

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СКОЛЬЗЯЩЕГО КОНТАКТА
«ЩЕТКА – КОЛЛЕКТОР»
ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ**

А.Ф. ГУСЕВ, канд. техн. наук, В.В. ИЗМАЙЛОВ, д-р техн. наук,
М.В. НОВОСЕЛОВА, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: iz2v2@mail.ru

© Гусев А.Ф., Измайлов В.В., Новоселова М.В., 2022

Приводится описание конструкции установки для исследования фрикционных и электрических характеристик щеточно-коллекторного узла электродвигателей при температурах окружающего пространства до 200 °С. Установка позволяет в динамике измерять скорость вращения коллектора, нормальную нагрузку на контакт, силу трения, силу тока через контакт, переходное падение напряжения, температуру в термокамере. Характеристикой износостойкости служит линейная интенсивность изнашивания, определенная после испытаний. Для иллюстрации возможностей установки приведены результаты сравнительных испытаний четырех электрощеточных материалов. Результаты показали, что наилучшим сочетанием эксплуатационных характеристик обладает материал следующего состава: 40 % – медь; 20 % – графит; 40 % – дисульфид молибдена.

Ключевые слова: щетка, коллектор, трение, изнашивание, электрическое сопротивление, высокие температуры, материалы.

DOI: 10.46573/2658-5030-2022-1-14-21

ВВЕДЕНИЕ

Вследствие увеличения удельных энергетических нагрузок на современные машины и приборы непрерывно повышаются требования к надежности и долговечности самых различных по назначению и исполнению электрических контактов. Одно из обязательных условий обеспечения этих требований – оптимальный выбор конструкционных и функциональных материалов для конкретного электроконтактного соединения.

При создании или выборе материала для скользящих электрических контактов необходимо обеспечить сочетание его высоких антифрикционных свойств с хорошей проводимостью. Особую разновидность скользящих электрических контактов представляют собой контакты типа «щетка – коллектор», широко используемые в различных электрических машинах.

Повышение надежности и эффективности работы щеточно-коллекторного узла невозможно без всестороннего экспериментального исследования влияния различных факторов на его эксплуатационные характеристики. Вследствие большой практической важности материалы для электрических щеток были и остаются объектом многочисленных научных исследований [1–5]. Материал щеток должен обладать достаточной прочностью, малым удельным электрическим сопротивлением, низкой склонностью к схватыванию и обеспечивать в контакте с коллектором малое контактное сопротивление, низкое и стабильное значение коэффициента трения и

высокую износостойкость. При этом качество этих материалов нельзя оценивать в отрыве от конкретных условий их эксплуатации, так как максимально использовать преимущества материала можно только при вполне определенных рабочих режимах. Значительная часть электродвигателей работает в весьма жестких условиях: большая скорость вращения, повторно-кратковременный режим работы (в том числе и при высоких внешних температурах) и т.д.

Описываемая экспериментальная установка была разработана и изготовлена для исследований фрикционных и электрических характеристик и износостойкости щеточно-коллекторного узла электродвигателей при высоких температурах. Установка позволяет одновременно в динамике измерять скорость вращения коллектора, нормальную нагрузку на контакт, силу трения, силу тока через контакт, переходное падение напряжения, температуру в термокамере.

КОНСТРУКЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Принципиальная схема установки приведена на рис. 1, конструкция щеточно-коллекторного узла – на рис. 2. Одна и та же деталь на рисунках обозначена одинаковым номером. Установка состоит из станины, привода, щеточно-коллекторного узла, термокамеры и системы измерения трения. Станина состоит из платформы 28, на которой установлены три стойки (16, 26 и 29), четырех ножек 30 и листа 22 на отдельных ножках 23. Стойка 29 предназначена для крепления электродвигателя 1, а в стойках 16 устанавливаются подшипниковые опоры 15 и 25. Для удобства демонтажа подшипниковых опор имеются съемные планки 3 и 11, которые крепятся к стойке болтами. Лист 22 служит для установки на нем термокамеры. В качестве привода используется электродвигатель 1, который через муфту 2 и вал 27, установленный в подшипниковой опоре, приводит во вращательное движение коллектор. Щеточно-коллекторный узел является основным элементом установки и состоит из коллектора 4, насаженного на вал 27, и двух щеток 5, закрепленных на щеткодержателях 6, которые жестко зафиксированы на осях 8.

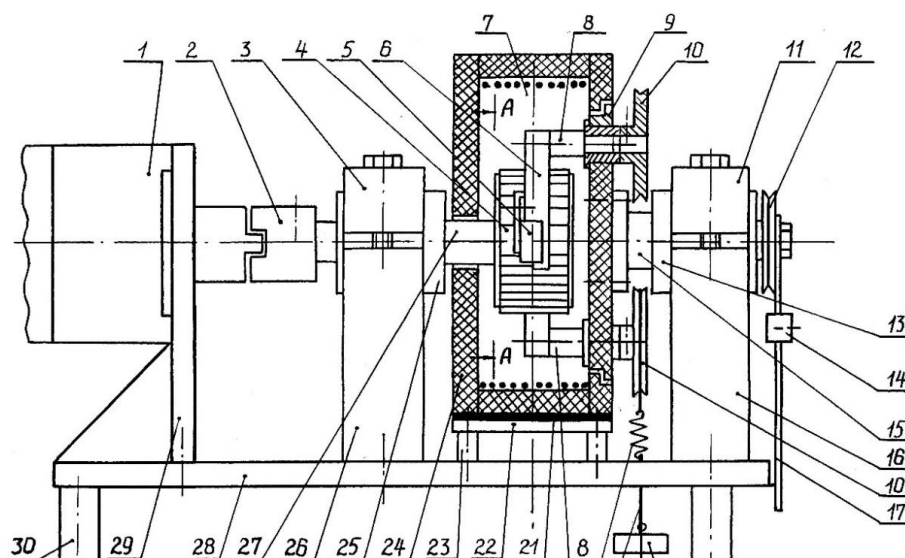


Рис. 1. Принципиальная схема установки для исследования фрикционных и электрических характеристик щеточно-коллекторного узла при высоких температурах

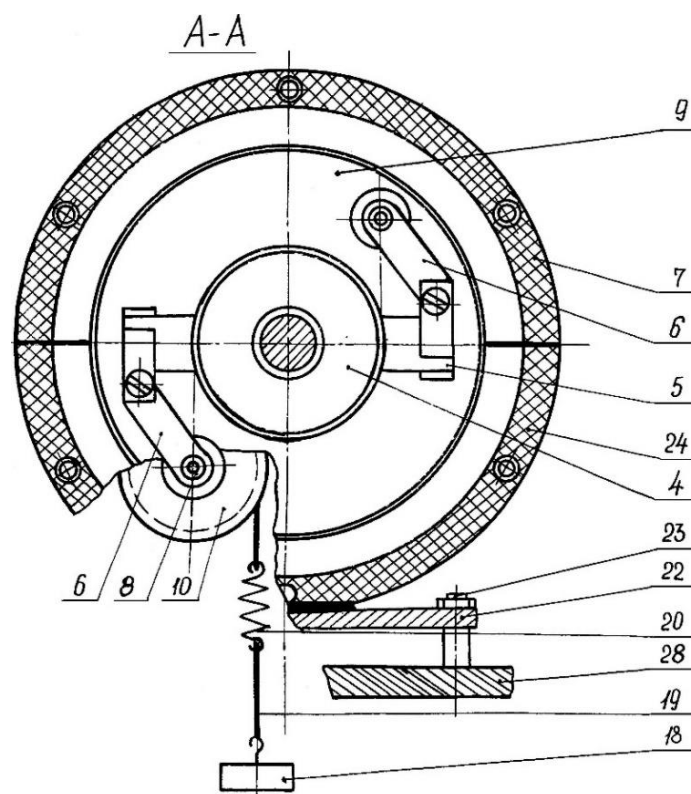


Рис. 2. Конструкция щеточно-коллекторного узла

Оси 8 (см. рис. 1, 2) шарнирно закреплены на диске 9 посредством бронзовых втулок, служащих подшипниками скольжения. При этом оси щеткодержателей расположены на линии действия силы трения. Таким образом, конструкция крепления щеток выполнена поворотной относительно оси и исключает возможность их заклинивания.

Создание нормальной нагрузки на контакт каждой щетки с коллектором осуществляется грузом 18 через пружину 20, гибкую нить 19 и шкив 10, зафиксированный на оси 8.

Корпус термокамеры изготовлен из тепло- и электроизолирующего материала и состоит из двух частей: верхней легкоъемной части 7 и нижней части 24, установленной через прокладку 21 из слюды на лист 22 станины и жестко укрепленной винтами. Диск 9 служит для закрепления на нем электрощеток, а кроме того, является частью корпуса термокамеры. В термокамере установлен нагревательный элемент, который питается от электросети через автотрансформатор. Установившаяся в камере температура измеряется и поддерживается с помощью автоматического потенциометра с хромель-копелевыми термопарами.

Система измерения трения состоит из маятника, по стержню 17 которого может перемещаться и фиксироваться в любой точке груз 14, и шкива 12. Шкив и стержень жестко закреплены на валу, установленном в подшипниковой опоре 13. С противоположной стороны вал жестко связан с полумуфтой 15, на которую подвешивается диск 9 со щетками. Момент трения от щеток передается через диск, полумуфту и вал маятнику 17, по углу отклонения которого можно определить величину силы трения. Трение в подшипниковой опоре исключается из отчета, так как момент трения в подшипниках уравнивается моментом силы, создаваемым специальным контргрузом, подвешенным с помощью шкива 12. Если необходимо

записать величину силы трения, на поверхность стержня наклеиваются с противоположных сторон тензодатчики, представляющие собой активный полумост измерительной схемы. Упругая деформация стержня пропорциональна моменту силы трения. Сигнал рассогласования от тензодатчиков поступает через тензоусилитель на быстродействующий регистрирующий прибор. Предварительно система измерения силы трения должна быть оттарирована с помощью стандартного набора разновесов.

Контактное электрическое сопротивление измеряется по стандартной четырехпроводной схеме. Электроды, с которых снимали контактную разность потенциалов, закрепляются в щеткодержателе вместе со щетками вблизи контактной поверхности. Через контакт пропускается постоянный электрический ток, значение которого контролируется с помощью амперметра.

Измерение износа щеток и коллектора осуществляется весовым методом по разнице результатов взвешивания деталей на аналитических весах до и после эксперимента. Так как износ коллектора происходит не по всей его поверхности, то величину линейного износа коллектора можно определять по профилограммам внешней поверхности, записанным на профилометре-профилографе. Для этого на профилограмме определяется положение средней линии шероховатости изношенной и неизношенной частей коллектора. Разница положений средней линии дает величину линейного износа.

МАТЕРИАЛЫ И УСЛОВИЯ ИСПЫТАНИЙ

Описанную установку можно использовать как для экспериментального исследования влияния состава электрощеточного материала на фрикционные и электрические характеристики щеточно-коллекторного узла, так и для изучения работоспособности этого узла при различных режимах его эксплуатации.

В частности, на данной установке были выполнены сравнительные экспериментальные исследования фрикционных и коммутационных свойств электрографитовых и композиционных металлографических электрощеточных материалов для скважинных геофизических приборов при режимах, соответствующих достаточно жестким условиям эксплуатации: скорости вращения коллектора до 15 000 об/мин, плотности тока до 10 А/см² и температуре окружающего пространства до 200 °С. В данных условиях работа щеточно-коллекторного узла весьма затруднена: наблюдаются большой износ коллектора и щеток, заедание щеток и, как следствие, отказ электродвигателя. По этой причине щеточно-коллекторный узел электродвигателя остается одним из самых малонадежных элементов, а его работоспособность в значительной степени определяет надежность и долговечность работы прибора в целом.

Образцами для испытаний послужили обычные рабочие коллекторы электродвигателя диаметром 40 мм, изготовленные из кадмиевой коллекторной меди. Ламели коллектора были коротко замкнуты при помощи латунного кольца, туго насаженного на коллектор. Щетки имели размеры 6,2×10×20 мм. Материал щеток – электрографитовые и композиционные металлокерамические материалы на основе графита и меди.

Работоспособность любого электродвигателя, особенно высокооборотного, в значительной степени зависит от величины биения коллектора. С увеличением биений возрастает износ контакта «щетка – коллектор», изменяется характер износа, а также увеличивается переходное падение напряжения. Были проведены испытания щеток из материала МГ 16 (16 % – графит, остальное – медь) при температуре 200 °С, контактном давлении 30 кПа, плотности тока 10 кА/м² и скорости относительного

скольжения в контакте 22 м/с. Измеренное значение биения коллектора составило 70 мкм. В эксперименте наблюдали неравномерное изнашивание коллектора, на внешней поверхности которого можно различить две зоны износа. Участок, где происходит «подъем» коллектора и соответственное увеличение нагрузки на щетки, является областью преимущественного механического изнашивания. На участке, где происходит «опускание» коллектора, при больших скоростях скольжения нагрузка не успевает прижимать щетки к коллектору, что сопровождается увеличением искрообразования. В этой области развивается преимущественно электроэрозионное изнашивание. Величина механического и эрозионного износа в целом зависит от величины биения коллектора, нагрузки на щетки, плотности тока и скорости вращения. Так, повышение нагрузки увеличивает механическое изнашивание, а плотности тока – эрозионное изнашивание. В нашем случае (вследствие относительно малой плотности тока) доминировало механическое изнашивание. За 2 ч работы узла при указанных режимах линейный износ составил 62 мкм в точке максимального изнашивания. Область эрозионного износа характеризовалась переносом материала щеток на коллектор с образованием нароста. После удаления материала щеток линейный износ в этом месте составил 5 мкм. В последующих экспериментах с целью устранения несоосности и минимизации биений коллектор предварительно протачивали на специальной оправке, а щетки прирабатывали притиром (диаметром 40 мм), установленным на валу вместо коллектора.

При эксплуатации токосъемов электрических машин существенное влияние на долговечность щеточно-коллекторного узла оказывает скорость вращения коллекторов. Был проведен эксперимент по изучению зависимости коэффициента трения и переходного падения напряжения в контакте от скорости. В этом эксперименте использовали короткозамкнутый коллектор из коллекторной кадмиевой меди и медно-графитовые щетки из материала МГ 16. Относительная скорость скольжения в контакте менялась в пределах от 2 до 22 м/с. Перед проведением измерений контакт прирабатывали в течение 2 ч.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Результаты показаны на рис. 3 в виде зависимостей коэффициента трения f и переходного падения напряжения ΔU от скорости скольжения V . Как видно из графиков, с возрастанием скорости скольжения (вследствие увеличения окружной скорости вращения коллектора) коэффициент трения в контакте «щетка – коллектор» уменьшается в 1,5...2 раза. Характер кривых в данном случае обусловлен величиной давления на щетку. При малых давлениях происходит более интенсивное снижение коэффициента трения: с 0,20 до 0,09 при давлении 30 кПа или с 0,17 до 0,11 при давлении 50 кПа.

Переходное падение напряжения при скорости до 10 м/с составляет порядка 20–50 мВ. При скорости свыше 15 м/с происходит резкое увеличение переходного падения напряжения, чему соответствует интенсивное искрообразование в контакте. Это явление связано с отклонением коллектора от правильной формы и жесткостью крепления щеток в щеткодержателях.

В таблице представлены результаты сравнительных исследований работоспособности различных электрощеточных материалов для следующего режима испытаний: объемная температура в термокамере 200 °С, нормальное давление в контакте 30 кПа; плотность тока 10 кА/м²; относительная скорость скольжения $V = 22$ м/с. Продолжительность испытаний – до 10 ч. Эксперименты проводили со щетками, изготовленными из следующих материалов: ВТ5 (электрографит с впеченными столбиками из дисульфида молибдена); МГМ1 (40 % – медь; 20 % –

графит; 40 % – дисульфид молибдена); МГ16 (16 % – графит; остальное – медь) и МГ21 (21 % – графит; остальное – медь).

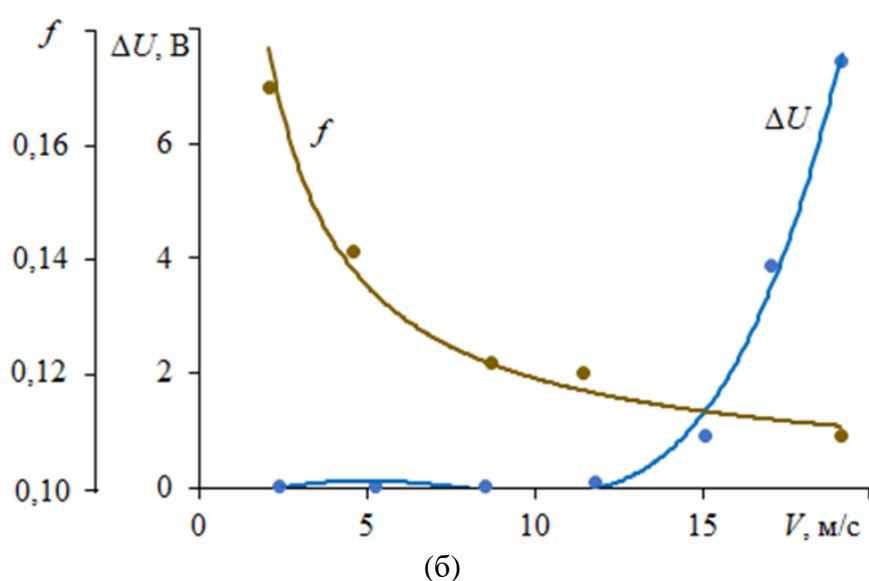
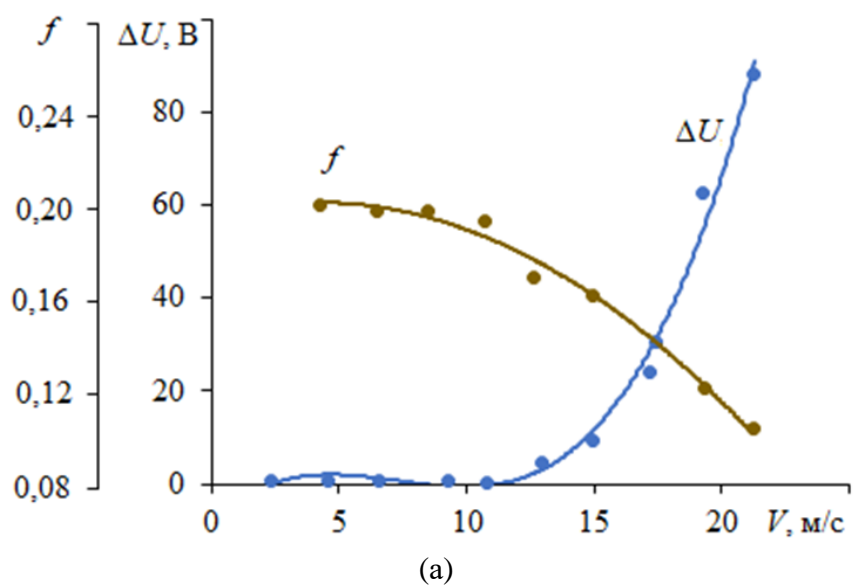


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения f и переходного падения напряжения ΔU от скорости скольжения щетки по коллектору: плотность тока 10 кА/м^2 , контактное давление 30 кПа (а); плотность тока 50 кА/м^2 , контактное давление 50 кПа (б)

Результаты сравнительных испытаний электрощеточных материалов

t, ч	BT5				МГМ1				МГ16				МГ21			
	f	ΔU , В	$I_h, 10^{-9}$		f	ΔU , В	$I_h, 10^{-9}$		f	ΔU , В	$I_h, 10^{-9}$		f	ΔU , В	$I_h, 10^{-9}$	
			Щ	К			Щ	К			Щ	К			Щ	К
0	0,19	25			0,17	11			0,20	31			0,18	21		
2	0,18	42			0,16	11			0,21	47			0,19	35		
5	0,15	83			0,14	21			0,24	75			0,21	42		
10	0,12	108	1,8	0,02 0,05	0,11	32	4.1	0,12	0,28	110	0,45	0,21	0,24	61	1,1	0,16

Примечание. t – время работы щеточно-коллекторного узла; f – коэффициент трения; ΔU – переходное падение напряжения; I_h – линейная интенсивность изнашивания: $I_h = h/Vt$, где h – линейный износ; Щ – щетки; К – коллектор.

Как видно из таблицы, величина падения напряжения во всех случаях является значительной и выражается десятками вольт. Это объясняется малой нагрузкой на щетки и, очевидно, биением коллектора. Работа щеток сопровождается повышенным искрением. В меньшей степени это характерно для щеток из материала МГМ1. Работа щеток из материала BT5 сопровождалась большим искрением и плохой коммутацией. После 10 ч работы меньший износ коллектора наблюдался при работе со щетками из материала МГ 16. Щетки из материала BT5 и особенно из МГМ1 имели наибольший износ. Под щетками из материала BT5 коллектор изнашивался ступенчато: под электрографитом 0,015 мм, а под столбиками из дисульфида молибдена эрозионный износ коллектора составил 0,042 мм (см. таблицу). На основе сравнения представленных в таблице результатов экспериментов лучшей совокупностью фрикционных и коммутационных характеристик обладает контактный узел со щетками из материала МГМ1.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мышкин Н.К., Кончиц В.В., Браунович М. Электрические контакты. Долгопрудный: Интеллект. 2008. 560 с.
2. Braunovic M., Konchits V.V., Myshkin N.K. Electrical contacts: Fundamentals, Applications and Technology. CRC Press. 2007. 646 p.
3. Electrical Contacts: Principles and Applications. Ed. by P.G. Slade. CRC Press. 2014. 1210 p.
4. Забоин В.Н. Научно-методологические основы расчета и проектирования систем токосъема электрических машин. Дисс. ... д-ра техн. наук. Санкт-Петербург. 2003. 32 с.
5. Никулин С.В. Улучшение свойств щеточного контакта электрических машин. Дисс. ... канд. техн. наук. Воронеж. 2008. 18 с.

Для цитирования: Гусев А.Ф., Измайлов В.В., Новоселова М.В. Экспериментальная установка для исследования скользящего контакта «щетка – коллектор» при высоких температурах // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2022. № 1 (13). С. 14–21.

EXPERIMENTAL SETUP FOR STUDYING SLIDING BRUSH-COLLECTOR CONTACT AT HIGH TEMPERATURES

A.F. GUSEV, Cand. Sc., V.V. IZMAILOV, Dr. Sc.,
M.V. NOVOSELOVA, Cand. Sc.

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: iz2v2@mail.ru

The description of the design of the installation for studying the frictional and electrical characteristics of the brush-collector unit of electric motors at ambient temperatures up to 200 °C is given. The installation enables dynamic measurement of the collector rotation speed, normal contact load, friction force, current through the contact, transient voltage drops, temperature in the heat-chamber. The characteristic of wear resistance is the linear wear rate determined after testing. To illustrate the capabilities of the installation, the results of comparative tests of four electric brush materials are given. The results showed that the best combination of operational characteristics is possessed by a material with a composition of 40 % – copper; 20 % – graphite; 40 % – molybdenum disulfide.

Keywords: brush, collector, friction, wear, electrical resistance, high temperatures, materials.

REFERENCES

1. Myshkin N.K., Konchits V.V., Braunovich M. Elektricheskiye kontakty [Electrical contacts]. Dolgoprudnyy: Intellect. 2008. 560 p.
2. Braunovic M., Konchits V.V., Myshkin N.K. Electrical contacts: Fundamentals, Applications and Technology. CRC Press. 2007. 646 p.
3. Electrical Contacts: Principles and Applications. Ed. by P.G. Slade. CRC Press. 2014. 1210 p.
4. Zaboyn V.N. Scientific-methodological foundations of calculation and design of current collection systems for electrical machines: abstract of thesis. Dr. Diss. (Engineering). St. Petersburg. 2003. 316 p. (In Russian).
5. Nikulin S.V. Improvement of the properties of the brush contact of electric machines: abstract of thesis. Cand. Diss. (Engineering). Voronezh. 2008. 191 p. (In Russian).

Поступила в редакцию/received: 08.12.2021; после рецензирования/revised: 15.12.2021;
принята/accepted: 27.12.2021