln N_{\Sigma}(t) - \ln N_{\Sigma}(t_0)}{\gamma/KT}, \quad (3a)$$

где $\ln N_{\Sigma}(t)$ - логарифм суммарного числа импульсов акустической эмиссии в момент времени $t=t_0$ (определяется экстраполяцией линейного участка графика), $\sigma(t)$, $\sigma(t_0)$ - величины механического напряжения металла в момент времени t и t_0 соответственно, $\Delta\sigma(t)$ - приращение величины механического напряжения металла за интервал времени $\Delta t = t - t_0$.

Если известна величина механического напряжения металла $\sigma(t_0)$ в

момент времени t_0 , то на основе формулы (3) можно установить также величину

механического напряжения металла $\sigma(t)$ в любой момент времени t :

$$\sigma(t) = \sigma(t_0) + \frac{\ln N_{\Sigma}(t) - \ln N_{\Sigma}(t_0)}{\gamma/KT}. \quad (3b)$$

Для определения величины механического напряжения металла $\sigma(t_0)$ можно использовать результаты магнитного контроля НДС металла, полученные с помощью индикаторов механического напряжения металла ИН-01м и ИН-02 сканирующего типа, принцип работы которых основан на измерении напряженности поля остаточной намагниченности, коррелирующей с механическими напряжениями металла [6, 7].

Показания индикаторов ИН-01м и ИН-02 связаны с эффективным механическим напряжением металла в плоском (или сложном) НДС, так как при магнитном контроле ими намагничивание локальной области металла осуществляется нормально к плоскости действующих механических напряжений [8, 9]:

$$H_r(\sigma_x, \sigma_y) = H_{r0} + \frac{\lambda_s H_{r0}}{\mu_0 M_s^2 N} \sigma_{эф}, \quad (4)$$

где

$\sigma_{эф} = \sqrt{(\sigma_x + \sigma_{x0})^2 + (\sigma_y + \sigma_{y0})^2 - 2\eta(\sigma_x + \sigma_{x0})(\sigma_y + \sigma_{y0})}$ - суммарное эффективное механическое напряжение металла в плоском НДС; σ_{x0} , σ_{y0} - остаточные механические напряжения в плоскости металла; σ_x , σ_y - действующие механические напряжения в плоскости металла; H_{r0} - напряженность поля остаточной намагниченности металла при отсутствии механических напряжений ($\sigma_{x0} = \sigma_{y0} = 0$); λ_s - магнитострикция насыщения металла; M_s - намагниченность насыщения металла; μ_0 - магнитная постоянная ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м); N - размагничивающий фактор остаточно намагниченного участка металла; η - коэффициент Пуассона (для конструкционных сталей $\eta = 0.29$).

Таким образом, в формуле (3б) величина механического напряжения металла $\sigma(t)$ в момент времени t этапа однородного мелкодисперсного разрушения металла соответствует величине суммарного

эффективного механического напряжения $\sigma_{эф}$ (4). Если в начальный момент времени $t=t_0$ отсутствует нагружение металла внешним воздействием, то из формулы (3б) следует, что величина механического напряжения $\sigma(t_0)$ будет равна величине остаточного эффективного механического напряжения металла, которая равна $\sigma_{эф0} = \sqrt{\sigma_{x0}^2 + \sigma_{y0}^2 - 2\eta\sigma_{x0}\sigma_{y0}}$.

Результаты и их обсуждение

Были проведены экспериментальные исследования по одноосному растяжению плоских стальных образцов, изготовленных из конструкционной стали марки 40ХФА (ГОСТ 4543-71, предел текучести $\sigma_T = 730$ МПа, предел прочности $\sigma_B = 880$ МПа [10]). Стальные образцы со стыковыми сварными швами в средней части имели следующие линейные размеры: 100 x 80 x 20 мм, при этом электросварной шов имел явные дефекты сплошности в виде подрезов глубиной 1...2 мм.

Были проведены механические испытания стальных образцов, при которых они подвергались растяжению металла с постоянной скоростью роста механической нагрузки, при этом:

- с помощью цифровой многоканальной акустико-эмиссионной системы «A-Line32D» осуществлялась регистрация импульсов акустической эмиссии с вычислением величины суммарного числа импульсов N_{Σ} и суммарной амплитуды A_{Σ} сигналов акустической эмиссии;

- с помощью индикатора механического напряжения металла ИН-01м осуществлялся магнитный контроль величины механического напряжения металла в околошовной области стального образца.

На рис. 1 показаны графики зависимости диагностических параметров акустической эмиссии от времени и величины нагружения стального образца.

Видно, что этап однородного разрушения металла стального образца действительно описывается прямолинейным участком (интервал времени $t \approx 1920...4700$ с), что хорошо согласуется с расчетной формулой (2). Этап однородного мелкодисперсного разрушения металла стального образца соответствует области упругой деформации, при котором величина эффективного механического напряжения не превышает предела текучести металла ($\sigma_{эф} \leq \sigma_T = 730$ МПа).

Из рис. 1б видно, что значения логарифма суммарного числа импульсов и суммарной амплитуды сигналов акустической эмиссии однозначно связаны с величиной эффективного механического напряжения металла, что хорошо согласуется с расчетной формулой (3).

Погрешность оценки величины эффективного механического напряжения металла стального образца на основе полученной эмпирической зависимости диагностических параметров акустической эмиссии от величины эффективного механического напряжения (рис. 1б) будет соизмерима с погрешностью экспериментальных измерений и существенно меньшей погрешности значений расчетных прогнозируемых разрушающих нагрузок металла [3].

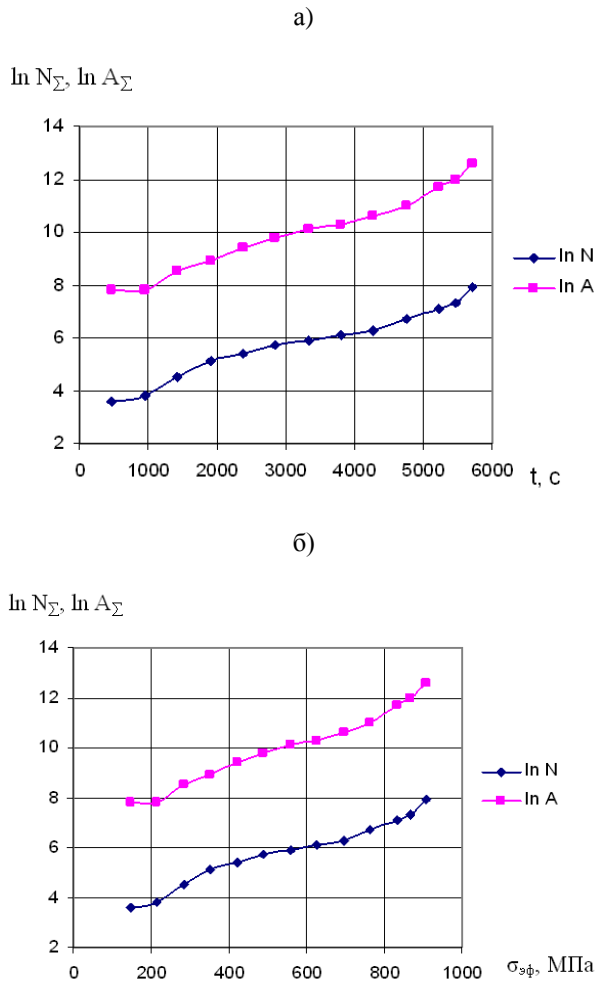


Рис. 1. Зависимость диагностических параметров акустической эмиссии от времени нагружения (а) и величины эффективного механического напряжения металла стального образца (б).

Аналогичные экспериментальные исследования были проведены на образце стальной трубы, имеющем дефекты сплошности металла (трещины, расслоения и коррозионные повреждения металла). Внешний диаметр стальной трубы, изготовленной из стали марки 09Г2С (ГОСТ 19282–73, предел текучести $\sigma_T = 325$ МПа, предел прочности $\sigma_B = 470$ МПа [10]), был равен $d = 1420$ мм, средняя толщина стенки равна $h = 18$ мм.

Нагружение металла осуществлялось давлением воды P , подаваемой во внутреннюю полость стальной трубы, график изменения которого в зависимости от времени показан на рис. 2.

При нагружении стальной трубы внутренним давлением, поверхность металла находится в плоском НДС, при котором в плоскости металла одновременно действуют окружные и продольные растягивающие механические напряжения [11]:

$$\sigma_x = P \frac{d}{2h}, \quad \sigma_y = P \frac{d}{4h}, \quad (5)$$

где σ_x , σ_y – окружные и продольные механические напряжения металла соответственно, P – давление среды внутри стальной трубы.

Нагружение металла стальной трубы осуществлялось в две стадии (рис. 2):

- на стадии I нагружения давление внутри стальной трубы P равномерно повышался до максимальной величины, соответствующей началу пластической деформации металла, после чего осуществлялось быстрое уменьшение (сброс) давления среды до некоторой минимальной величины;

- на стадии II нагружения давление внутри стальной трубы P равномерно повышался до максимальной величины, соответствующей пластической деформации металла, при котором происходило разрушение металла стальной трубы. В процессе нагружения стальной трубы осуществлялась непрерывная регистрация импульсов акустической эмиссии с вычислением величины суммарного числа импульсов N_Σ (с помощью цифровой многоканальной акустико-эмиссионной системой «A-Line32D») и магнитный контроль величины эффективного механического напряжения металла $\sigma_{эф}$ (с помощью индикатора механического напряжения металла ИН-01м).

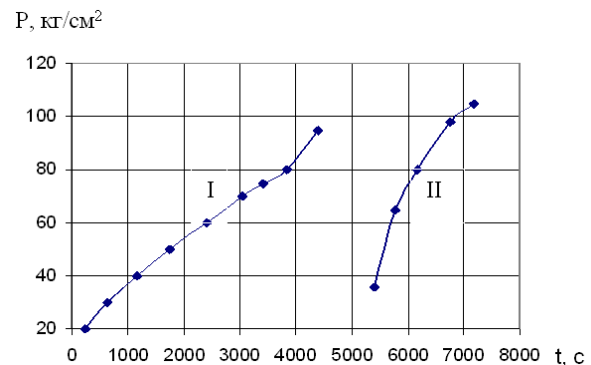


Рис. 2. Временная зависимость величины давления среды внутри стальной трубы.

На рис. 3 показаны графики зависимостей диагностического параметра акустической эмиссии от времени и величины эффективного механического напряжения металла стальной трубы.

Видно, что этап однородного разрушения металла стальной трубы описывается прямолинейным участком (интервал времени $t \approx 1166 \dots 4409$ с для I стадии нагружения стальной трубы и интервал времени $t \approx 5407 \dots 6170$ с для II стадии нагружения стальной трубы).

Следует заметить, что в I стадии нагружения стальной трубы скорость возрастания эффективного механического напряжения металла равна $\dot{\sigma} = 0.069$ МПа/с, во II стадии нагружения стальной трубы скорость нарастания эффективного механического напряжения металла равна $\dot{\sigma} = 0.162$ МПа/с, что согласуется с расчетной формулой (2).

В обеих стадиях нагружения стальной трубы этапу однородного мелкодисперсного разрушения металла соответствует область упругой деформации (рис. 3б), при котором величина эффективного механического напряжения стальной трубы в плоском НДС металла не превышает предела текучести ($\sigma_{эф} \leq \sigma_T = 325$ МПа).

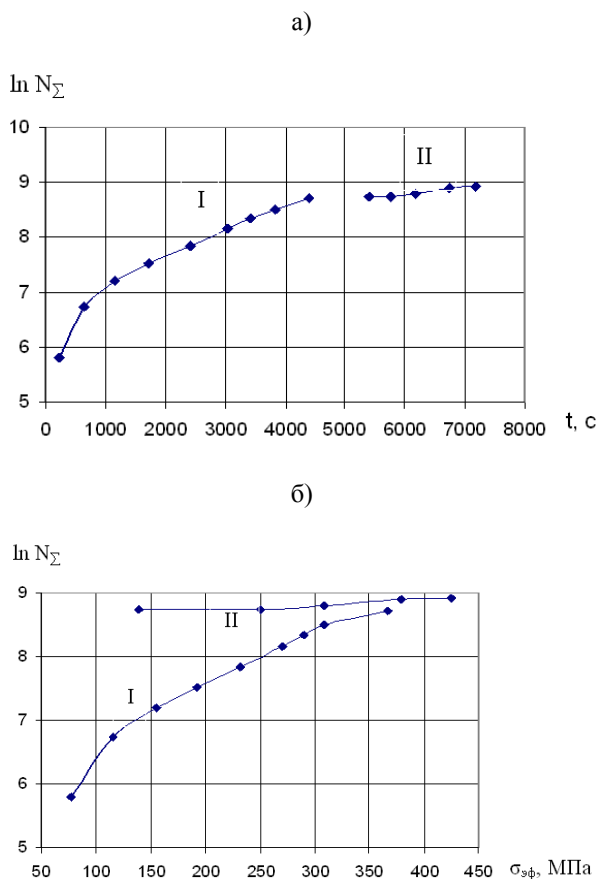


Рис. 3. Зависимость диагностического параметра акустической эмиссии от времени нагружения (а) и величины эффективного механического напряжения металла стальной трубы (б) I, II – стадии нагружения стальной трубы.

Из рис. 3б видно, что значения логарифма суммарного числа импульсов акустической эмиссии однозначно связаны с величиной эффективного механического напряжения стальной трубы в плоском НДС металла, что хорошо согласуется с расчетной формулой (3).

Величина тангенса угла наклона прямолинейного участка графика зависимости логарифма суммарного числа импульсов акустической эмиссии к временной оси, полученного для плоского стального образца (рис. 1а) равна $X_{AE} = 5.39 \cdot 10^{-4}$, величина тангенса угла наклона графика, полученного для стальной трубы в I стадии нагружения (рис. 3а), равна $X_{AE} = 4.66 \cdot 10^{-4}$, то есть разница между ними составляет около 13%. Этот результат свидетельствует о справедливости расчетных формул для случаев одноосного и плоского НДС металла непрерывно нагружаемого стального изделия.

Аналогичные результаты были получены для диагностических параметров акустической эмиссии металла в области расположения трещин, расслоения и коррозионного повреждения металла стальной трубы.

Выводы

1. Показано, что диагностические параметры – логарифм суммарного числа импульсов и логарифм суммарной амплитуды акустической эмиссии при однородном мелкодисперсном разрушении металла линейно связаны с эффективным механическим напряжением металла.

2. На основе магнитного контроля НДС металла установлено, что этап однородного мелкодисперсного разрушения при непрерывном нагружении стального изделия соответствует области упругой деформации металла.

3. Показано, что линейная зависимость диагностических параметров акустической эмиссии при однородном мелкодисперсном разрушении металла от эффективного механического напряжения справедливы для случаев одноосного и плоского НДС металла непрерывно нагружаемого стального изделия.

4. Комплексное применение методов акустико-эмиссионного и магнитного контроля НДС металла позволяют повысить надежность прогнозирования разрушения металлоконструкции на основе микро-механической модели акустической эмиссии металла.

ЛИТЕРАТУРА

- Петров В. А., Башкарев А. Я., Веттегрень В. И. Физические основы прогнозирования долговечности конструкционных материалов. СПб.: Политехника, 1993. 475 с.
- Власов В. Т., Дубов А. А. Физическая теория процесса «деформация-разрушение». Часть 1. Физические критерии предельных состояний металла. – М.: ЗАО «Тиссо», 2007. 517 с.
- Носов В. В., Самигуллин Г. Х., Ямилова А. Р., Зеленский Н. А. // Нефтегазовое дело. 2016. т.14. №1. С. 244–253.
- Носов В. В. // Дефектоскопия. 1998. №5. С. 92–98.
- Носов В. В. // Научно-технические ведомости СПбГТУ. 2006. №3. С. 20–27.
- Загидулин Р. В., Загидулин Т. Р., Аминев А. Ф., Осипов К. О., Кагарманов А. В. // Нефтегазовое дело. 2016. т.14. №4. С. 142–150.
- Загидулин Р. В., Загидулин Т. Р., Прохоров В. М. // Контроль. Диагностика. 2012. №5. С. 12–19.
- Загидулин Р. В., Загидулин Т. Р., Аминев А. Ф. // Нефтегазовое дело. 2016. т.14. №1. С. 225–233.
- Загидулин Р. В., Загидулин Т. Р., Аминев А. Ф. // Нефтегазовое дело. 2016. т.14. №1. С. 234–243.
- Конструкционные материалы: Справочник: под общ. ред. Б. Н. Арзамасова. М.: Машиностроение, 1990. 688 с.
- Дарков А. В., Шпиро Г. С. Сопrotивление материалов. М.: Высшая школа, 1989. 624 с.

Поступила в редакцию 21.01.2017 г.

**ON PREDICTION OF METAL STRUCTURE DESTRUCTION ON THE BASIS
OF COMPLEX ACOUSTIC-EMISSION AND MAGNETIC STUDY**

© **T. R. Zagidulin¹, R. V. Zagidulin^{2*}, K. O. Osipov³**

¹*STC "Spector"*

89 Kirov Street, 450054 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.

²*Bashkir State University*

32 Zaki Validi Street, 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.

³*Gazprom Transgaz Ufa*

11 Sipailovskaya Street, 450099 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.

Phone: +7 (347) 234 02 12.

**Email: doctech.zagr@post.com*

Possibility to evaluate the stressed and strained state of metal and to predict destruction of metal structure, based on acoustic emission micromechanical model is studied. As it follows from this model, the logarithm for count of total acoustic emission pulses is linearly depends on the duration of load action, which provides us possibility to associate uniquely results of stressed and strained state of metal magnetic inspection on residual magnetic field strength with acoustic emission diagnostic parameters. It is shown on the smooth and shallow stage of destruction, when only elastic deformation of metal taking place, the count of total acoustic emission pulses is strictly depending on the total effective mechanical strain of metal. This allows us to compare evaluations of the stressed and strained state of metal with limits of mechanical properties of the metal and to predict reliably the moment when metal structure would be destructed. A good accordance of calculations with experimental results is shown.

Keywords: acoustic emission, ultrasonic transducer, defects, metal, stress-strain state, residual magnetic field, effective mechanical strain.

Published in Russian. Do not hesitate to contact us at bulletin_bsu@mail.ru if you need translation of the article.

REFERENCES

1. Petrov V. A., Bashkarev A. Ya., Vettegren' V. I. Fizicheskie osnovy prognozirovaniya dolgovechnosti konstruktsionnykh materialov [The physical basis of durability prediction of structural materials]. Saint Petersburg: Politekhnik, 1993.
2. Vlasov V. T., Dubov A. A. Fizicheskaya teoriya protsessa «deformatsiya-razrushenie». Chast' 1. Fizicheskie kriterii predel'nykh sostoyanii metalla [Physical theory of the process "deformation-destruction". Pt. 1. Physical criteria of the limit states of the metal]. – Moscow: ZAO «Tisso», 2007.
3. Nosov V. V., Samigullin G. Kh., Yamilova A. R., Zelenskii N. A. Neftegazovoe delo. 2016. t.14. No. 1. Pp. 244–253.
4. Nosov V. V. Defektoskopiya. 1998. No. 5. Pp. 92–98.
5. Nosov V. V. Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGTU. 2006. No. 3. Pp. 20–27.
6. Zagidulin R. V., Zagidulin T. R., Aminev A. F., Osipov K. O., Kagarmanov A. V. Neftegazovoe delo. 2016. t.14. No. 4. Pp. 142–150.
7. Zagidulin R. V., Zagidulin T. R., Prokhorov V. M. Kontrol'. Diagnostika. 2012. No. 5. Pp. 12–19.
8. Zagidulin R. V., Zagidulin T. R., Aminev A. F. Neftegazovoe delo. 2016. t.14. No. 1. Pp. 225–233.
9. Zagidulin R. V., Zagidulin T. R., Aminev A. F. Neftegazovoe delo. 2016. t.14. No. 1. Pp. 234–243.
10. Konstruktsionnye materialy: Spravochnik [Construction materials: Handbook]: pod obshch. red. B. N. Arzamasova. Moscow: Mashinostroenie, 1990.
11. Darkov A. V., Shpiro G. S. Soprotivlenie materialov [Strength of materials]. Moscow: Vysshaya shkola, 1989.

Received 21.01.2017.