УДК 621.891

ОЦЕНКА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАР ТРЕНИЯ С ТВЕРДОСМАЗОЧНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ ДИФФУЗИОННОГО ТИПА ДЛЯ НОРМАЛЬНЫХ АТМОСФЕРНЫХ УСЛОВИЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

П.Н. ХОПИН, д-р техн. наук

Московский авиационный институт
(Национальный исследовательский университет),
125993, Москва, Волоколамское шоссе, 4, e-mail: chopinp@mail.ru

© Хопин П.Н., 2022

В результате проведенных исследований определена линейная интенсивность изнашивания I_h твердосмазочных покрытий (ТСП) диффузионного типа димолит (М801) в парах трения с различными контртелами (Д16Т, ВТ3-1, Fe-Pb, Mo, Mo + 30 % MoS_2, Mo + 50 % MoS_2, димолит, графит) для условий нормальной атмосферы. Линейная интенсивность изнашивания лучших пар с димолитом, сравнимая с ТСП суспензионного нанесения ВНИИ НП-212, составила $I_h = (2{,}9…5{,}51)\cdot 10^{-10}$ для контртел, изготовленных из псевдосплава Fe-Pb, молибдена, комбинированных материалов Mo + MoS_2 и димолита. Наилучшие антифрикционные свойства ($f_{тр} = 0{,}02$) в паре с димолитом показывают контртела, изготовленные из Д16Т, ВТ3-1, псевдосплава Fe-Pb и молибдена.

Ключевые слова: твердосмазочные диффузионные покрытия, нормальная атмосфера, триботехнические характеристики, контртело.

DOI: 10.46573/2658-5030-2022-1-28-35

ВВЕДЕНИЕ

К числу твердосмазочных покрытий (ТСП), широко используемых в узлах трения и функционирующих в условиях как нормальной атмосферы, так и вакуума, относятся ТСП на основе MoS_2 диффузионного типа, полученные как химико-термической обработкой материала основы (Димолит-1, или М801), так и нанесением покрытий на металлические поверхности с последующим их сульфидированием [1] (Димолит-4, или М804).

Проведенные ранее исследования для ТСП диффузионного типа Димолит-1 [2] были посвящены изучению износа и коэффициента трения пар с применением различных контртел в условиях нормальной атмосферы и вакуума. Однако не оценивались значения линейной интенсивности изнашивания и не проводилось сравнение указанного параметра с широко используемым ТСП суспензионного нанесения ВНИИ НП-212, что и является целью настоящей статьи.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В статье [2] исследовалось ТСП диффузионного нанесения М801 (димолит) при трении в условиях нормальной атмосферы с применением ряда контртел (табл. 1).

Таблица 1. Материалы контртел при трибоиспытаних ТСП М801
в условиях нормальной атмосферы
(торцевая схема трения, P = 2 МПа, n = 830 об/мин)

Марка контртела	Тип материала контртела
Д16Т	Алюминиевый сплав
ВТ3-1	Титановый сплав
Fe-Pb	Псевдосплав
Mo	–
Mo + 30 % MoS_2 Mo + 50 % MoS_2	Изотропные комбинированные материалы на основе дисульфида молибдена
Димолит	Сульфидированный молибден
Графит	–

В качестве материалов контртела использовали молибден, изотропные комбинированные материалы на основе молибдена с 30 и 50 об. % MoS_2, а также димолит. Эта серия исследований позволила оценить влияние на триботехнические свойства различных концентраций MoS_2 на поверхности контртела. Затем были опробованы алюминиевый (Д16Т) и титановый (ВТ3-1) сплавы, псевдосплав Fe + 20 об. % Pb) и графит, т.е. материалы с ярко выраженными различиями в механических свойствах и структуре. Поверхность контртела обрабатывалась до 8-го класса чистоты.

При скольжении по торцевой схеме образец и контртело контактировали по кольцевой площадке с внутренним и наружным диаметрами соответственно (12 и 20 мм) при частоте вращения верхнего образца n = 830 об/мин и удельной нагрузке P = 2 МПа (20 кгс/см^2).

Термокорреляционная оценка износостойкости ТСП суспензионного нанесения ВНИИ НП-212 производилась на модернизированной установке роликового типа, описанной в работе [3], позволяющей бесступенчато изменять нагрузочно-скоростные параметры трибологических испытаний с непрерывной записью коэффициента и температуры трения. Твердосмазочное покрытие наносилось на механизированном приспособлении на вращающийся образец, изготовленный из стали ШХ15. Контртело было создано из закаленной стали ХВГ (HRC 60).

Эксперименты проводились с использованием центрального композиционного ротатабельного планирования 2-го порядка. Диапазоны варьируемых факторов были выбраны следующими: основной уровень и интервалы варьирования скорости скольжения V = 0,66±0,4 м/с; контактной нагрузки N = 784±392 Н; звездные точки V = 0,096 и 1,224 м/с и N = 231 и 1 337 Н. Контактное давление определялось с учетом измеренной после испытаний площади пятна износа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты испытаний (табл. 2) показывают, что материал контртела существенно влияет на величину коэффициента трения и, что самое главное, заметно сказывается на величине и равномерности изнашивания.

В результате проведенных расчетов были оценены толщина изношенного материала образцов h и величина линейной интенсивности изнашивания материала образца из димолита I_h (табл. 2).

Таблица 2. Результаты трибоиспытаний ТСП диффузионного типа М801 (димолит) при трении на воздухе по торцевой схеме в зависимости от материала контртела (торцевая схема трения, P = 2 МПа, V = 0,7 м/с)

Материал контртела	Коэффициент трения $f_{тр}$ установившегося режима трения	Средний износ, мг		Расчетные значения	
		Образец	Контр-тело	h, мкм	I_h
Д16Т	0,02…0,03	3,4±1,2	Нет	6,27	$1{,}31\cdot10^{-9}$
ВТ3-1	0,015…0,025	5,9±2,1	«	6,52	$1{,}36\cdot10^{-9}$
Fe-Pb	0,018…0,025	2,4±0,6		1,39	$2{,}916\cdot10^{-10}$
Mo	0,013…0,025	4,9±0,8		2,39	$5{,}0\cdot10^{-10}$
Mo + 30 % MoS_2	0,04…0,06	3,6±0,4	4,8±2,5	2,09	$4{,}37\cdot10^{-10}$
Mo + 50 % MoS_2	0,05…0,06	4,5±2,0	2,2±1,9	2,99	$6{,}266\cdot10^{-10}$
Димолит	0,04…0,05	5,4±3,4	2,9±0,0	2,63	$5{,}51\cdot10^{-10}$
Графит	0,06…0,09	6,0±4,8	14,5±4,8	14,2	$2{,}97\cdot10^{-9}$

Сравнительная диаграмма расчетных величин I_h представлена на рис. 1.

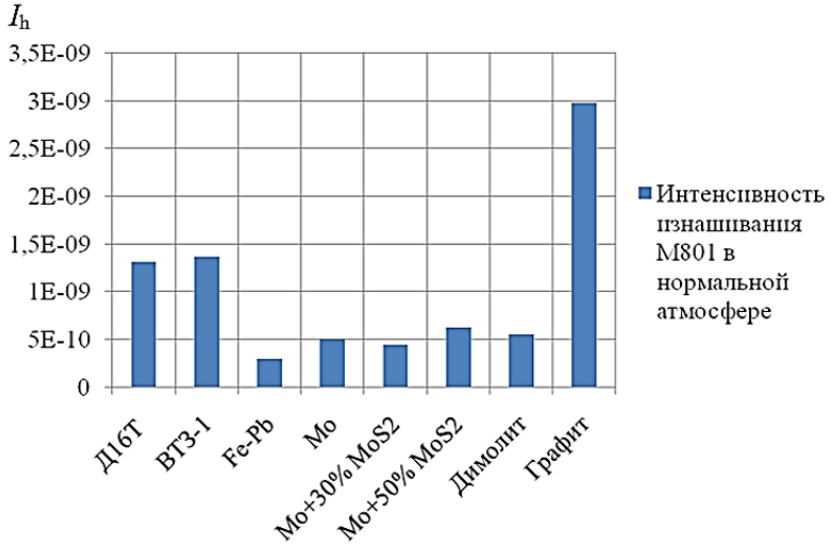

Рис. 1. Сравнительная диаграмма значений линейной интенсивности изнашивания димолита в паре с различными контртелами при трении в условиях нормальной атмосферы

Анализ данных (см. рис. 1) позволяет сделать выводы:

1. Наибольшая износостойкость при трении образцов из димолита имеется у контртел, изготовленных из псевдосплава Fe-Pb, молибдена, комбинированных материалов Mo + MoS_2 и димолита.

2. Меньшая износостойкость присуща парам, где используются контробразцы из алюминиевого (Д16Т) и титанового (ВТ3-1) сплавов.

3. Наименьшую износостойкость показала пара трения, где применяется контртело, изготовленное из графита ($I_h = 2{,}97 \cdot 10^{-9}$).

В результате обработки данных по антифрикционным характеристикам рассматриваемых пар трения была построена диаграмма (рис. 2).

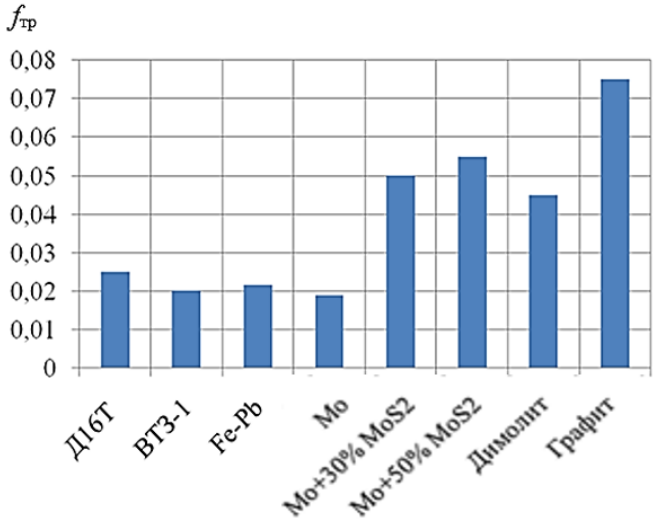

Рис. 2. Сравнительная диаграмма значений коэффициентов трения установившегося режима при трении образцов из димолита по различным контртелам в условиях нормальной атмосферы

Анализ приведенных значений коэффициента трения установившегося режима (см. рис. 2) позволяет сделать выводы:

1. Наилучшие антифрикционные свойства в паре с димолитом имеются у контртел, изготовленных из алюминиевого (Д16Т) и титанового (ВТ3-1) сплавов, псевдосплава Fe-Pb и молибдена ($f_{тр} = 0{,}02$).

2. Удовлетворительными антифрикционными характеристиками обладают пары с контртелами, созданными из комбинированных материалов Mo + MoS_2 и димолита ($f_{тр} = 0{,}04…0{,}05$).

3. Наихудшие антифрикционные характеристики показали пары с контртелами, изготовленными из графита ($f_{тр} = 0{,}075$).

На следующем этапе решалась задача сравнительной оценки износостойкости диффузионного ТСП димолит с ТСП, нанесенным суспензионным способом (ВНИИ НП-212). Учитывая показанное ранее решающее влияние на ресурс и антифрикционные характеристики пар с ТСП поверхностной температуры трения, сравнение линейной интенсивности изнашивания ТСП суспензионного и диффузионного методов нанесения осуществляли по данному параметру (т.е. по поверхностной температуре трения $T_{тр}$).

Для ТСП суспензионного нанесения ВНИИ НП-212 в результате эксперимента, проведенного на модернизированной машине трения роликового типа, была получена зависимость $T_{тр} = f(P, V)$ [3] для диапазонов варьирования нагрузочно-скоростных факторов $V = 0{,}096…1{,}224$ м/с и $P = 23{,}1…133{,}7$ МПа:

$$T_{тр} = 36{,}49 + 132{,}23V + 0{,}535P + 0{,}234PV - 47{,}94V^2 - 2{,}094 \cdot 10^{-3}P^2,$$

где $T_{тр}$ – поверхностная температура трения [°C]; P – контактное давление [МПа]; V – скорость скольжения [м/с].

Скорость скольжения в трибоиспытаниях с димолитом $V = 0{,}7$ м/с входит в диапазон исследуемых скоростей при получении уравнения, приведенного выше. Значение контактного давления $P = 2$ МПа выходит за границы диапазонов исследованных давлений. В связи с этим был выполнен пересчет средней поверхностной температуры трения $T_{тр}$ применительно к условиям испытаний с димолитом по схеме, представленной на рис. 3.

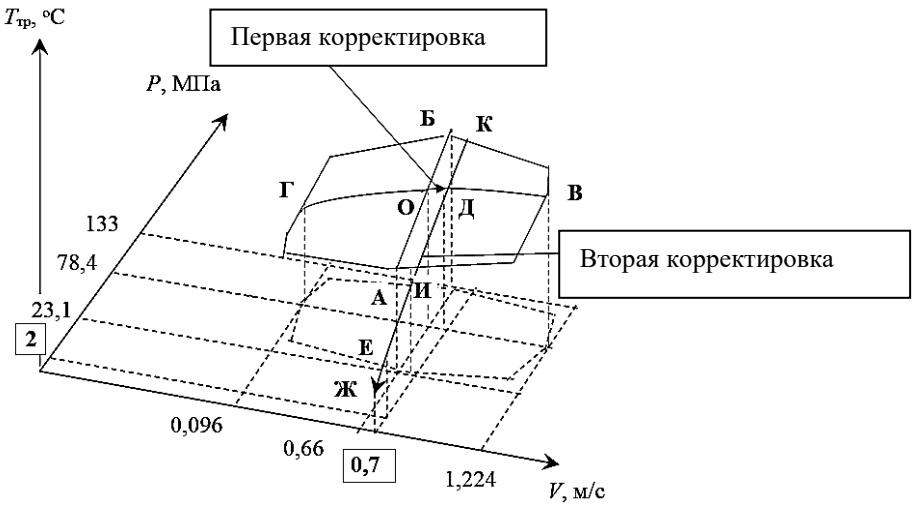

Рис. 3. Схема этапов корректировки
поверхностной температуры трения $T_{тр}$
для условий трибоиспытаний с димолитом

На первом этапе корректировки пересчет температуры $T_{тр}$ был проведен путем перехода из точки О в точку Д, соответствующую искомой скорости скольжения $V = 0{,}7$ м/с, по кривой ГОВ при сечении поверхности $T_{тр} = f(P, V)$ (см. уравнение для расчета $T_{тр}$) вертикальной плоскостью при $P = 78{,}4$ МПа. В результате расчета поверхностная температура трения для точки Д $T_{тр}$ = 146,5 °С. На втором этапе корректировки пересчет температуры $T_{тр}$ был выполнен путем перехода из точки Д в точку Е по кривой КДИЕЖ. Графическая интерпретация кривой КДИЕЖ представлена на рис. 4.

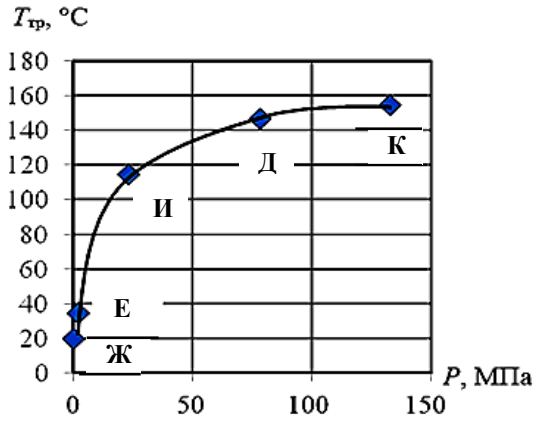

Рис. 4. Графическая интерпретация кривой КДИЕЖ
на втором этапе корректировки
при расчете поверхностной температуры трения $T_{тр}$
для условий трибоиспытаний с димолитом

Вначале был построен график зависимости, описывающий кривую БОА, соответствующую сечению поверхности $T_{тр} = f(P, V)$ вертикальной плоскостью при $V = 0{,}66$ м/с. С учетом увеличения ординаты при переходе от точки О к точке Д было получено уравнение кривой КДИ. Его построили, принимая во внимание точку Ж, соответствующую условию контактного давления $P = 0$ МПа (при этом поверхностная температура была принята $T_{тр} = 20$ °С).

В результате расчетов поверхностная температура трения для искомых условий трибоиспытаний с димолитом для точки Е составила $T_{тр} = 34{,}65$ °С. С учетом полученной поверхностной температуры для условий трения пар с димолитом с различными контртелами, а также уравнения $T_{тр} = f(P, V)$ для ТСП ВНИИ НП-212 был построен график (рис. 5).

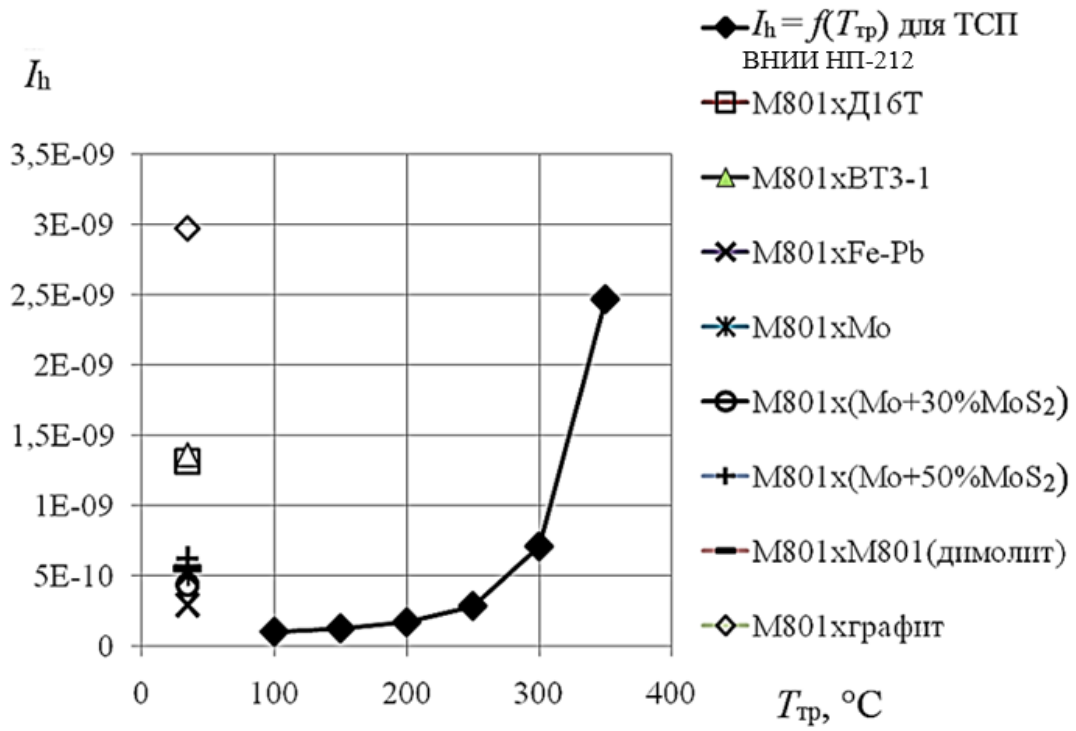

Рис. 5. Результаты корреляционного анализа
линейной интенсивности изнашивания
в зависимости от поверхностной температуры трения
для пар с ТСП диффузионного типа димолит (М801)
с различными контртелами
и ТСП суспензионного нанесения ВНИИ НП-212

Результаты сравнительного анализа (см. рис. 5) показывают, что наибольшую износостойкость, сравнимую с ТСП суспензионного нанесения ВНИИ НП-212, имеют пары трения диффузионного ТСП димолит с контртелами из псевдосплава Fe-Pb; изотропных комбинированных материалов на основе дисульфида молибдена; молибдена, димолита.

ВЫВОДЫ

После проведенных исследований можно подвести итоги:

1. Определена линейная интенсивность изнашивания ТСП диффузионного типа димолит (М801) в парах трения с различными контртелами (Д16Т, ВТ3-1, Fe-Pb, Mo, Mo + 30 % MoS_2, Mo + 50 % MoS_2, димолитом, графитом) для условий нормальной атмосферы.

2. Наибольшую износостойкость по параметру линейной интенсивности изнашивания, сравнимую с ТСП суспензионного нанесения ВНИИ НП-212, при трении образцов из димолита имеют контртела, изготовленные из псевдосплава Fe-Pb, молибдена, комбинированных материалов Mo + MoS_2 и димолита ($(2{,}9\ldots6{,}3)\cdot10^{-10}$).

3. Наименьшую износостойкость показала пара трения с применением контртела, изготовленного из графита ($I_h = 2{,}97\cdot10^{-9}$).

4. Наилучшие антифрикционные свойства в паре с димолитом имеют контртела, изготовленные из алюминиевого (Д16Т), титанового (ВТ3-1) сплавов, псевдосплава Fe-Pb и молибдена ($f_{тр} = 0{,}02$).

5. Удовлетворительные антифрикционные характеристики имеются у пар с контртелами, созданными из комбинированных материалов Mo + MoS_2 и димолита ($f_{тр} = 0{,}04\ldots0{,}05$).

6. Наихудшие антифрикционные характеристики показали пары с контртелами, изготовленными из графита ($f_{тр} = 0{,}075$).

ЛИТЕРАТУРА

1. Цеев Н.А., Козелкин В.В., Гуров А.А. Материалы для узлов сухого трения, работающих в вакууме. М.: Машиностроение. 1991. 188 с.

2. Буяло А.С., Лобашев Б.П., Макаров Ю.В., Шепель С.А. Исследование влияния материала контртела на работоспособность дисульфидмолибденовых покрытий диффузионного типа // *Твердые смазочные покрытия*: *сборник статей.* М.: Наука. 1977. С. 78–83.

3. Хопин П.Н. Комплексная оценка работоспособности пар трения с твердосмазочными покрытиями в различных условиях функционирования. М.: МАТИ. 2012. 256 с.

Для цитирования: Хопин П.Н. Оценка триботехнических характеристик пар трения с твердосмазочными покрытиями диффузионного типа для нормальных атмосферных условий функционирования // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2022. № 1 (13). С. 28–35.

EVALUATION OF TRIBOTECHNICAL CHARACTERISTICS OF FRICTION PAIRS WITH SOLID LUBRICATING COATINGS OF DIFFUSION TYPE FOR NORMAL ATMOSPHERIC OPERATING CONDITIONS

P.N. KHOPIN, Dr. Sc.

Moscow Aviation Institute (National Research University), 4, Volokolamsk highway, 125993, Moscow, Russian Federation, e-mail: chopinp@mail.ru

As a result of the studies carried out, the linear wear rate Ih of solid lubricating coatings (TSP) of the diffusion type dimolite (M801) in friction pairs with various counterbodies (D16T, VT3-1, Fe-Pb, Mo, Mo + 30 % MoS_2, Mo + 50 % MoS_2 , dimolite, graphite) for normal atmospheric conditions. The linear wear rate of the best pairs with dimolite, comparable to the TSP of suspension deposition of VNII NP 212, was I_h = (2.9...5.51) · 10^{-10} for counterbodies made of Fe-Pb pseudo-alloy, molybdenum, combined materials Mo + MoS_2 and dimolite. The best antifriction properties (f_{fr} = 0.02) in a pair with dimolite are found by counterbodies made of D16T, VT3-1, pseudo-alloy Fe-Pb and molybdenum.

Keywords: solid lubricating diffusion coatings, normal atmosphere, tribotechnical characteristics, counterbody.

REFERENCES

1. Tseev N.A., Kozelkin V.V., Gurov A.A. Materialy dlya uzlov sukhogo treniya, rabotayushchikh v vakuume [Materials for dry friction units operating in vacuum]. Moscow: Mashinostroyeniye. 1991. 188 p.

2. Buyalo A.S., Lobashev B.P., Makarov Yu.V., Shepel S.A. Investigation of the effect of the counterbody material on the performance of diffusion-type disulfide-molybdenum coatings. *Tvordyye smazochnyye pokrytiya: sbornik statey.* Moscow: Nauka. 1977, pp. 78–83. (In Russian).

3. Khopin P.N. Kompleksnaya otsenka rabotosposobnosti par treniya s tvordosmazochnymi pokrytiyami v razlichnykh usloviyakh funktsionirovaniya [Comprehensive assessment of the performance of friction pairs with hard-lubricating coatings in various operating conditions]. Moscow: MATI. 2012. 256 p.

Поступила в редакцию/received: 08.12.2021; после рецензирования/revised: 10.01.2022; принята/accepted: 27.01.2022