



**СЫЗРАНЦЕВ**

**Владимир Николаевич**  
(Тюменский государственный  
нефтегазовый университет)

**SYZRANTSEV**

**Vladimir Nikolaevich**  
(Tyumen, Russian Federation,  
Tyumen State Oil and Gas  
University (TSOGU))



**ЧЕРНАЯ**

**Людмила Александровна**  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

**SHERNAYA**

**Lyudmila Aleksandrovna**  
(Moscow, Russian Federation,  
Bauman Moscow State  
Technical University)



**СЫЗРАНЦЕВА**

**Ксения Владимировна**  
(Тюменский государственный  
нефтегазовый университет)

**SYZRANTSEVA**

**Kseniya Vladimirovna**  
(Tyumen, Russian Federation,  
Tyumen State Oil and Gas  
University (TSOGU))

## Расчет эквивалентных по повреждающему воздействию напряжений

**В.Н. Сызранцев, Л.А. Черная, К.В. Сызранцева**

*Прогнозирование ресурса работы деталей — важнейшая задача диагностики их прочностной надежности. Для расчета долговечности деталей в условиях эксплуатации их реальное нагружение заменяют блочным, используя блок напряжений; находят эквивалентное напряжение, зная которое, по кривой усталости определяют число циклов до разрушения. Существующие в настоящее время методики расчета эквивалентного напряжения не учитывают процессы накопления усталостного повреждения в деталях, вследствие чего сумма относительных долговечностей по всем ступеням блока, в соответствии с гипотезой суммирования усталостных повреждений равная единице, по реальным данным имеет разброс более 100%. Для повышения точности прогнозных оценок долговечности эквивалентные напряжения необходимо рассчитывать с учетом процесса накопления усталостных повреждений в материале детали.*

*В статье впервые рассмотрены основные положения методики расчета эквивалентных напряжений, основанной на использовании кинетической теории усталости. Математический аппарат, разработанный путем анализа данных испытаний образцов на долговечность, позволяет определить исходную поврежденность материала, а предложенные модели обеспечивают расчет величины накопленных усталостных повреждений в процессе циклического деформирования детали на любой ступени блока напряжений. Методика проиллюстрирована на примере обработки данных малоцикловых испытаний образцов из стали HS80.*

*Разработанные модели и алгоритмы после нагружения детали конечным числом блоков изменения напряжений позволяют: рассчитывать накопленные к этому моменту усталостные повреждения в материале, с учетом которых можно определять эквивалентные напряжения; устанавливать соответствующую накопленным повреждениям новую кривую усталости; рассчитывать в заданных условиях эксплуатации остаточный ресурс детали.*

**Ключевые слова:** малоцикловая усталость, эквивалентные напряжения, усталостные повреждения, ресурс.

## The calculation of equivalent fatigue stresses

**V.N. Syzrantsev, L.A. Chernaya, K.V. Syzrantseva**

*The most important problem in diagnosing the strength reliability of parts is predicting their endurance. To calculate the endurance under real operating conditions, the actual loading is approximated by block loads which are reduced*

*to an equivalent stress. This stress is used to determine the number of cycles to fracture on a fatigue curve. The available techniques for calculating equivalent stresses do not consider the accumulation of fatigue damage in parts. Therefore, the total endurance for all blocks has a spread over 100 %, though it must be equal to unity in accordance with the hypothesis of fatigue damage summation. To improve the accuracy of predictive durability assessments, equivalent stresses must be calculated taking into account the accumulation of fatigue damage in the material of parts. This paper first describes the main concepts of the method for calculating equivalent stresses based on the kinetic theory of fracture. The mathematical apparatus developed by analyzing durability tests makes it possible to determine the initial damage of a material and the proposed models provide calculations of the accumulated fatigue damage during cyclic deformation of samples at any stage of the block loading. The possibilities of the method are illustrated by an example of low-cycle fatigue tests on samples made of HS80 steel. The developed models and algorithms make it possible to calculate the accumulated fatigue damage in the material for a finite number of loading blocks, which allows equivalent stresses to be determined, a new fatigue curve corresponding to the accumulated fatigue damage to be set up, and the remaining life of parts under given operating conditions to be estimated.*

**Keywords:** low-cycle fatigue, equivalent stresses, fatigue damage, endurance.

Прогнозирование ресурса деталей, подвергающихся в процессе эксплуатации циклическому деформированию, осуществляется на основе кривой усталости (кривой Велера) [1–3], экспериментальные точки которой определяются путем циклического деформирования образцов до поломки [2, 4]. В настоящее время для описания результатов усталостных испытаний предложены различные регрессионные зависимости [5–9]. Как правило, эти зависимости в рамках статистических моделей учитывают рассеивание механических и усталостных свойств материала, но не отражают непосредственно исходную поврежденность материала, а также усталостные повреждения, вызываемые изменением структуры материала в процессе циклического деформирования.

Обеспечение требуемой долговечности и надежности циклически нагружаемых изделий с заданной вероятностью неразрушения обусловлено необходимостью использования более сложных моделей, отражающих процесс накопления усталостных повреждений в изделиях. Именно такие модели разработаны в кинетической теории механической усталости [10–12]. Наиболее важным практическим значением этой теории является возможность построения кривых усталости, соответствующих различной величине поврежденности материала ( $D$ ): от  $D = D_0 \geq 0$ , характеризующей начальное повреждение материала детали, которое имеет место еще до начала ее циклического деформирования, до предельной величины  $D = D_k \leq 1$ , соответствующей разрушению детали (образца) вследствие накопленных усталостных повреждений.

Рассмотрим задачу расчета числа циклов до разрушения образцов [12], изготовленных из стали HS80, для которых в малоцикловой области испытаний построена кривая усталости (рис. 1), описанная с использованием модели [13]:

$$N = 10,561 \left( 1 - 10^{\frac{602,1-\sigma}{121,811}} \right) \times \ln \left[ 1 - \exp(-1,731 \cdot 10^{-12} \sigma) \right], \quad (1)$$

где  $N$  — число циклов нагружения;  $\sigma$  — напряжение в опасном месте образца.

Пусть образец в течение  $N_1 = 1\,000$  циклов циклически деформируется при напряжении  $\sigma_1 = 450$  МПа. После чего его испытания продолжают при напряжении  $\sigma_2 = 300$  МПа. Необходимо определить какое число циклов ( $N_{\text{ост}}$ ) образец выдержит до разрушения. Если бы образец продолжал деформироваться при  $\sigma_1 = 450$  МПа, то, подставляя в формулу (1)  $\sigma = \sigma_1$ , получим  $N_p = 3,704 \cdot 10^3$ . После чего значение  $N_{\text{ост}}$  легко рассчитать по формуле

$$N_{\text{ост}} = N_p - N_1 = 2,704 \cdot 10^3.$$

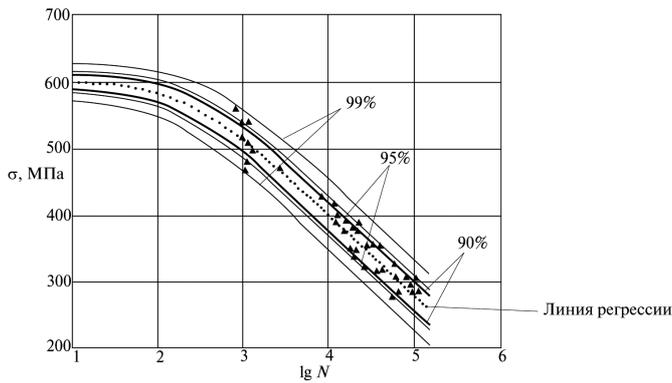


Рис. 1. Кривая усталости с рассчитанными границами 90%; 95%; 99% доверительных интервалов

По этой же формуле при  $\sigma = \sigma_2$  можно определить значение  $N_p = 6,795 \cdot 10^4$ ; при этом  $N_{ост} = 6,695 \cdot 10^4$ . Однако в данном случае, безусловно, накопленные повреждения детали за период работы при  $\sigma = \sigma_1$  в течение  $N_1$  числа циклов нагружения, не учитываются. В практике расчетов долговечности деталей часто рассматривается задача, близкая к поставленной выше, — когда при эксплуатации напряжения в детали изменяются в соответствии с заданным блоком нагружения (или режимом нагружения). Определить для этих условий долговечность детали удастся путем введения некоторого эквивалентного напряжения, для расчета которого в технической литературе [3, 13] используются относительные параметры ступеней блока. В рассматриваемом примере, как такового, блока нагружения нет и для решения задачи воспользоваться эквивалентным напряжением нельзя, поскольку в регрессионных моделях, используемых для описания данных усталостных испытаний, в том числе и в зависимости (1), отсутствуют параметры, характеризующие накопление повреждений при циклическом деформировании материала.

**Математические модели и алгоритмы решения задачи.** В работе [13] для кривой малоциклового усталости на основе кинетической теории усталости [10] получено следующее выражение:

$$N = \left( 1 - 10^{\frac{\sigma - \bar{\sigma}_B}{\theta}} \right) Q B_0 \times \ln \left[ 1 - \exp \left( - \frac{D \bar{\sigma}_B}{(1 - D)(\sigma_r - \sigma_{rt})(\bar{\sigma}_B - \sigma_r)} \sigma \right) \right], \quad (2)$$

$$\text{где } B_0 = \frac{\ln \left\{ 1 + \left[ \exp \left( \frac{\bar{\sigma}_B - \sigma_r}{\sigma_r - \sigma_{rt}} \right) - 1 \right]^{-1} \right\}}{\bar{\sigma}_B}; \quad Q - \text{коэф-}$$

фициент, характеризующий сопротивление детали росту усталостных трещин;  $\sigma_r$  — предел выносливости детали при коэффициенте асимметрии цикла  $r$ ;  $\sigma_{rt}$  — циклический предел текучести;  $\bar{\sigma}_B$  — среднее значение предела прочности материала;  $\theta$  — угол наклона кривой усталости в системе координат  $\lg N - \sigma$ ;  $D$  — величина поврежденности материала от  $D = D_0 \geq 0$ , характеризующей начальное повреждение материала образца, которое имеет место еще до начала его циклического деформирования, вплоть до предельного значения  $D = D_k \leq 1$ , соответствующего разрушению образца вследствие накопленных усталостных повреждений.

На основе обработки данных усталостных испытаний образцов из стали HS80 [12] по методике, изложенной в работе [13] получено:  $\bar{\sigma}_B = 602,1$  МПа;  $\theta^* = -121,811$ ;  $Q^* = 1,53 \cdot 10^6$ ;  $\sigma_r^* = 263,621$  МПа;  $\sigma_{rt}^* = 201,914$  МПа. На рисунке 2 в координатах  $\lg N - \sigma$  показаны экспериментальные точки и ряд кривых усталости с поврежденностью  $D = D_0^* = 6,006 \cdot 10^{-11}$ ; остальные линии:  $10^{-7}; 10^{-5}; 10^{-4}; 10^{-3}$ . Для наглядности на рис. 2 представлены результаты для кривой усталости при 50%-ной вероятности разрушения (см. рис. 1, штриховая кривая).

Рассмотрим выражение (2), которое кроме параметров  $N$  и  $\sigma$ , содержит еще один, важнейший для практического приложения, параметр  $D$ , отражающий процесс накопления в материале усталостных повреждений. Воспользуемся условиями нагружения детали на первом этапе:  $\sigma = \sigma_1$  и  $N = N_1$ . Подставляя эти значения в выражение (2), получим

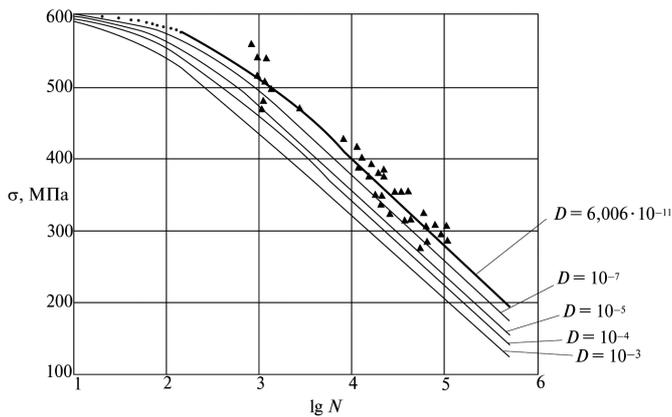


Рис. 2. Кривые малоциклового усталости с различной поврежденностью материала (сталь HS80)

$$N_1 = \left(1 - 10^{\frac{\sigma_1 - \bar{\sigma}_B}{\theta^*}}\right) Q^* B_0 \times \ln \left[ 1 - \exp \left( - \frac{D \bar{\sigma}_B}{(1-D)(\sigma_r^* - \sigma_{rt}^*)(\bar{\sigma}_B - \sigma_r^*)} \sigma_1 \right) \right]. \quad (3)$$

Это уравнение содержит лишь одно неизвестное —  $D$ , отражающее накопленные в материале детали повреждения за число циклов ее деформирования  $N_1$  при величине напряжения  $\sigma_1$ .

Введем обозначения:

$$C_0 = - \frac{\bar{\sigma}_B}{(\sigma_r^* - \sigma_{rt}^*)(\bar{\sigma}_B - \sigma_r^*)};$$

$$E_0 = \frac{\ln \left[ 1 - \exp \left( \frac{N_1}{\left(1 - 10^{\frac{\sigma_1 - \bar{\sigma}_B}{\theta^*}}\right) Q^* B_0} \right) \right]}{\sigma_1} \quad (4)$$

с учетом которых уравнение (3) относительно  $D$  решается аналитически:

$$D = D_1 = \frac{E_0}{E_0 + C_0}. \quad (5)$$

Выполнив расчет по формулам (4) и (5), получим

$$C_0 = -0,029; E_0 = -7,736 \cdot 10^{-6}; D_1 = 2,683 \cdot 10^{-4}.$$

Найденное значение поврежденности материала  $D_1$ , достигнутое деталью на первом этапе нагружения, позволяет для материала детали, используя зависимость (3), получить выражение для новой кривой малоциклового усталости:

$$N = \left(1 - 10^{\frac{\sigma - \bar{\sigma}_B}{\theta^*}}\right) Q^* B_0 \times \ln \left[ 1 - \exp \left( - \frac{D_1 \bar{\sigma}_B}{(1-D_1)(\sigma_r^* - \sigma_{rt}^*)(\bar{\sigma}_B - \sigma_r^*)} \sigma \right) \right]. \quad (6)$$

Поскольку в данной зависимости учтены повреждения, накопленные в течение первого этапа нагружения детали, ее можно использовать для расчета долговечности детали для второго этапа нагружения как при  $\sigma = \sigma_1$ , так и при любом другом уровне напряжений. Для рассматриваемого примера зададимся  $\sigma = \sigma_2$ , подставляя которое в (6), определим  $N_{ост}$ :

$$N_{ост} = \left(1 - 10^{\frac{\sigma_2 - \bar{\sigma}_B}{\theta^*}}\right) Q^* B_0 \times \ln \left[ 1 - \exp \left( - \frac{D_1 \bar{\sigma}_B}{(1-D_1)(\sigma_r^* - \sigma_{rt}^*)(\bar{\sigma}_B - \sigma_r^*)} \sigma_2 \right) \right]. \quad (7)$$

Результаты расчета кривой малоциклового усталости по формуле (6) представлены на рис. 3 (кривая 2). При этом рассчитанное по выражению (7)  $N_{ост}$  при  $\sigma_2 = 300$  МПа имеет значение  $N_{ост} = 1,928 \cdot 10^4$ , более чем в 3 раза отличающееся (не в сторону запаса долговечности) от числа циклов до разрушения ( $N_{ост} = 6,695 \cdot 10^4$ ) при  $\sigma_2 = 300$  МПа, определенного выше без учета накопленных усталостных повреждений на первом этапе деформирования детали.

Используем изложенный подход для решения задачи расчета напряжений, эквивалентных по повреждающему воздействию. Пусть образец в течение  $N_1$  циклов деформируется при напряжении  $\sigma_1$ , в течение  $N_2$  циклов деформируется при напряжении  $\sigma_2$  и в течение  $N_3$  циклов деформируется при напряжении  $\sigma_3$ .

Общее число циклов  $N_\Sigma = \sum_{i=1}^3 N_i$ . Поставим задачу определения эквивалентного напряжения  $\sigma_3$ , при котором повреждения в образце за чис-

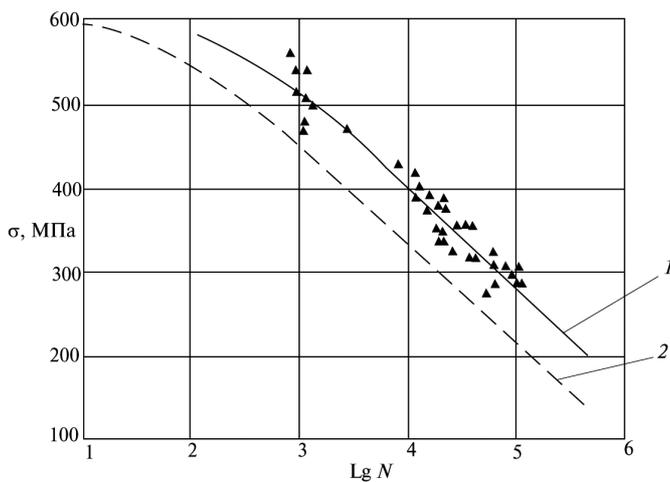


Рис. 3. Результаты расчета долговечности при уровне напряжений  $\sigma_2 = 300$  МПа:  
1 — без учета накопленных повреждений;  
2 — с учетом накопленных повреждений

ло циклов  $N_\Sigma$  будут одинаковыми заданному блоку нагружения.

Воспользуемся уравнением (1), описывающим кривую усталости для величины повреждения материала в исходном состоянии ( $D_0$ ). Подставляя в выражение (1) значение  $\sigma = \sigma_1$ , рассчитаем значение  $N_{p1}$  и определим  $N_{ост1} = N_{p1} - N_1$ . После чего, подставив в формулы (4) и (5) вместо  $N_1$  значение  $N_{ост1}$  для первой ступени блока ( $\sigma_1, N_1$ ), определим значение  $D_1$ . Заменяв в этих формулах  $\sigma_1$  на  $\sigma_2$  и  $N_1$  на  $N_{ост2}$ , найдем значение  $D_2$ . Аналогично вычислим  $D_3$  для третьей ступени блока ( $\sigma_3, N_3$ ). В результате определим накопленную величину повреждения за все три ступени блока:  $D_\Sigma = \sum_{i=1}^3 D_i$ . Для расчета эквивалентного

напряжения  $\sigma_\Sigma$  на основании зависимостей (1) и (2), в которых значение  $N = N_\Sigma$ , получим следующее уравнение:

$$\left(1 - 10^{\frac{\sigma_\Sigma - \bar{\sigma}_B}{\theta^*}}\right) Q^* B_0 \times \ln \left[ 1 - \exp \left( - \frac{D_\Sigma \bar{\sigma}_B}{(1 - D_\Sigma)(\sigma_r^* - \sigma_{rT}^*)(\bar{\sigma}_B - \sigma_r^*)} \sigma_\Sigma \right) \right] - \left(1 - 10^{\frac{\sigma_\Sigma - \bar{\sigma}_B}{\theta^*}}\right) Q^* B_0 \times$$

$$\times \ln \left[ 1 - \exp \left( - \frac{D_0 \bar{\sigma}_B}{(1 - D_0)(\sigma_r^* - \sigma_{rT}^*)(\bar{\sigma}_B - \sigma_r^*)} \sigma_\Sigma \right) \right] + N_\Sigma = 0, \quad (8)$$

$$\text{где } B_0 = \frac{\ln \left\{ 1 + \left[ \exp \left( \frac{\bar{\sigma}_B - \sigma_r^*}{\sigma_r^* - \sigma_{rT}^*} \right) - 1 \right]^{-1} \right\}}{\bar{\sigma}_B}.$$

Уравнение (8) относительно  $\sigma_\Sigma$  является трансцендентным и для его решения необходимо использовать численные методы.

**Практическая реализация.** В качестве примера расчета эквивалентных напряжений на основе представленной выше кривой усталости рассмотрим блок:  $\sigma_1 = 450$  МПа,  $N_1 = 1\,000$ ,  $\sigma_2 = 300$  МПа,  $N_2 = 5\,000$ ,  $\sigma_3 = 250$  МПа,  $N_3 = 10\,000$ . В результате расчетов получено:  $D_1 = 1,728 \cdot 10^{-8}$ ;  $D_2 = 2,896 \cdot 10^{-10}$ ;  $D_3 = 2,035 \cdot 10^{-10}$  и  $D_\Sigma = 1,778 \cdot 10^{-8}$ . Решив уравнение (8) при  $N_\Sigma = 16\,000$ , определим искомое значение  $\sigma_\Sigma = 306,36$  МПа. При  $N_1 = 3\,000$  эквивалентное напряжение  $\sigma_\Sigma = 357,766$  МПа.

Разработанные модели и алгоритмы позволяют после нагружения детали конечным числом блоков изменения напряжений рассчитать накопленные к этому моменту усталостные повреждения в материале, с учетом которых определять эквивалентные напряжения; устанавливать соответствующую накопленным повреждениям новую кривую усталости; рассчитывать в заданных условиях эксплуатации остаточный ресурс детали.

#### Литература

[1] Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение. Москва, Мир, 1984, 624 с.  
[2] Серенсен С.В., Шнейдерович Р.М., Гусенков А.П. Прочность при малоцикловом нагружении. Основы методов расчета и испытаний. Москва, Наука, 1975, 286 с.  
[3] Когаев В.П., Дроздов Ю.Н. Прочность и износостойкость деталей машин. Москва, Высшая школа, 1991, 319 с.  
[4] Даль В., ред. Поведение стали при циклических нагрузках. Москва, Металлургия, 1982, 568 с.  
[5] Coffin L.F. A study of the effects of cyclic thermal stresses on a ductile metal. *Trans. ASME*, 1954, vol. 76, pp. 931–936.  
[6] Manson S.S. A Complex Subject — Some Simple Approximations. *Experimental Mechanics*, 1965, no. 3, pp. 193–226.  
[7] Feltner C.E., Morrow J.D. Microplastic Strain Hysteresis Energy as a Criterion for Fatigue Fracture. *Transactions of ASME, Series D*, 1961, pp. 120–133.

[8] Paris P.C. Fracture Mechanics Approach to Fatigue, *Sagamore Army Matls Research Conference*. 10-th Fatigue-Interdisciplinary Approach — Proc. Aug. 13–16, 1963, pp. 320–323.

[9] Романов А.Н. *Разрушение при малоцикловом нагружении*. Москва, Наука, 1988, 282 с.

[10] Почтенный Е.К. *Кинетическая теория механической усталости и ее приложения*. Минск, Наука и техника, 1973, 213 с.

[11] Высоцкий М.С., Почтенный Е.К., Парфенович Е.О. Сопrotивление усталости элементов конструкций при двухчастотном нагружении. *Вестник машиностроения*, 1995, № 1, с. 3–6.

[12] Почтенный Е.К. Оценка циклической прочности деталей машин. *Вестник машиностроения*, 1969, № 9, с. 11–15.

[13] Сызранцев В.Н., Ильиных В.Н., Сызранцева К.В. Методика обработки данных малоцикловых испытаний гибких труб. *Научно-технический вестник Поволжья*, 2013, № 2, с. 228–232.

## References

[1] Kollinz Dzh. *Povrezhdenie materialov v konstruktivnykh. Analiz, predskazanie, predotvrashchenie* [Damage to materials in the construction. The analysis, prediction, prevention]. Moscow, Mir publ., 1984. 624 p.

[2] Serensen S.V., Shneiderovich R.M., Gusenkov A.P. *Prochnost' pri malotsiklovom nagruzhении. Osnovy metodov rascheta i ispytaniy* [Strength at low-cycle loading. Basis of the calculation and testing]. Moscow, Nauka publ., 1975. 286 p.

[3] Kogaev V.P., Drozdov Iu.N. *Prochnost' i iznosostoičnost' detalei mashin* [Strength and durability of machine parts]. Moscow, Vysshaya shkola publ., 1991. 319 p.

[4] *Povedenie stali pri tsiklicheskiykh nagruzkakh* [The behavior of steel under cyclic loading]. Ed. Dal' V. Moscow, Metallurgiya publ., 1982. 568 p.

[5] Coffin L.F. A study of the effects of cyclic thermal stresses on a ductile metal. *Trans. ASME*, 1954, vol. 76, pp. 931–936.

[6] Manson S.S. A Complex Subject — Some Simple Approximations. *Experimental Mechanics*, 1965, no. 3, pp. 193–226.

[7] Felther C.E., Morrow J.D. Microplastic Strain Hysteresis Energy as a Criterion for Fatigue Fracture. *Transactions of ASME, Series D*, 1961, pp. 120–133.

[8] Paris P.C. Fracture Mechanics Approach to Fatigue, *Sagamore Army Matls Research Conference*. 10-th Fatigue-Interdisciplinary Approach — Proc. Aug. 13–16, 1963, pp. 320–323.

[9] Romanov A.N. *Razrushenie pri malotsiklovom nagruzhении* [The destruction in low-cycle loading]. Moscow, Nauka publ., 1988. 282 p.

[10] Pochtennyi E.K. *Kineticheskaya teoriya mekhanicheskoy ustalosti i ee prilozheniya* [Kinetic theory of mechanical fatigue and its applications]. Minsk, Nauka i tekhnika publ., 1973. 213 p.

[11] Vysotskii M.S., Pochtennyi E.K., Parfenovich E.O. Soprotivlenie ustalosti elementov konstruktivnykh pri dvukhchastotnom nagruzhении [Fatigue resistance of structural elements in a two-frequency loading]. *Vestnik mashinostroeniya* [Russian Engineering Research]. 1995, no. 1, pp. 3–6.

[12] Pochtennyi E.K. Otsenka tsiklicheskoy prochnosti detalei mashin [Evaluation of cyclic strength of machine parts]. *Vestnik mashinostroeniya* [Russian Engineering Research]. 1969, no. 9, pp. 11–15.

[13] Syzrantsev V.N., V.N. Il'nykh, Syzrantseva K.V. Metodika obrabotki dannykh malotsiklovykh ispytaniy gibkikh trub [The method of data processing of flexible pipes low-cycle fatigue tests]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ya* [Scientific and technical bulletin Volga]. 2013, no. 2, pp. 228–232.

Статья поступила в редакцию 13.06.2013

## Информация об авторах

**СЫЗРАНЦЕВ Владимир Николаевич** (Тюмень) — доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, зав. кафедрой «Машины и оборудование нефтяной и газовой промышленности». Тюменский государственный нефтегазовый университет (625000, Тюменская область, Тюмень, Российская Федерация, ул. Володарского, д. 38, e-mail: vsyzrantsev@mail.ru).

**ЧЕРНАЯ Людмила Александровна** (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Теория механизмов и машин». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: ChernayaLA@yandex.ru).

**СЫЗРАНЦЕВА Ксения Владимировна** (Тюмень) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Кибернетические системы». Тюменский государственный нефтегазовый университет (625000, Тюменская область, Тюмень, Российская Федерация, ул. Володарского, д. 38, e-mail: kv.syzr@gmail.com).

## Information about the authors

**SYZRANTSEV Vladimir Nikolaevich** (Tyumen) — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Honored Scientist of the Russian Federation, Head of «Machinery and Equipment of Oil and Gas Industry» Department. Tyumen State Oil and Gas University (TSOGU, Volodarskogo str., 38, 625000, Tyumen, Russian Federation, e-mail: vsyzrantsev@mail.ru).

**CHERNAYA Lydmila Aleksandrovna** (Moscow) — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of «Theory of Mechanisms and Machines» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: ChernayaLA@yandex.ru).

**SYZRANTSEVA Kseniya Vladimirovna** (Tyumen) — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of «Cybernetic Systems» Department. Tyumen State Oil and Gas University (TSOGU, Volodarskogo str., 38, 625000, Tyumen, Russian Federation, e-mail: kv.syzr@gmail.com).