

Труды МАИ. 2022. № 125
Trudy MAI, 2022, no. 125

Научная статья
УДК 629.73.05
DOI: [10.34759/trd-2022-125-08](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-08)

МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ПРИ РАЗГЕРМЕТИЗАЦИИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Борис Васильевич Беляев¹, Алексей Сергеевич Лебедев²✉

^{1,2}Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,
Санкт-Петербург, Россия

^{1,2}vka@mil.ru ✉

Аннотация. Статья посвящена актуальной теме диагностики процесса функционирования герметичных отсеков летательных аппаратов, имеющих сквозные микротрещины. В статье получены выражения, позволяющие описывать закономерности изменения утечки рабочей среды через сквозные трещины в зависимости от их изменяющейся геометрии. Разработан алгоритм построения закономерностей изменения утечки рабочей среды из герметичных отсеков (систем) при наличии в их оболочках развивающихся сквозных трещин. Приведены типовые закономерности изменения утечки рабочей среды во времени через сквозные трещины. Представлены результаты расчета времени разгерметизации отсека в зависимости от длины сквозной трещины, степени ее раскрытия, а также свободного

объема герметичного отсека. Результаты, представленные в статье, являются оригинальными. Они представляют значительный интерес и позволяют более корректно проводить диагностику отказов летательных аппаратов в условиях летной эксплуатации.

Кроме того, полученные результаты позволяют решить и обратную задачу для приборных и обитаемых отсеков космических аппаратов. А именно, имея данные телеметрической информации о параметрах состояния газа (давлении и температуры) внутри отсека и изменении этих параметров в течение времени, появляется возможность диагностики в условиях орбитального полета характеристик микронеплотностей. Это в свою очередь позволяет оценивать резерв времени для локализации негерметичностей или принимать решение для аварийной посадки пилотируемого космического аппарата.

Ключевые слова: трещина, утечка, остаточный ресурс, герметичность, диагностика, работоспособность, герметичный отсек.

Для цитирования: Беляев Б.В., Лебедев А.С. Методика прогнозирования остаточного ресурса при разгерметизации летательных аппаратов // Труды МАИ. 2022. № 125. DOI: [10.34759/trd-2022-125-08](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-08)

Original article

METHODOLOGY FOR PREDICTING THE RESIDUAL RESOURCE DURING DEPRESSURIZATION OF AIRCRAFT

Boris V. Belyaev¹, Alexey S. Lebedev²✉

^{1,2}Military Space Academy named after A.F.Mozhaisky,
Saint Petersburg, Russia

^{1,2}vka@mil.ru✉

Abstract. When determining the flight safety of aircraft, one of the urgent tasks is to diagnose a possible violation of the tightness of compartments during operation. Mechanical damage to sealed compartments of aircraft can occur due to fatigue, wear, thermal load, creep of the material, shock load, elastic deformation, surface fatigue, radiation damage, erosion wear and other causes. Leakproofness tests during the preparation of aircraft for operation are not always able to determine microcracks or other design defects that lead to a violation of the tightness of the device during flight.

The article is devoted to the topical topic of diagnostics of the process of functioning of sealed compartments of aircraft with through microcracks. In the article, expressions are obtained that allow us to describe the patterns of changes in the leakage of the working medium through through cracks, depending on their changing geometry. An algorithm has been developed for constructing patterns of changes in the leakage of the working medium from sealed compartments in the presence of developing through cracks in their shells. Typical patterns of changes in the leakage of the working medium over time through through cracks are given. The results of calculating the time of depressurization of the compartment are presented, depending on the length of the through crack, the degree of its opening, as well as the free volume of the sealed compartment. The results presented

in the article make it possible to more correctly diagnose failures of aircraft in flight operation.

In addition, the results obtained make it possible to solve the inverse problem for instrument and habitable compartments of spacecraft. Namely, having the data of telemetric information about the parameters of the gas state (pressure and temperature) inside the compartment and the change of these parameters over time, it becomes possible to diagnose the characteristics of micron densities in the conditions of orbital flight. This, in turn, makes it possible to estimate the time reserve for localization of leaks or to make a decision for an emergency landing of a manned spacecraft.

The proposed technique for diagnosing the tightness of aircraft during flight operation can be used to justify the requirements for sensors and pressure detectors in the hermetic compartments of aircraft and for the parameters of the system of reserve gas reserves. In case of emergency leaks during flight operation, it is possible, using the proposed methodology, to determine the remaining time reserve for eliminating the consequences of an accident, ensuring the safety of crew members or emergency landing on the Ground.

Keywords: crack, leak, residual life, tightness, diagnostics, operability, sealed compartment

For citation: Belyaev B.V., Lebedev A.S. Methodology for predicting the residual resource during depressurization of aircraft. *Trudy MAI*, 2022, no. 125. DOI: [10.34759/trd-2022-125-08](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-08)

Введение

При определении безопасности полетов летательных аппаратов (ЛА) одной из актуальных задач является диагностирование возможного нарушения герметичности отсеков в процессе эксплуатации. Механические повреждения гермоотсеков летательных аппаратов могут возникнуть вследствие усталости, износа, тепловой нагрузки, ползучести материала, ударной нагрузки, упругой деформации, поверхностной усталости, радиационного повреждения, эрозионного износа и других причин. Испытания на герметичность в процессе подготовки ЛА к эксплуатации не всегда способны определить микротрещины или иные дефекты конструкции, которые в процессе полета приводят к нарушению герметичности аппарата. Особую актуальность эта задача приобретает при эксплуатации пилотируемых космических ЛА. Они подвержены жестким внешним механическим, тепловым и вибрационным нагрузкам при выведении на орбиту и при возвращении на Землю. Кроме того, в процессе орбитального полета на ЛА воздействуют окружающие факторы космического пространства и техногенного засорения (космического мусора). Контроль и диагностика герметичности спускаемых ЛА в первую очередь необходима для обеспечения безопасного возвращения космонавтов (астронавтов) на Землю.

В статье предлагается методика диагностики герметичности отсеков ЛА в процессе летной эксплуатации и метод оценивания резерва времени для локализации микронегерметичностей и осуществления безопасной посадки на

Землю. Задача диагностики отсеков ЛА не нова [1, 5-17]. Однако в этой статье предлагается более простая графо-аналитическая методика ее решения.

Постановка задачи

Контроль герметичности отсеков летательных аппаратов в процессе летной эксплуатации возможно осуществлять по измерению давления и температуры в отсеках [3, 4]. При постоянных значениях объемов V отсеков связь между значениями давления P и температуры T описывается уравнением состояния для идеального газа:

$$PV = M \cdot R \cdot T, \quad (1)$$

где M – масса газа; R – удельная газовая постоянная.

Для обеспечения нормальных условий функционирования членов экипажа это уравнение может быть представлено в виде:

$$P = \rho \cdot R \cdot T, \quad (2)$$

где ρ - плотность газа при нормальных условиях.

Тогда можно определить зависимость допустимого изменения давления в отсеке ЛА при изменениях температуры в допустимых пределах $T^D \in [T_{\min}; T_{\max}]$.

Эта зависимость может быть представлена графически (см. рисунок 1).

Зная предельно допустимое давление для условий, обеспечивающих жизнедеятельность экипажа, может быть получена аналогичная зависимость критического давления в допустимых пределах температуры $R^{kp}(T)$.

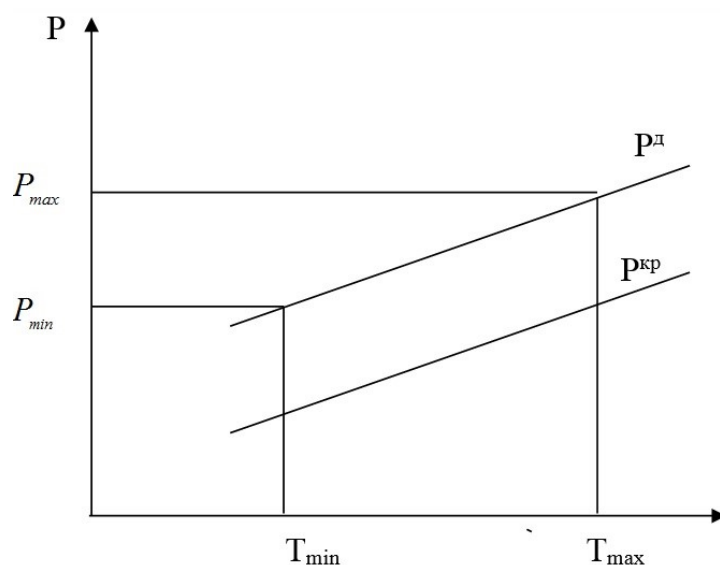


Рис.1 Зависимость допустимого изменения давления в отсеке ЛА при изменениях температуры в допустимых пределах $T^Д \in [T_{\min}; T_{\max}]$

В условиях летной эксплуатации для жизнеобеспечения экипажа всегда имеются резервные запасы газа (воздуха) для поддержания допустимого давления в случаях, предусмотренных программой полета. Например, при шлюзовании для перехода из одного ЛА в другой, или при выходе в открытый космос для КА. Поэтому при аварийных разгерметизациях этот запас логично использовать для поддержания давления не ниже критического еще некоторое время. Может оказаться, что этого времени будет достаточно для ликвидации негерметичности, либо возвращения на Землю. Время снижения давления до критического будет зависеть не только от резервных запасов газа, но и от размеров негерметичности.

Таким образом, в полете необходимо иметь возможность диагностировать размеры возникших негерметичностей и определять резерв времени для их локализации, либо для аварийной посадки.

Математическое моделирование

Для моделирования изменения давления в гермоотсеке по времени t представим уравнение (1) в виде:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{dM}{dt} \cdot \frac{R \cdot T}{V}. \quad (3)$$

Уравнение (3) получено в предположении, что при изменении давления в гермоотсеке при истечении газа из него температура T в объеме V не меняется [6, 7, 9-11].

Секундный расход газа через микротрещину в герметичном отсеке $\frac{dM}{dt}$ выразим по аналогии с секундным массовым расходом газа через критическое сечение реактивного сопла по уравнению расхода газа в параметрах торможения [2]. Расход газа \dot{m} через критическое сечение сопла площадью $F_{кр}$ при давлении торможения P_{oc} и температуре T_{oc} определяется зависимостью:

$$\dot{m} = m \cdot \frac{P_{oc} \cdot F_{кр}}{\sqrt{R \cdot T_{oc}}}, \quad (4)$$

где m - коэффициент, являющийся весьма слабой функцией среднего показателя

адиабаты K ; $m = \sqrt{K \left(\frac{2}{K+1} \right)^{\frac{K+1}{K-1}}}$; в инженерной практике он может считаться

постоянным и равным $m \approx 0,645$.

Параметры торможения в (4) могут быть приравнены к параметрам газа из (3), а площадь критического сечения сопла реактивного двигателя заменена на площадь сечения негерметичности F_{mp} . Тогда расход газа в уравнении (3) может быть выражен формулой:

$$\frac{dM}{dt} = -0,645 \cdot \frac{P \cdot F_{mp}}{\sqrt{R \cdot T}}. \quad (5)$$

Знак минус в (5) показывает, что с течением времени масса газа в объеме V уменьшается. Подставим (5) в (3). Получаем:

$$\frac{dP}{dt} = -0,645 \cdot \frac{F_{mp}}{V} \cdot \sqrt{R \cdot T} \cdot P. \quad (6)$$

Уравнение (6) является линейным однородным дифференциальным уравнением первого порядка. Его решение при начальных условиях: $t_n = t_0$; $P_n = P_0$, имеет вид:

$$P_t = P_0 \cdot e^{-0,645 \cdot \frac{F_{mp}}{V} \cdot \sqrt{R \cdot T} \cdot (t-t_0)}. \quad (7)$$

Анализ уравнения (7) показывает, что, измерив падение давления $\Delta P_i = P_0 - P_i$ за время $\Delta t = t - t_0$, можно оценить значение площади сечения возникшей негерметичности F_{mp} :

$$F_{mp} = \frac{1}{\Delta t} \cdot \frac{V}{0,645 \cdot \sqrt{RT}} \cdot \ln \frac{P_0}{P_i}. \quad (8)$$

Кроме того, зная значение F_{mp} и критическое давление в отсеке P^{kp} может быть определен резерв времени при аварийных ситуациях:

$$\Delta t_p = \frac{1}{F_{mp}} \cdot \frac{V}{0,645 \cdot \sqrt{RT}} \cdot \ln \frac{P_0}{P^{kp}}. \quad (9)$$

Если же на момент аварии в резервных баллонах объемом V_p имеется остаток газа при давлении P_p , то его использование для поддержания живучести ЛА может увеличить резерв времени до:

$$\Delta t_{pp} = \frac{1}{F_{mp}} \cdot \frac{V + \frac{P_p \cdot V_p}{P_0}}{0,645 \cdot \sqrt{RT}} \cdot \ln \frac{P_0}{P^{kp}}, \quad (10)$$

где $\frac{P_p \cdot V_p}{P_0}$ - приведенный к давлению P_0 дополнительный объем газа резерва.

Пример.

Предположим, что жизнеобеспечение ЛА в отсеке объемом $V = 1 \text{ м}^3$ обеспечивается воздухом $\left(R = 287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right)$ при температуре $T = 293 \text{ К}$ и давлении

$P_0 = 10^5$ Па. Зависимость оцениваемого значения площади сечения возникшей негерметичности от падения давления ΔP в течение 2 минут показана на рисунке 2.

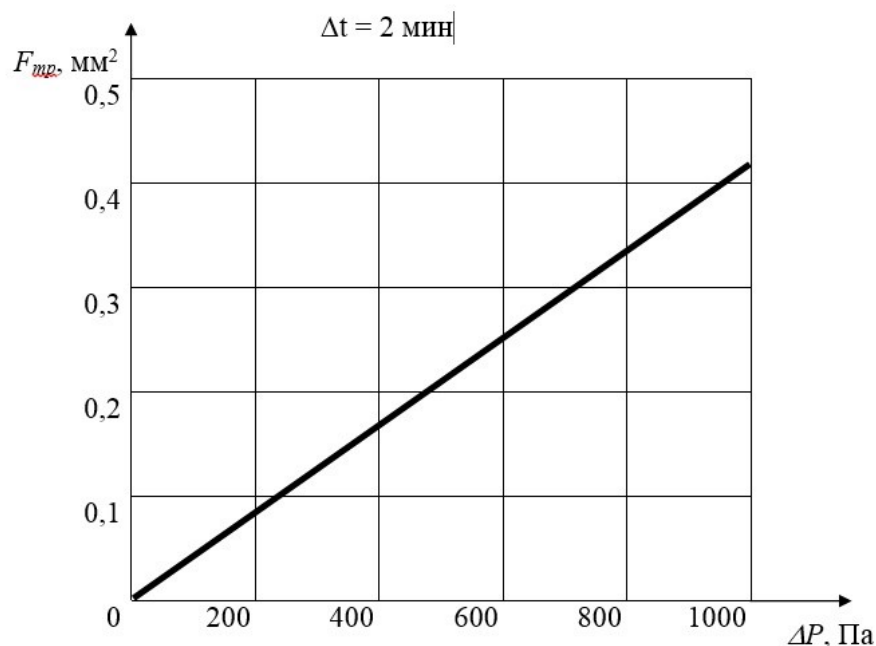


Рис.2 Зависимость оцениваемого значения площади сечения возникшей негерметичности от падения давления ΔP в течение 2 минут

Зависимость времени резерва по (9) от размеров микротрещин при $P_{кр} = 0,75P_0$ показана на рисунке 3.

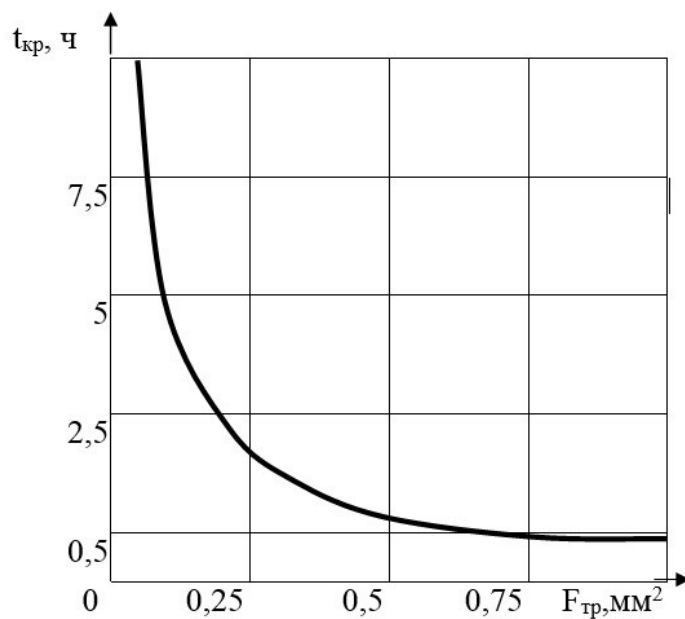


Рис.3 Зависимость времени резерва от размеров микротрещин при $P_{кр} = 0,75P_0$

Анализ данных зависимостей показывает, что для обнаружения микротрещин в герметичных отсеках ЛА должны быть установлены датчики или сигнализаторы давления с чувствительностью не ниже 1,5 Па/с, что даст возможность своевременно обнаружить негерметичности больше 0,1 мм² и обеспечить резерв времени на аварийные действия более 2 часов [22-26]. При этом, если в резерве имеется баллон с аналогичным газом, по объему составляющим 0,1 от объема отсека и при давлении, в 100 раз превышающем давление в отсеке, то продлить этот резерв времени можно до суток.

Заключение

Предлагаемая методика диагностики герметичности ЛА в процессе летной эксплуатации может быть использована для обоснования требований к датчикам и сигнализаторам давления в герметичных отсеках ЛА и к параметрам системы резервных запасов газа. При аварийных негерметичностях в процессе летной эксплуатации возможно, используя формулы (8) – (10), определить оставшийся резерв времени для ликвидации последствий аварии, обеспечения безопасности членов экипажа или аварийной посадки на Землю.

Список источников

1. Максимов Г.Ю. Теоретические основы разработки КА. - М.: Наука, 1980. - 320 с.

2. Тимашев С.В., Лебедев Ю.Н., Сырцов Л.А. и др. Основы теории, конструкции и эксплуатации энергетических и двигательных установок космических аппаратов с неядерными источниками энергии. – СПб.: ВИККИ им. А.Ф. Можайского, 1992. - 511 с.
3. Деревенских В.Ф., Доронин А.П., Лямин В.А. и др. Аспекты экологии, безопасности и живучести космических аппаратов при воздействии на них частиц и объектов природного и техногенного происхождения // Тезисы докладов Международной конференции “Экологическая безопасность на пороге 21 века”. СПб, 30-31 марта 1999.
4. Баркова М.Е. Космический аппарат для утилизации космического мусора в околоземном пространстве // Труды МАИ. 2014. № 75. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=35927>
5. Фролов Е.С., Минайчев В.Е. Вакуумная техника: Справочник. - М.: Машиностроение, 1985. - 360 с.
6. Голубев А.И., Кондаков Л.А. Уплотнения и уплотнительная техника: Справочник. – М.: Машиностроение, 1986. - 464 с.
7. Панасюк В.В. Механика разрушения и прочность материалов: в 4 Т. – Киев: Наукова думка, 1988 – 1990.
8. Деревенских В.Ф., Павутницкий Ю.В., Лямин В.А. Условия распространения трещин в элементах герметичных конструкций орбитальных станций // Научные труды II Международного семинара «Современные проблемы прочности» им. В.А. Лихачева, Старая Русса, 1998. Т. 2. С. 189-201.

9. Деревенских В.Ф., Павутницкий Ю.В., Лямин К.А. Закономерности развития поверхностных и сквозных термоусталостных трещин в конструктивных элементах орбитальных станций. // Научные труды II Международного семинара «Современные проблемы прочности» им. В.А. Лихачева, Старая Русса, 1998. Т. 2. С. 220-226.
10. Панасюк В.В., Андрейкив А.Е., Ковчик С.Е. Методы оценки трещиностойкости конструкционных материалов. – Киев: Наукова думка, 1977. – 277 с.
11. Трощенко В.Т., Покровский В.В., Прокопенко А.В. Трещиностойкость металлов при циклическом нагружении. – Киев: Наукова думка, 1987. – 256 с.
12. Кузнецов Е.Б. Леонов С.С. Математическое моделирование чистого изгиба балки из авиационного материала в условиях ползучести // Труды МАИ. 2013. № 65. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=35927>
13. Ендогур А.И., Кравцов В.А. Напряженное состояние композиционной панели в зоне отверстия // Труды МАИ. 2013. № 64. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=36558>
14. Голуб В.П., Плащинская А.В. О влиянии концевой пластической зоны на рост усталостных трещин в изотропных пластинках при одноосном растяжении-сжатии // Теоретическая и прикладная механика. 2003. № 38. С. 91-96.
15. Antunes F.V., Chegini F.G., Branco R., Camas D. A numerical study of plasticity induced crack closure under plane strain conditions // International Journal of Fatigue, 2015, no. 71, pp. 75-86. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2014.03.016>

16. Yates J.R., Zanganeh M., Tomlinson R.A., Brown M.W., Garrido F.A. Crack paths under mixed mode loading // Engineering Fracture Mechanics, 2008, no. 75, pp. 319-330.
17. Шакиртов М.М., Шабанов А.П., Корнев В.М. Построение диаграмм разрушения для пластин с трещиновидным дефектом на основе необходимых и достаточных критериев // Прикладная механика и техническая физика. 2013. Т. 54. № 2. С. 163-170.
18. Шакиртов М.М. О влиянии коэффициента асимметрии цикла внешней нагрузки на характеристики цикла нагружения материала при вершине трещиновидного дефекта // Труды МАИ. 2016. № 89. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=75559>
19. Шабанов А.П. О механизме роста усталостной трещины в поле внешних сжимающих напряжений // Прикладная механика и техническая физика. 2005. Т. 46. № 6. С. 108-115.
20. Хохлов А.В. Кривые длительной прочности, порождаемые линейной теорией вязкоупругости в сочетании с критериями разрушения, учитывающими историю деформирования // Труды МАИ. 2016. № 91. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=75559>
21. Кутовой В.П., Шабанов А.П., Шакиртов М.М. Исследование напряженно-деформированного состояния вершины усталостной трещины в головке рельса // Известия Транссиба. 2013. № 1 (13). С. 89-94.
22. Шабанов А.П. Возможная модель развития усталостной трещины в упрочняющихся материалах // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2010. № 5. С. 40-47.

23. Коцаньда С. Усталостное растрескивание металлов. - М.: Металлургия, 1990. - 623 с.
24. Трощенко В.Т., Сосновский Л.А. Сопротивление усталости металлов и сплавов. – Киев: Наукова думка, 1987. – 175 с.
25. Головин С.А., Пушкар А. Микропластичность и усталость металлов. - М.: Металлургия, 1980. - 240 с.
26. Беляев Б.В., Голиков И.О., Добролюбов А.Н., Лебедев А.С. Математическая модель для диагностирования работоспособности летательных аппаратов при неисправностях в виде трещин // Труды МАИ. 2020. № 114. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=118918>

References

1. Maksimov G.Yu. *Teoreticheskie osnovy razrabotki KA* (Theoretical foundations of the development of KA), Moscow, Nauka, 1980, 320 p.
2. Timashev S.V., Lebedev Yu.N., Syrtsov L.A. et al. *Osnovy teorii, konstruksii i ekspluatatsii energeticheskikh i dvigatel'nykh ustanovok kosmicheskikh apparatov s neyadernymi istochnikami energii* (Fundamentals of the theory, design and operation of power and propulsion systems of spacecraft with non-nuclear energy sources), Saint Petersburg, VIKKI im. A.F. Mozhaiskogo, 1992, 511 p.
3. Derevenskikh V.F., Doronin A.P., Lyamin V.A. et al. *Tezisy dokladov Mezhdunarodnoi konferentsii "Ekologicheskaya bezopasnost' na poroge 21 veka"*, Saint Petersburg, 1999.

4. Barkova M.E. *Trudy MAI*, 2014, no. 75. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=35927>
5. Frolov E.S., Minaichev V.E. *Vakuumnaya tekhnika: Spravochnik* (Vacuum technology: Handbook), Moscow, Mashinostroenie, 1985, 360 p.
6. Golubev A.I., Kondakov L.A. *Uplotneniya i uplotnitel'naya tekhnika: Spravochnik* (Seals and sealing equipment: Handbook) Moscow, Mashinostroenie, 1986, 464 p.
7. Panasyuk V.V. *Mekhanika razrusheniya i prochnost' materialov* (Mechanics of destruction and strength of materials), Kiev, Naukova dumka, 1988-1990.
8. Derevenskikh V.F., Pavutnitskii Yu.V., Lyamin V.A. *Nauchnye trudy II Mezhdunarodnogo seminar "Sovremennye problemy prochnosti" im. V.A. Likhacheva*, Staraya Russa, 1998, vol. 2, pp. 189-201.
9. Derevenskikh V.F., Pavutnitskii Yu.V., Lyamin K.A. *Nauchnye trudy II Mezhdunarodnogo seminar "Sovremennye problemy prochnosti" im. V.A. Likhacheva*, Staraya Russa, 1998, vol. 2, pp. 220-226.
10. Panasyuk V.V., Andreikiv A.E., Kovchik S.E. *Metody otsenki treshchinostoikosti konstruktsionnykh materialov* (Methods for assessing the crack resistance of structural materials), Kiev, Naukova dumka, 1977, 277 p.
11. Troshchenko V.T., Pokrovskii V.V., Prokopenko A.V. *Treshchinostoikost' metallov pri tsiklicheskom nagruzhenii* (Crack resistance of metals under cyclic loading), Kiev, Naukova dumka, 1987, 256 p.
12. Kuznetsov E.B., Leonov S.S. *Trudy MAI*, 2013, no. 65. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=35927>

13. Endogur A.I., Kravtsov V.A. *Trudy MAI*, 2013, no. 64. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=36558>
14. Golub V.P., Plashchinskaya A.V. *Teoreticheskaya i prikladnaya mekhanika*, 2003, no. 38, pp. 91-96.
15. Antunes F.V., Chegini F.G., Branco R., Camas D. A numerical study of plasticity induced crack closure under plane strain conditions, *International Journal of Fatigue*, 2015, no. 71, pp. 75-86. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2014.03.016>
16. Yates J.R., Zanganeh M., Tomlinson R.A., Brown M.W., Garrido F.A. Crack paths under mixed mode loading, *Engineering Fracture Mechanics*, 2008, no. 75, pp. 319-330.
17. Shakirtov M.M., Shabanov A.P., Kornev V.M. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*, 2013, vol. 54, no. 2, pp. 163-170.
18. Shakirtov M.M. *Trudy MAI*, 2016, no. 89. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=75559>
19. Shabanov A.P. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*, 2005, vol. 46, no. 6, pp. 108-115.
20. Khokhlov A.V. *Trudy MAI*, 2016, no. 91. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=75559>
21. Kutovoi V.P., Shabanov A.P., Shakirtov M.M. *Izvestiya Transsiba*, 2013, no. 1 (13), p. 89-94.
22. Shabanov A.P. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2010, no. 5, pp. 40-47.

23. Kotsan'da S. *Ustalostnoe rastreskivanie metallov* (Fatigue cracking of metals), Moscow, Metallurgiya, 1990, 623 p.
24. Troshchenko V.T., Sosnovskii L.A. *Soprotivlenie ustalosti metallov i splavov* (Fatigue resistance of metals and alloys), Kiev, Naukova dumka, 1987, 175 p.
26. Golovin C.A., Pushkar A. *Mikroplastichnost' i ustalost' metallov* (Microplasticity and fatigue of metals), Moscow, Metallurgiya, 1980, 240 p.
26. Belyaev B.V., Golikov I.O., Dobrolyubov A.N., Lebedev A.S. *Trudy MAI*, 2020, no. 114. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=118918>. DOI: [10.34759/trd-2020-114-09](https://doi.org/10.34759/trd-2020-114-09)

Статья поступила в редакцию 19.05.2022

Статья после доработки 23.05.2022

Одобрена после рецензирования 10.06.2022

Принята к публикации 25.08.2022

The article was submitted on 19.05.2022; approved after reviewing on 10.06.2022; accepted for publication on 25.08.2022