

ОЦЕНКА РЕСУРСА ЭЛЕМЕНТОВ НЕСУЩИХ СИСТЕМ МАШИН ПО ЗАПИСЯМ АМПЛИТУДНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В.Е. Боровских

valentin.borovskih@gmail.com

У.В. Боровских

ulyana.borovskih@gmail.com

А.А. Петров

PetrovAA64@yandex.ru

СГТУ им. Гагарина Ю.А., г. Саратов, Российская Федерация

Аннотация

Приведен метод оценки усталостной долговечности элементов конструкции. В основу метода положено постоянство суммарной работы внешних сил, разрушающих образец, и независимости ее от значения амплитудных напряжений. Построена кривая долговечности элемента конструкции, предполагающая использование в оценке работы внешних сил всех амплитудных напряжений действующего спектра. На примере реальной конструкции дана оценка ресурса с использованием предлагаемого метода

Ключевые слова

Амплитудные напряжения, оценка ресурса, работа внешних сил на разрушение образца, кривая усталости, случайное нагружение

Поступила в редакцию 21.12.2016
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

При проектировании несущих систем машин, а также на стадии доводки их опытных экземпляров особое внимание конструкторы уделяют прогнозированию ресурсных характеристик элементов конструкции.

Для оценки ресурса элементов конструкции несущих систем машин предлагаются различные методы [1–8]. Большинство существующих алгоритмов расчета ресурса [9] требует схематизации реального процесса изменения переменных напряжений элементов конструкций, не учитывая при этом деградацию предела выносливости их материала.

Алгоритм определения ресурса элементов транспортных средств, представленный в работе [10], не требует схематизации случайного процесса, однако точность оценки долговечности по данному методу получилась сопоставимой с прогностическими значениями ресурса, рассчитанными по известным методам.

Анализируя работы [1–10] выявили, что все существующие методы оценки ресурса элементов несущих систем машин не дают достоверной оценки их ресурса, это обуславливает необходимость разработки нового метода.

Предлагаемый метод оценки ресурса элементов несущих систем разработан из условия постоянства суммарной работы внешних сил, затраченной на разрушение образца. При этом необходимая суммарная работа рассчитывается по значению предела выносливости реального элемента конструкции с учетом геометрических характеристик его поперечного сечения (A — площадь сечения; I — осевой момент инерции сечения; W — момент сопротивления сечения).

Определение работы внешних сил по пределу выносливости связано с тем, что работа, рассчитанная по амплитудным напряжениям, превышающим предел выносливости, больше, так как включает в себя работу, затраченную на образование теплоты, а «повреждающая энергия практически не зависит от уровня приложенного циклического напряжения» [11].

Алгоритм оценки ресурса элементов несущих систем машин по предложенному методу приведен далее. Для оценки работы внешних сил на разрушение образца необходимо иметь параметры кривой усталости сечения образца, для которого выполняется оценка долговечности.

Объектом исследования является подрамник пассажирской машины (рис. 1), имеются данные о его напряженно-деформированном состоянии при действии статических нагрузок, об амплитудных напряжениях в элементах подрамника, записанные на 24 режимах нагружения в эксплуатационных условиях, и результаты ресурсных испытаний семи подрамников.

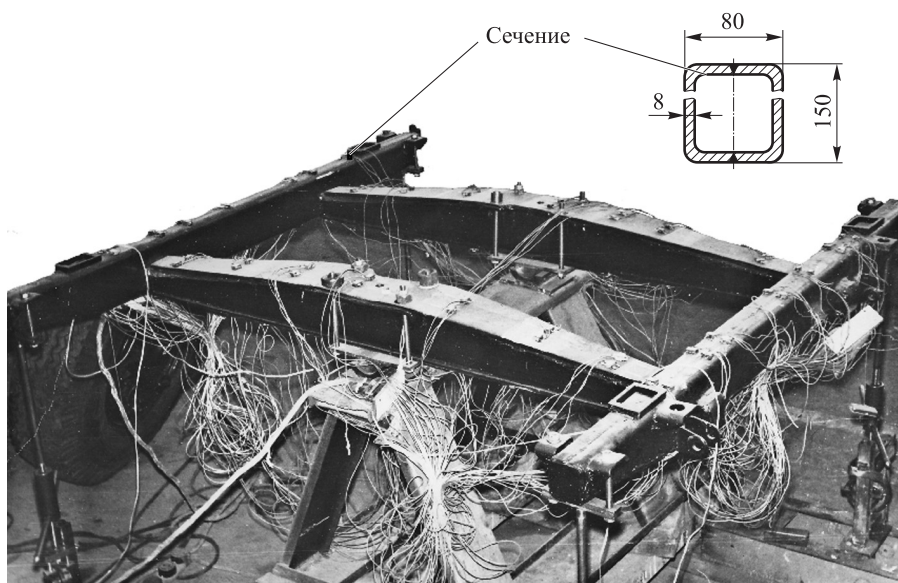


Рис. 1. Подрамник троллейбуса

Параметры кривой усталости элемента приняты следующими: $\sigma_{-1д} = 26,3$ МПа, $N_{н.о} = 211 \cdot 10^6$, $m = 4,1$ [3]. Параметры $\sigma_{-1д}$ и $N_{н.о}$ приняты как исходные данные для расчета суммарной работы внешних сил на разрушение образца. С учетом постоянства этой работы построена кривая усталостной долговечности (рис. 2).

Для оценки работы внешних сил, действующих на подрамник при эксплуатации, были выполнены записи амплитудных напряжений рассчитываемого сечения на 24 типовых эксплуатационных режимах нагружения. По этим режимам имелись статистически значимые весовые коэффициенты (доли режимов нагружения) [2].

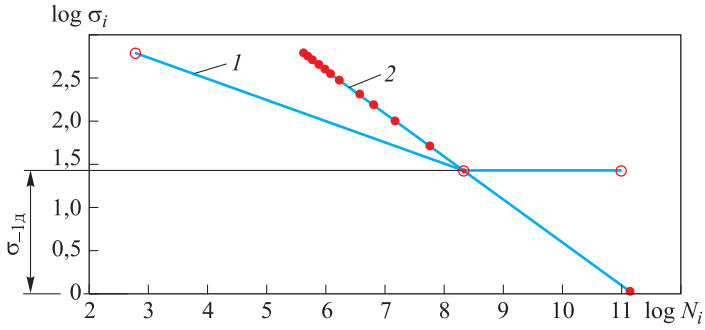


Рис. 2. Классическая кривая усталости (1) и кривая усталостной долговечности (2) элемента подрамника

Амплитудные напряжения на всех режимах представляли собой случайный процесс, зафиксированный при пробеге 1 км. В качестве примера на рис. 3 приведены два режима.

В дальнейшем записи амплитудных напряжений на всех режимах нагружения были обработаны по методу «дождя», и по гистограммам переменных напряжений была проведена оценка ресурса на каждом из режимов. Суммарная оценка ресурса выполнена с учетом весовых коэффициентов по режимам, расчет — для двух вариантов. Минимально учитываемые амплитудные напряжения равны $\sigma_{-1д}$ (пределу выносливости конструкции) и $\sigma_{v\min} = 0,5\sigma_{-1д}$.

Для оценки ресурса по предлагаемому методу на каждом режиме нагружения по записям амплитудных напряжений работа внешних сил на разрушение образца рассчитывалась следующим образом. В расчетном сечении (см. рис. 1) напряжения изгиба в месте наклейки тензорезисторов возникают от приложенной на конце консоли подрамника нагрузки от пневмоэлемента. Работа внешних сил для случая консольного нагружения

$$A = \frac{1}{2} Ff,$$

где F — внешняя сила от пневмоэлемента; f — максимальное перемещение под точкой приложения силы.

Перемещение рассчитывается по зависимости

$$f = \frac{Fl^3}{3EI},$$

где l — расстояние от рассматриваемого сечения (заделка консоли) до центра приложения внешней силы; E — модуль упругости материала; I — момент инерции рассматриваемого сечения. Тогда

$$A = \frac{1}{2} F \frac{Fl^3}{3EI}.$$

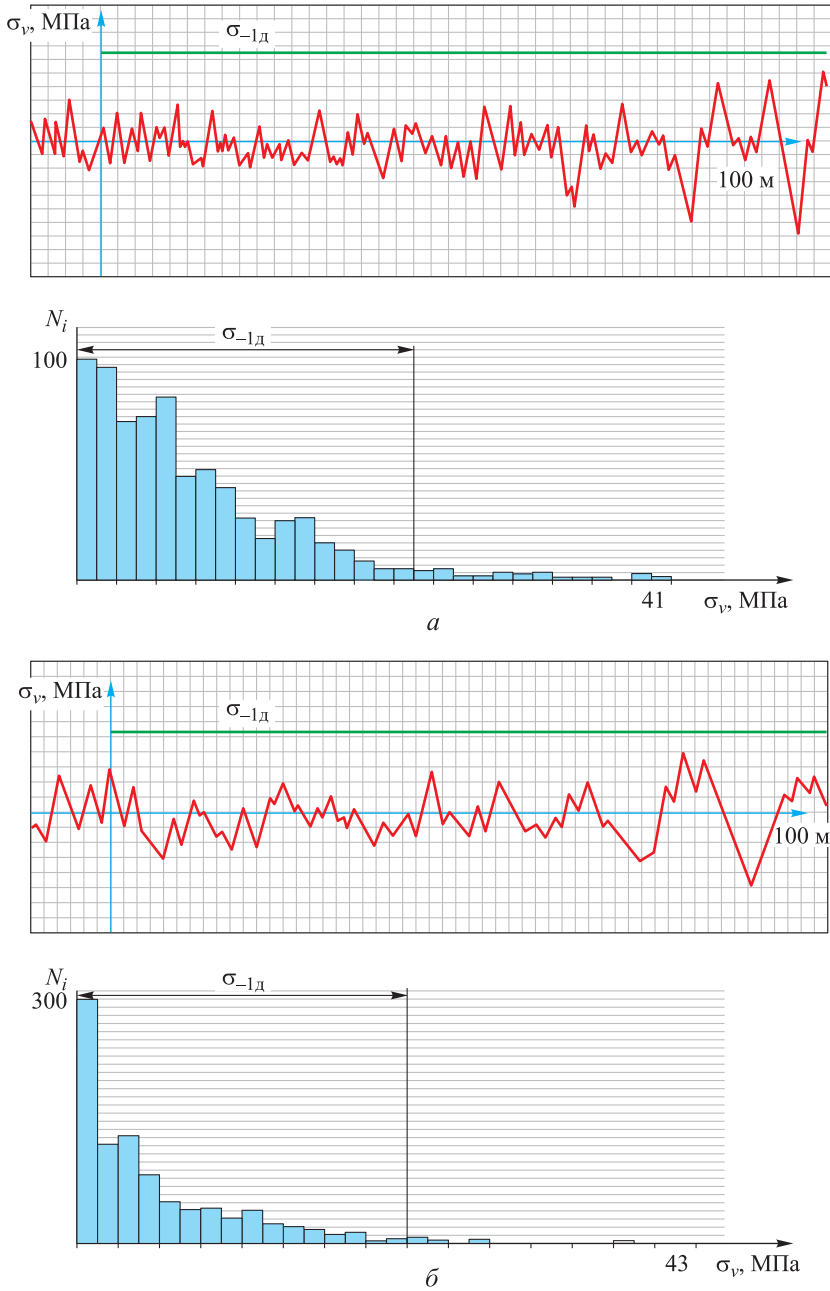


Рис. 3. Гистограммы амплитудных напряжений в элементе подрамника машины при разных режимах нагружения:

a — нагрузка $0,25F_{ном}$, скорость 40 км/ч, асфальт разбитый; *б* — нагрузка $F_{ном}$, скорость 40 км/ч, асфальт разбитый

Учитывая, что

$$\sigma_v = \frac{Fl}{W},$$

где σ_v — амплитудные напряжения процесса; W — момент сопротивления рассчитываемого сечения, и выразив в выражении работы силу F через σ_v , получаем

$$A_i = \frac{1}{2} \frac{\sigma_v W}{l} \frac{l^3}{3EI} \frac{\sigma_v W}{l} = \frac{\sigma_v^2 W^2 l}{6EI}.$$

Программный блок по подсчету суммарной работы внешних сил на разрушение образца на исследуемом участке работает следующим образом. Расчет ведется только для случая роста деформации, уменьшение деформации происходит за счет внутренних сил объекта. Так, на участке осциллограммы 1–2 (рис. 4) работа

$$A_{1-2} = (\sigma_{v2}^2 - \sigma_{v1}^2) \frac{1}{6} \frac{W^2 l}{EI},$$

на участке 3–4

$$A_{3-4} = (\sigma_{v4}^2 - \sigma_{v3}^2) \frac{1}{6} \frac{W^2 l}{EI}.$$

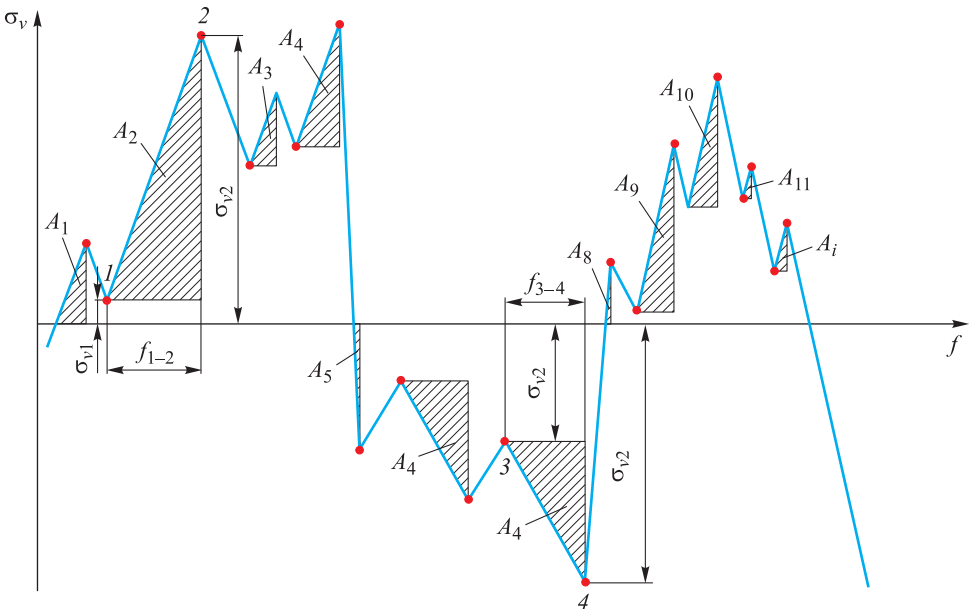


Рис. 4. Фрагмент случайного процесса

Таким образом подсчитывается работа на каждом очередном цикле изменения деформации $A_1, A_2, A_3, \dots, A_i$ для выбранного мерного участка пути или отрезка времени.

Затем работы A_i суммируются, и определяется работа на длине мерного участка:

$$\sum A_i = A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_i.$$

В дальнейшем с учетом весовых коэффициентов по заданным режимам рассчитывалась суммарная работа A_i на пробеге 1 км:

$$\sum A'_i = a_1 b_1 c_1 A_1 + a_2 b_2 c_2 A_2 + a_3 b_3 c_3 A_3 + \dots + a_i b_i c_i A_i,$$

где a , b и c — весовые коэффициенты нагрузки (0,06–0,31), скорости (0,22–0,52) и дорожного покрытия (0,1–0,9) соответственно.

Полная работа внешних сил, необходимая для разрушения образца, рассчитывалась по зависимости

$$A_\Sigma = \sigma_{-1д}^2 N_{н.о} \frac{W^2 l}{6EI},$$

где $\sigma_{-1д} = 26,3$ МПа — предел выносливости элемента конструкции; $N_{н.о} = 211 \cdot 10^6$ — базовое число циклов нагружения элементов конструкции; W , l — геометрические характеристики сечения; E — модуль упругости материала. Ресурс до разрушения рассчитывался по формуле

$$L = \frac{A_\Sigma}{\sum A'_i}.$$

Результат приведен на рис. 5 (вариант 3).

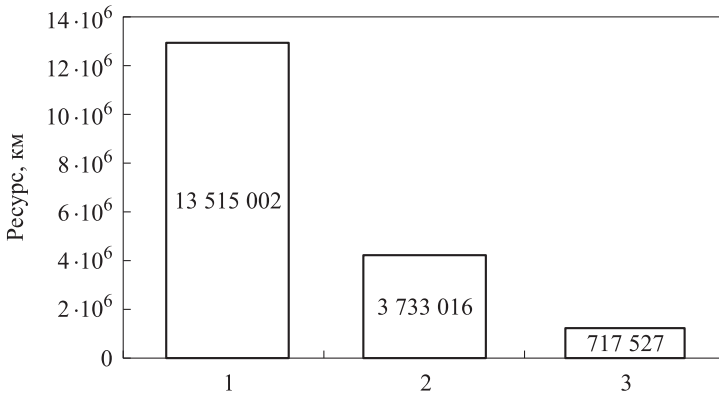


Рис. 5. Оценка ресурса элементов несущих систем по записям амплитудных напряжений для типичных условий эксплуатации:

$$L_1 = 13\,515\,002 \text{ км } (\sigma_{v_{\min}} = \sigma_{-1д}); L_2 = 3\,733\,016 \text{ км } (\sigma_{v_{\min}} = 0,5\sigma_{-1д}); L_3 = 717\,527 \text{ км}$$

Эксплуатационный ресурс этого элемента конструкции, по данным троллейбусного парка г. Саратова, равен ~700 000 км пробега.

Таким образом, анализ данных по расчету долговечности элемента конструкции показал, что, используя в качестве критерия оценки ресурса суммарную работу внешних сил, затрачиваемую на разрушение образца, можно значительно улучшить прогностическую оценку ресурса. При этом нет необходимости прини-

мать различные допущения: схематизация процесса отсутствует, используется предел выносливости сечения натурального образца, учитываются все уровни амплитудных напряжений и вид нагружения образца (в данном случае — консольное нагружение).

Первый опыт использования предложенного метода позволяет сформулировать задачи, стоящие перед исследователями в будущем, основной из которых является оценка постоянной работы внешних сил, затрачиваемой на разрушение образца.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ротенберг Р.В.* Подвеска автомобиля. М.: Машиностроение, 1972. 392 с.
2. *Боровских В.Е.* Оценка долговечности и совершенствование несущих систем мобильных машин на стадии проектирования. Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Саратов, 1994. 39 с.
3. *Дмитриченко С.С., Русанов О.А.* Опыт расчетов на прочность, проектирования и доводки сварных металлоконструкций мобильных машин // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2006. № 1. С. 8–13.
4. *Шефер Л.А., Саночкин А.Е.* Вероятностные методы расчета ресурса в условиях случайных вибраций // Проблемы прочности. 2001. № 1. С. 44–48.
5. *Paolino D.S., Cavatorta M.P.* On the application of the stochastic approach in predicting fatigue reliability using Miner's damage rule // FFEMS. 2013. Vol. 37. No. 1. P. 107–117. DOI: 10.1111/ffe.12093 URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/ffe.12093/abstract>
6. *Шпилев А.В., Ракитский А.А.* Критерии выбора методов схематизации нагруженности при прогнозировании ресурса несущих конструкций транспортных средств // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. 2006. № 4(27). С. 23–28.
7. *Benasciutti D., Tovo R.* Comparison of spectral methods for fatigue analysis of broad-band Gaussian random processes // Probabilistic Engineering Mechanics. 2006. Vol. 21. P. 287–299.
8. *Dirlik T.* Application of computer in fatigue analysis: Thesis (Ph.D.). University of Warwick. Dept. of Engineering (UK). Warwick, 1985. 211 p.
9. *Подвойский А.О., Боровских В.Е.* Аппроксимальная модель прогнозирования оценок усталостной долговечности при нагружении стационарными гауссовыми процессами // Вестник машиностроения. 2013. № 3. С. 20–27.
10. *Котиев Г.О., Зорин Д.В.* Прогнозирование долговечности деталей транспортных машин: вопросы теории // Мир транспорта. 2008. Т. 6. № 1. С. 4–9.
11. *Гуревич С.Е., Гаевой А.П.* Методика экспериментального определения разрушающей энергии при циклическом нагружении // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 1983. № 9. С. 1110–1114.

Боровских Валентин Ефимович — д-р техн. наук, профессор кафедры «Техническая механика и детали машин» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. (Российская Федерация, 410054, г. Саратов, Политехническая ул., д. 77).

Боровских Ульяна Валентиновна — канд. техн. наук, доцент кафедры «Техническая механика и детали машин» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. (Российская Федерация, 410054, г. Саратов, Политехническая ул., д. 77).

Петров Артем Андреевич — аспирант кафедры «Техническая механика и детали машин» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. (Российская Федерация, 410054, г. Саратов, Политехническая ул., д. 77).

Пробьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Боровских В.Е., Боровских У.В., Петров А.А. Оценка ресурса элементов несущих систем машин по записям амплитудных напряжений в условиях эксплуатации // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2017. № 4. С. 88–96.

DOI: 10.18698/0236-3941-2017-4-88-96

RESOURCE EVALUATION OF MACHINE CARRIER SYSTEM ELEMENTS ACCORDING TO CREST VALUE RECORD UNDER OPERATION CONDITIONS

V.E. Borovskikh

valentin.borovskikh@gmail.com

U.V. Borovskikh

ulyana.borovskikh@gmail.com

A.A. Petrov

PetrovAA64@yandex.ru

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russian Federation

Abstract

The study proposes a method for evaluating the endurance life of structure elements. The method is based on constancy of total work of external forces destructing the sample, and independency of this work on the crest value. We built the structure element durability line, which involves using all crest values of the effective spectrum when evaluating the work of external forces. We evaluated the resource, applying the method proposed and using the working structure

Keywords

Crest values, resource evaluation, work of external forces aiming at sample destruction, S-N curve, random loading

REFERENCES

- [1] Rotenberg R.V. Podveska avtomobilya [Car suspension]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972. 392 p.
- [2] Borovskikh V.E. Otsenka dolgovechnosti i sovershenstvovanie nesushchikh sistem mobil'nykh mashin na stadii proektirovaniya. Avtoref. dis. dok. tekhn. nauk [Durability assessment and undercarriage upgrading of mobile cars at the design stage. Abs. doc. tech. sci. diss.]. Saratov, 1994. 39 p.
- [3] Dmitrichenko S.S., Rusanov O.A. Experience of strength calculation, designing and refining of mobile cars welded metal constructions. *Traktory i sel'skokhozyaystvennyye mashiny*, 2006, no. 1, pp. 8–13 (in Russ.).
- [4] Shefer L.A., Sanochkin A.E. Life prediction probability method in conditions of random vibrations. *Problemy prochnosti*, 2001, no. 1, pp. 44–48 (in Russ.).

- [5] Paolino D.S., Cavatorta M.P. On the application of the stochastic approach in predicting fatigue reliability using Miner's damage rule. *FFEMS*, 2013, vol. 37, no. 1, pp. 107–117. DOI: 10.1111/ffe.12093
Available at: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/ffe.12093/abstract>
- [6] Shpilev A.V., Rakitskiy A.A. Selection criterion for schematization approach of loading in prediction of endurance life of transport supporting constructions. *Vestnik GGTU im. P.O. Sukhogo*, 2006, no. 4(27), pp. 23–28 (in Russ.).
- [7] Benasciutti D., Tovo R. Comparison of spectral methods for fatigue analysis of broad-band Gaussian random processes. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2006, vol. 21, pp. 287–299.
- [8] Dirlik T. Application of computer in fatigue analysis: Thesis (Ph.D.). University of Warwick. Dept. of Engineering (UK). Warwick, 1985. 211 p.
- [9] Podvoyskiy A.O., Borovskikh V.E. Approximate model of fatigue life forecasting of structures loaded with stationery Gaussian processes. *Vestnik mashinostroeniya*, 2013, no. 3, pp. 20–27 (in Russ.).
- [10] Kotiev G.O., Zorin D.V. Forecasting of durability of the transport machines parts. *Mir transporta*, 2008, vol. 6, no. 1, pp. 4–9 (in Russ.).
- [11] Gurevich S.E., Gaevoy A.P. Experimental determination technique of destructive energy under cyclic loading. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 1983, no. 9, pp. 1110–1114 (in Russ.).

Borovskikh V.E. — Dr. Sc. (Eng.), Professor of Department of Engineering Mechanics and Machine Parts, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (Politekhnicheskaya ul. 77, Saratov, 410054, Russian Federation).

Borovskikh U.V. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor of Department of Engineering Mechanics and Machine Parts, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (Politekhnicheskaya ul. 77, Saratov, 410054, Russian Federation).

Petrov A.A. — post-graduate student of Department of Engineering Mechanics and Machine Parts, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (Politekhnicheskaya ul. 77, Saratov, 410054, Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Borovskikh V.E., Borovskikh U.V., Petrov A.A. Resource Evaluation of Machine Carrier System Elements According to Crest Value Record under Operation Conditions. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2017, no. 4, pp. 88–96. DOI: 10.18698/0236-3941-2017-4-88-96