

СРАВНЕНИЕ УСКОРЕННЫХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ НА ПРИМЕРЕ СТАЛИ 09Г2С

© 2025

К. В. Кусков

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории
вибрационного и гидродинамического моделирования;
Тюменский индустриальный университет;
kuskovkv@tyuiu.ru

Одной из актуальных задач при установлении пределов выносливости сталей является сокращение времени проведения эксперимента. Основная цель данной работы – сравнение нескольких ускоренных методов определения предела выносливости: метода Локати, метода измерения электросопротивления и расчётного метода с учётом микроструктуры стали. Испытания проводили на стали 09Г2С в состоянии поставки, имеющей феррито-перлитную структуру. В результате сравнения установлено, что метод Локати и метод определения предела выносливости для низкоуглеродистых и низколегированных сталей дают практически идентичные результаты. Метод измерения электросопротивления даёт интервал, в котором находится искомый предел выносливости. Показано, что первый резкий скачок изменения удельного электросопротивления образца может говорить о начале стадии циклической микротекучности или начале необратимого разупрочнения стали. Кроме того, метод измерения электросопротивления может быть полезен в сочетании с методом Локати, когда отсутствуют данные о наклоне левой ветви кривой усталости. Тогда, используя этот метод, можно определить интервал, в котором требуется испытать три образца для построения этой ветви.

Ускоренные усталостные испытания; сталь 09Г2С; метод Локати; удельное электросопротивление

Цитирование: Кусков К.В. Сравнение ускоренных методов определения предела выносливости на примере стали 09Г2С // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2025. Т. 24, № 2. С. 151-158. DOI: 10.18287/2541-7533-2025-24-2-151-158

Введение

Построение кривой Вёлера для определения предела выносливости сталей требует больших временных и ресурсных затрат. Согласно ГОСТ 25.502-79 [1] требуется испытать не менее 15 однотипных образцов, что также накладывает некоторые ограничения. Так, образцы должны быть выполнены из одного цельного куска материала, имеющего одинаковые или близкие свойства, для этого они должны быть изготовлены по одной технологии и с одинаковой точностью. Кроме того, условия испытания для всей серии образцов должны быть одинаковыми. С учётом выбранных для исследования значений (максимально допустимая частота испытаний, рекомендуемая база испытаний и количество образцов) можно рассчитать примерное время выполнения испытаний τ для определения предела выносливости, соответствующего вероятности разрушения 50%:

$$\tau = \frac{N n}{\nu}, \quad (1)$$

где τ – время испытаний в часах; N – рекомендуемая база испытаний (10^7 циклов) в соответствии с [1]; ν – максимально допустимая частота испытаний (300 Гц); n – число образцов (15 ед.).

Решив уравнение (1), получаем около 139 часов чистого машинного времени, при соблюдении требования – отсутствия повышения температуры образца выше 50°C.

Таким образом, направление исследований, позволяющих сократить время и снизить затраты на испытания, является актуальным. Исследователи предлагают различные способы определения предела выносливости. Так Шаповалова Ю.Д., Ефименко Л.А. и др. [2] предлагают использовать предел текучести и структурно-фазовый состав для расчёта предела выносливости, используя полученную ими формулу или график.

Метод Локати позволяет определить предел выносливости, используя один образец или несколько образцов. Метод основан на гипотезе Пальмгрена-Майнера о линейном характере накопления усталостных повреждений. Данный метод был стандартизирован ГОСТ 19533-74, но в настоящий момент не действует. На сегодняшний день действуют методические указания РД 50-686-89 [3], в которых подробно описывается метод Локати.

Кроме представленных выше методов, в работе [4] предложен метод определения предела выносливости через измерение удельного электросопротивления и температуры образца в ходе испытаний. Известно, что электросопротивление сильно зависит от плотности дислокаций для различных материалов [5 – 7], что, в свою очередь, даёт возможность определить стадию микротекучести, которая начинается в поверхностных и приповерхностных слоях материала при растяжении-сжатии и заключается в росте плотности дислокаций [8].

Целью настоящей работы является сравнение нескольких методов определения предела выносливости.

Методика проведения испытаний

Образцы для испытаний были изготовлены на станке с числовым программным управлением при постоянной подаче смазочно-охлаждающей жидкости из единого прутка длиной 6000 мм и диаметром 16 мм (рис. 1). Материал для испытаний – сталь 09Г2С в состоянии поставки без термической обработки, о чём свидетельствует микроструктура – феррито-перлитная, полученная в поперечном срезе (рис. 2).

Данный тип образцов имеет низкий теоретический коэффициент концентрации напряжений ($\alpha_\sigma = 1,019$), который был рассчитан с использованием программного обеспечения Ansys. Шероховатость образцов измерялась с помощью профилометра Hommel-Etamic W5-Set. Средние значения шероховатости по всем образцам составили $Ra = 0,232$ мкм, что соответствует ГОСТ 25.502-79. Направление шероховатости было перпендикулярно образующей цилиндрической части образца.

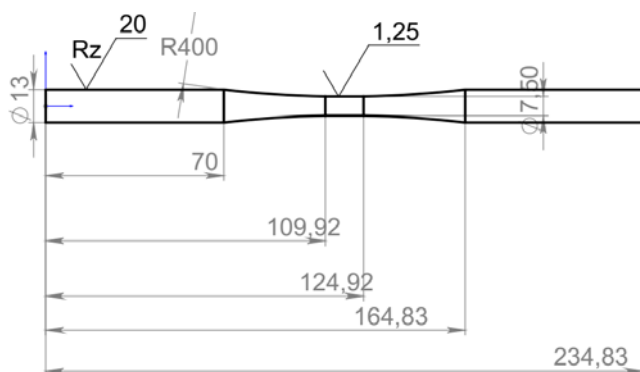


Рис. 1. Образец для испытаний

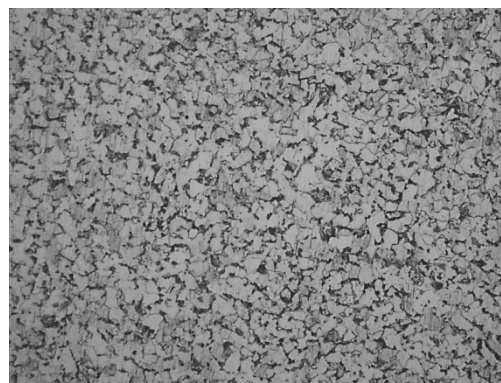


Рис. 2. Микроструктура образцов стали 09Г2С (x200)

Во всех случаях испытания проводили на сервогидравлической машине ТРМЦ 250С-1. Коэффициент асимметрии цикла $R = -1$. Закон нагружения – синусоидальный. Тип нагружения – растяжение-сжатие. Частота нагружения 10 Гц. Испытания проводились на воздухе с температурой окружающей среды $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Оценка предела выносливости проводилась для каждого метода отдельно. Перед проведением испытаний были определены основные механические характеристики металла (табл. 1).

Таблица 1. Основные характеристики стали 09Г2С

Марка стали	Предел текучести физический $\sigma_{\text{т}}$, МПа	Временное сопротивление $\sigma_{\text{в}}$, МПа	Относительное сужение ψ , %	Относительное удлинение δ , %
09Г2С	328,3	579,45	61,31	46,98
09Г2С (ГОСТ 5520-2017)	≥ 325	470-640	–	≥ 21

Испытания по методу Локати велись согласно РД 50-686-89. Образец подвергался нагружению на восьми различных ступенях. Количество циклов на каждой ступени соответствовало 126 000 циклам. Данное количество циклов было рассчитано в соответствии с РД 50-686-89 и округлено в большую сторону для удобства контроля времени работы оборудования, которое составило три с половиной часа на ступень.

Испытания методом измерения удельного электросопротивления базировались на методике, предложенной в работе [4]. Контроль велся только за показателем удельного сопротивления. Измерение температуры при испытаниях будет некорректным из-за дополнительного нагрева образца в момент измерения электросопротивления, а также неравномерного нагрева образца из-за наличия перехода тороидальной части образца в цилиндрическую. Начальный уровень нагружения был задан на основании того, что большая часть конструкционных сталей имеет предел выносливости от $0,5\sigma_{\text{т}}$ до $0,65\sigma_{\text{т}}$ [9]. При переходе на следующую ступень нагрузка изменялась на $0,1\sigma_{\text{т}}$. При этом был взят дополнительно один шаг в сторону уменьшения нагрузки. Количество циклов на каждой ступени выбрано 72 000, как описано в [4]. Таким образом, напряжения составили от $0,4\sigma_{\text{т}}$ до $0,9\sigma_{\text{т}}$. В момент перехода на следующую ступень испытаний производился замер удельного сопротивления образца без снятия его из захватов. Измерения проводились с помощью установки на базе программируемого логического контроллера ПЛК63. Подробный принцип работы данной установки описан в работе [10].

Результаты испытаний

Результаты, полученные при испытании образца из стали 09Г2С методом Локати, приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты ускоренных усталостных испытаний методом Локати

№	Напряжение на ступени, МПа	Количество циклов, ед.
1	188,9	126000
2	207,8	126000
3	239,8	126000
4	258,7	126000
5	272,6	126000
6	296,5	126000
7	315,4	126000
8	334,3	111257

Обработка результатов производилась в соответствии с РД 50-686-89. Исходная кривая усталости была взята из [11]. График зависимости суммы накопленных повреждений от предела выносливости для испытанного образца представлен на рис. 3, по которому определён предел выносливости, равный 223,9 МПа. Общее затраченное машинное время на проведение испытаний 27,6 часа.

Данные, полученные при испытании образца с измерением удельного электрического сопротивления, представлены в табл. 3, из которой видно, что после четвёртой ступени наблюдается скачок в разнице удельного электрического сопротивления.

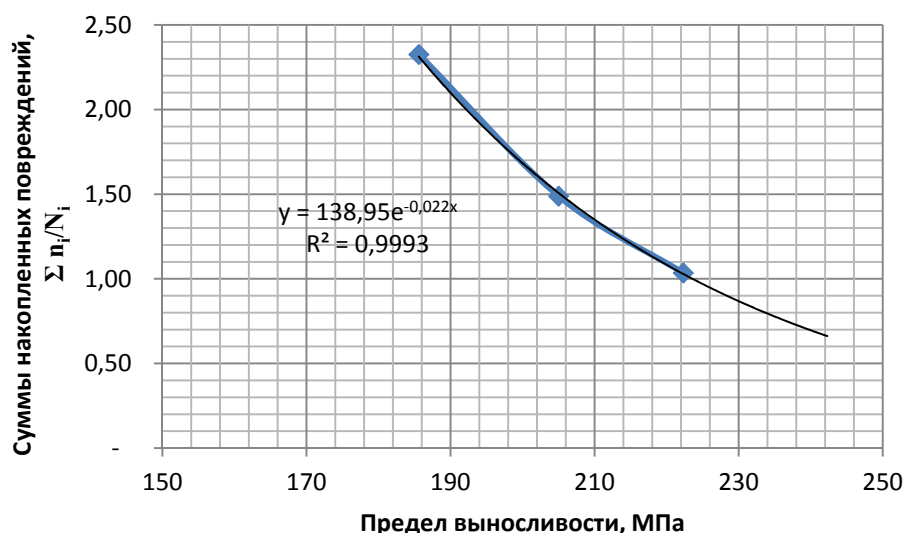


Рис. 3. График зависимости суммы накопленных повреждений и предела выносливости для стали 09Г2С

Таблица 3. Результаты испытаний методом измерения удельного электросопротивления

№	Количество циклов, ед.	Напряжение на ступени, МПа	Удельное электрическое сопротивление, мОм
1	72000	131,3	3,7772
2	72000	164,0	3,7582
3	72000	197,0	3,7770
4	72000	229,7	3,8902
5	72000	262,6	4,0049
6	72000	295,3	4,0753

На рис. 4 представлен график зависимости удельного электрического сопротивления ΔR от напряжений на соответствующей ступени.

$$\Delta R = R_i - R_{i-1}, \quad (2)$$

где R_i – удельное электрическое сопротивление, полученное после соответствующей ступени нагружения.

Общее затраченное машинное время на проведение испытаний по методу измерения сопротивления составило 12 часов.

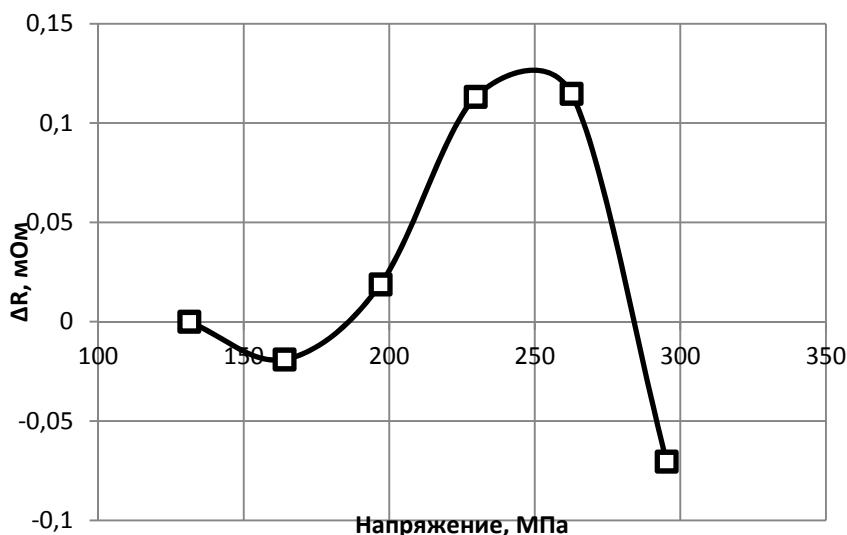


Рис. 4. График зависимости удельного электрического сопротивления и напряжения на соответствующей ступени

Проведённый расчёт по методике, описанной в [2], для исследуемой стали 09Г2С с феррито-перлитной структурой, показал предел выносливости, равный 228,6 МПа. Значения, взятые для расчёта: доля феррита 80%, предел текучести 328,3 МПа (табл. 1). Долю феррита определяли по ГОСТ 8233-56.

Результаты исследования показали, что у образцов из стали 09Г2С в результате действия переменных нагрузок растёт плотность дислокаций вблизи будущего места разрушения. Данный факт не противоречит выполненным ранее работам других исследователей [12; 13]. Первое резкое повышение ΔR может говорить о начале зарождения микротрещины. Таким образом, искомый предел выносливости в проведённых испытаниях находится между значениями напряжений 197 и 229,7 МПа, что согласуется с данными, полученными методом Локати (223,9 МПа) и методом, описанном в [2] (228,6 МПа). С точки зрения экономии машинного времени предлагаемый метод измерения удельного электросопротивления образца выглядит более предпочтительным.

В дальнейшем изучение метода измерения удельного электросопротивления может быть продолжено по следующим направлениям:

- 1) уменьшение разницы между ступенями нагружения с целью получения более узкого интервала значений предела выносливости;
- 2) оценка применимости данного метода для других конструкционных сталей;
- 3) изучение возможностей использования предлагаемого метода при различных значениях шероховатости поверхности и теоретического коэффициента концентрации напряжений.

Заключение

Метод измерения электросопротивления может быть полезен в сочетании с методом Локати, когда отсутствуют данные о наклоне левой ветви кривой усталости. Используя этот метод, можно определить интервал, в котором требуется испытать три образца для построения этой ветви.

Можно отметить, что методика определения предела выносливости, описанная в патенте [2], хотя и значительно больше экономит время, чем другие рассмотренные способы, но она не учитывает некоторые особенности испытаний, а именно шероховатость, теоретический коэффициент концентрации напряжений, наличие агрессивной среды и др.

Работа выполнена при поддержке Национального проекта «Наука и университеты» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант № FEWN-2024-0005).

Библиографический список

1. ГОСТ 25.502-79. Расчёты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость. М.: Стандартинформ, 2005. 25 с.
2. Шаповалова Ю.Д., Ефименко Л.А., Романова Т.И., Якирев Д.И. Способ определения предела выносливости низкоуглеродистых низколегированных сталей: патент РФ № 2476855; опубл. 27.02.2013; бюл. № 6
3. РД 50-686-89. Методические указания. Надёжность в технике. Методы ускоренных испытаний на усталость для оценки пределов выносливости материалов, элементов машин и конструкций. М.: Издательство стандартов, 1990. 27 с.
4. Aeran A., Acosta R., Siriwardane S.C., Starke P., Mikkelsen O., Langen I., Walther F. Nonlinear fatigue damage model: Comparison with experimental damage evolution of S355 (SAE 1020) structural steel and application to offshore jacket structures // *International Journal of Fatigue*. 2020. V. 135. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2020.105568
5. Маколкина Е.Н., Пржеvusкий А.К. Механизмы влияния дислокаций на электрические и оптические свойства германия // *Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики*. 2006. № 34. С. 49-54.
6. Арбузов В.Л., Данилов С.Е., Дружков А.П., Перминов Д.А. Влияние пластической деформации и радиационных дефектов на структурно-фазовые превращения в аустенитных сплавах H36 и H36T2 // *Физика металлов и металловедение*. 2004. Т. 98, № 5. С. 64-69.
7. Корзникова Е.А. Определение концентрации вакансий в меди после интенсивной пластической деформации с помощью резистометрического и рентгеноструктурного анализа // *Перспективные материалы*. 2011. № 12. С. 254-257.
8. Терентьев В.Ф., Кораблёва С.А. Усталость металлов. М.: Наука, 2015. 484 с.
9. Strake P. StressLife_{tc} – NDT-related assessment of the fatigue life of metallic materials // *Materials Testing*. 2019. V. 61, Iss. 4. P. 297-303. DOI: 10.3139/120.111319
10. Воронин В.В., Кусков К.В. Разработка автоматической системы сбора данных для проведения испытаний на сопротивление циклическим нагрузкам // *Материалы Международной научно-практической конференции «Научная территория: технологии и инновации» (17-18 ноября 2022 г., Тюмень, Россия)*. Т. II. Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2022. С. 71-75.
11. Гасюк А.С. Оценка и прогнозирование технического состояния локомотивов по ресурсу их несущих конструкций. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2022. 162 с.
12. Золотов А.Е., Шибков А.А., Гасанов М.Ф., Денисов А.А. Влияние прерывистой деформации на электропроводность алюминий-магниевого сплава // *Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки*. 2016. Т. 21, № 3. С. 1012-1015. DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-3-1012-1015
13. Максимов А.Б., Гуляев М.В., Ерохина И.С. Влияние повреждаемости низколегированных сталей на физико-механические свойства // *Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия*. 2017. Т. 60, № 5. С. 364-368. DOI: 10.17073/0368-0797-2017-5-364-368

COMPARISON OF ACCELERATED STRENGTH TESTING METHODS AS EXEMPLIFIED BY 09G2S STEEL

© 2025

K. V. Kuskov

Candidate of Science (Engineering), Leading Researcher in Laboratory of Vibration and Hydrodynamic Modeling;
Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation;
kuskovkv@tyuiu.ru

One of the urgent tasks when establishing the endurance limits of steel is limiting the time of the experiment. The main purpose of this work is to compare several accelerated methods for determining the fatigue strength: the Locati method, the method of measuring electrical resistance and the calculation method taking into account the microstructures of steel. The study was carried out on 09G2S steel in the as-delivered condition which has a ferrite-pearlite structure. As a result of the comparison, it was found that the Locati method and the method for determining the fatigue strength of low-carbon and low-alloy steels give almost identical results. The method of measuring electrical resistance gives the range of stresses in which the desired fatigue strength is located. It is shown that the first sharp jump in the change in electrical resistivity of the sample may indicate the beginning of the stage of cyclic microflow or the beginning of irreversible softening of the steel. In addition, the method of measuring electrical resistance can be useful in combination with the Locati method, when there is no data on the slope of the left branch of the fatigue curve; then using this method it is possible to determine the interval in which 3 samples need to be tested to construct this branch.

Accelerated fatigue testing; steel 09G2S; Locati method; specific electrical resistivity

Citation: Kuskov K.V. Comparison of accelerated strength testing methods as exemplified by 09G2S steel. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2025. V. 24, no. 2. P. 151-158. DOI: 10.18287/2541-7533-2025-24-2-151-158

References

1. GOST 25.502-79. Strength analysis and testing in machine building. Methods of metals mechanical testing. Methods of fatigue testing. Moscow: Standartinform Publ., 2005. 25 p. (In Russ.)
2. Shapovalova Ju.D., Efimenko L.A., Romanova T.I., Jakirevich D.I. *Sposob opredeleniya predela vynoslivosti nizkouglerodistykh nizkolegirovannykh staley* [Method for determining endurance limit of low-carbon low-alloyed steels]. Patent RF, no. 2476855, 2013. (Publ. 27.02.2013, bul. no. 6)
3. RD 50-686-89. Reference manual. Reliability in engineering. Methods of accelerated fatigue strength testing to assess the endurance limit of materials. Moscow: Izdatel'stvo Sandartov Publ., 1990. 27 p. (In Russ.)
4. Aeran A., Acosta R., Siriwardane S.C., Starke P., Mikkelsen O., Langen I., Walther F. Nonlinear fatigue damage model: Comparison with experimental damage evolution of S355 (SAE 1020) structural steel and application to offshore jacket structures. *International Journal of Fatigue*. 2020. V. 135. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2020.105568
5. Makolkina E.N., Przhevuskii A.K. Mechanisms of the influence of dislocations on the electrical and optical properties of germanium. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2006. No. 34. P. 49-54. (In Russ.)
6. Arbuzov V.L., Danilov S.E., Druzhkov A.P., Perminov D.A. The influence of plastic deformation and radiation defects on the structural and phase transformations of N36 and N36T2 austenitic alloys. *Physics of Metals and Metallography*. 2004. V. 98, Iss. 5. P. 500-505.
7. Korznikova E.A. Determination of the concentration of vacancies in copper after severe plastic deformation using resistometric and X-ray structural analysis. *Perspektivnye Materialy*. 2011. No. 12. P. 254-257. (In Russ.)

8. Terent'ev V.F., Korableva S.A. *Uсталost' metallov* [Metal fatigue]. Moscow: Nauka Publ., 2015. 484 p.
9. Strake P. StressLifetc – NDT-related assessment of the fatigue life of metallic materials. *Materials Testing*. 2019. V. 61, Iss. 4. P. 297-303. DOI: 10.3139/120.111319
10. Voronin V.V., Kuskov K.V. Razrabotka avtomaticheskoy sistemy sbora dannykh dlya provedeniya ispytaniy na soprotivlenie tsiklicheskim nagruzkam. *Materialy Mezhdunarodnoy Nauchno-Prakticheskoy Konferentsii «Nauchnaya Territoriya: Tekhnologii i Innovatsii»* (November, 17-18, 2022, Tyumen, Russia). V. II. Tyumen: Tyumen Industrial University Publ., 2022. P. 71-75. (In Russ.)
11. Gasyuk A.S. *Otsenka i prognozirovaniye tekhnicheskogo sostoyaniya lokomotivov po resursu ikh nesushchikh konstruktsiy. Dis. ... kand. tekhn. nauk* [Assessment and forecasting of the technical condition of locomotives based on the service life of their supporting structures. Thesis for a Candidate Degree in Science (Engineering)]. Moscow, 2022. 162 p.
12. Zolotov A.E., Shibkov A.A., Gasanov M.F., Denisov A.A. Effect of intermittent deformation on the electrical conductivity of aluminum-magnesium alloy. *Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences*. 2016. V. 21, no. 3. P. 1012-1015. (In Russ.). DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-3-1012-1015
13. Maksimov A.B., Gulyaev M.V., Erokhina I.S. Influence of damageability of low-alloyed steel on its physical and mechanical properties. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017. V. 60, no. 5. P. 364-368. (In Russ.). DOI: 10.17073/0368-0797-2017-5-364-368