

Научная статья  
УДК 629.7.02  
DOI: [10.34759/trd-2022-127-04](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-04)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА СЪЕЗД ПЛАНЕТОХОДА ПО ТРАПАМ ПОСАДОЧНОГО МОДУЛЯ

Вячеслав Алексеевич Богачев<sup>1</sup>, Юрий Александрович Петров<sup>2</sup>,

Антон Сергеевич Берников<sup>3</sup>, Даниил Владимирович Сергеев<sup>4</sup> ✉

<sup>1,2,3,4</sup>Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина»,

Химки, Московская область, Россия

<sup>4</sup>[sergeevdv@laspacespace.ru](mailto:sergeevdv@laspacespace.ru) ✉

**Аннотация.** В статье представлены результаты натуральных экспериментальных исследований влияния различных факторов на съезд планетохода на поверхности планет и их спутников. Рассмотрены типовые характеристики поверхности посадки: склон, несущая способность грунта, наличие камней. Предложены материалы рабочей поверхности трапов, обеспечивающих расчетные коэффициенты сцепления с колесом планетохода. Приведена методика проведения испытаний по определению коэффициента сцепления колеса планетохода. Выработаны рекомендации в части конструкционного исполнения амортизаторов посадочного устройства и фиксации трапов в рабочем положении.

**Ключевые слова:** луноход, съезд планетохода, шасси планетохода, коэффициент сцепления, грунтозацепы колеса, рыхлый грунт

*Для цитирования:* Богачев В.А., Петров Ю.А., Берников А.С., Сергеев Д.В.  
Исследование влияния различных факторов на съезд планетохода по трапам // Труды  
МАИ. 2022. № 127. DOI: [10.34759/trd-2022-127-04](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-04)

Original article

## **INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF VARIOUS FACTORS ON THE DESCENT OF THE PLANETOID ALONG THE LADDERS OF THE LANDER**

**Vyacheslav A. Bogachev<sup>1</sup>, Yuri A. Petrov<sup>2</sup>,**

**Anton S. Berdnikov<sup>3</sup>, Daniil V. Sergeev<sup>4</sup>✉**

<sup>1,2,3,4</sup>Lavochkin Association,

Khimki, Moscow region, Russia

<sup>4</sup>[sergeevdv@laspacespace.ru](mailto:sergeevdv@laspacespace.ru)✉

**Abstract.** To ensure a reliable exit of the vehicle along the ladders to the surface of the planets and their satellites, it is necessary to account for the effect of a large number of various factors, such as:

- the angular position of the landing vehicle;
- the coefficients of adhesion between the wheels of the chassis and the working surface of the ladders;
- the vehicle landing on the loose soil,
- the presence of stones in the landing area,

- ensuring guaranteed clearances between the planetary rover and structural elements landing unit and other structural factors.

The undercarriage of the planetoid, as a rule, consists of six or eight driving wheels and an elastic suspension. An electromechanical drive is installed in the hub of each wheel, ensuring thereby high cross-country ability and high reliability.

One of the main problems consists in the reliable exit ensuring along the ladders to the surface of the planet (satellite). For this purpose, experimental selection of materials being installed on ladders that ensure a reliable grip without slipping with the wheels of the planetoid is necessary.

To confirm the lunar rover guaranteed exit, The model allowed reproducing angular position of the landing unit supports, ladders and slope. A decision was taken on what shock absorbers should be “shot-off” to reduce clearance and thereby align the position of the vehicle on the landing surface. After that, the ladders, along which the lunar rover successfully moved to the Moon surface the were opened. Thus, when designing a landing unit for a spacecraft with a planet rover, it is necessary to envisage pyrotechnics in the design of shock absorbers that can be employed to improve the planet rover exiting conditions along the ramps. Shock absorbers with pyro nodes may also be employed in case of the ground-intake device and other mechanisms presence onboard the vehicle.

Tests on the material selection and the determination of the coefficient of adhesion were conducted with the technological wheel of the planetoid and fragments of ladders, on the working surface of which different materials were placed. With this purpose, testing programs and methods were developed, and a test bench, which ensured computed loadings and temperatures, was fabricated.

To analyze the planetoid descent along the ladders on the loose soil, the ladder was tested at its interaction with loose soil. During the tests, the ladder and rested on the soil-analogue placed in a container. The top layer of the soil represented a loose finely dispersed soil, which is being characterized by low adhesion and rather high internal friction with low load-bearing capacity and high compressibility.

If the vehicle lands on rock outcrops or there is a hard surface, such as a stone, under the end of the ladder, then the ladder lateral movement will be much greater than this in the case of a loose soil. With the landing stage roll and heavy loads on one side, the movement of the ladder ends may be significant and the vehicle might leave the track, which will lead to an accident.

As the result of the analysis of the planet rover exit along the ladders, the gaps between the wheel of the planetoid chassis and the structural elements of the landing unit were determined for the case of the landing platform roll in a plane perpendicular to the installation of the ladders at an angle of  $20^\circ$ .

The tolerances for the installation of ladders on the platform, backlash in the nodes of rotation of the ladder links, as well as the rigidity characteristics of the ladder (power beam and railing) were accounted for herewith.

The article presents the results of the full-scale experimental studies of the various factors impact on the of a planet rover exit on the surface of planets and their satellites. As the result of the tests, the coupling coefficients were determined at different temperatures and loads between the fragments of the ladder layout made of various materials and the wheel.

The article considers typical characteristics of the touchdown surface, such as slope, the soil bearing capacity and the presence of stones, and proposes the ladder working surface materials ensuring calculated coefficients of adhesion to the planet rover wheel. The technique for conducting tests on determining the coefficient of adhesion of the planet rover wheel is presented.

Recommendations with regard to the structural design of the landing gear shock absorbers and the ladders fixing in the working position have been elaborated.

**Keywords:** lunokhod, planetoid exit, planetoid chassis, coupling coefficient, wheel hooks, loose soil

**For citation:** Bogachev V.A., Petrov Yu.A., Berdnikov A.S., Sergeev D.V. Investigation of the influence of various factors on the descent of the planetoid along the ladders of the lander. *Trudy MAI*, 2022, no. 127. DOI: [10.34759/trd-2022-127-04](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-04)

## **Введение**

Для обеспечения надежного съезда транспортного средства по трапам на поверхность планет и их спутников необходимо учитывать влияние большого количества различных факторов, таких как: угловое положение посадочного аппарата, коэффициенты сцепления между колесами шасси и рабочей поверхностью трапов, посадка аппарата на рыхлый грунт, наличие камней в районе посадки, обеспечение гарантированных зазоров между планетоходом и элементами конструкции посадочного аппарата (ПА) и другие конструктивные факторы [1,2].

Поскольку планетоходы изготавливаются как единичные экземпляры, они должны обладать высокой надежностью шасси. Ходовая часть может быть выполнена с колесным движителем, либо колесно-шагающим движителем, например, на основе «I» - образного механизма П.Л. Чебышева [3,4]. В любом из рассматриваемых вариантов все колеса имеют свой двигатель. Для повышения тягово-цепных характеристик на колесах выполнены грунтозацепы [5,6].

Важной характеристикой для надежного съезда планетохода по трапам является коэффициент сцепления между колесом планетохода и рабочей поверхностью трапа, исключающий проскальзывание при движении планетохода.

Для передвижения планетохода на значительные расстояния по поверхности планеты или спутника имеющих разную несущую способность грунта и достаточно сложный рельеф: уклоны, россыпи камней и т.д., ходовая часть планетохода должна обладать высокой надежностью.

Ходовая часть планетохода, как правило, состоит из шести или восьми ведущих колес и упругой подвески. В ступице каждого колеса установлен электромеханический привод, тем самым обеспечивается высокая проходимость и высокая надежность [7,8].

Кроме того, для высокой проходимости и снижения нагрузок при движении планетохода, колеса выполнены с внутренним подрессориванием. По периметру колеса на ободке установлены сетка и грунтозацепы, также повышающие проходимость при движении по рыхлому грунту и по трапам [9].

Одной из основных проблем является обеспечение надежного съезда по трапам на поверхность планеты (спутника). Для этой цели необходимо опытным путем

подобрать материалы, устанавливаемые на трапах обеспечивающие надежное сцепление без проскальзывания с колесами планетохода

### **Особенности конструкции посадочных устройств, влияющие на съезд планетохода**

Аппарат при посадке является неуправляемым и первоначальный контакт с поверхностью посадки может происходить одной, двумя, или всеми опорами посадочного устройства (ПУ) [10]. При этом вектор горизонтальной скорости аппарата может быть направлен как вниз, так и вверх по склону, а вертикальная ось аппарата может быть отклонена от гравитационной вертикали [11, 12]. В результате неодинаковой амортизации опор, аппарат может занимать разное угловое положение относительно поверхности посадки. На рисунке 1 показан аппарат «Луна 17» с луноходом перед посадкой на поверхность Луны. Аппарат произвел посадку на склон с уклоном  $15^\circ$  с разной деформацией энергопоглотителей, установленных в амортизаторах ПУ. В результате аппарат имел большой крен и съезд лунохода по трапам был проблематичен.

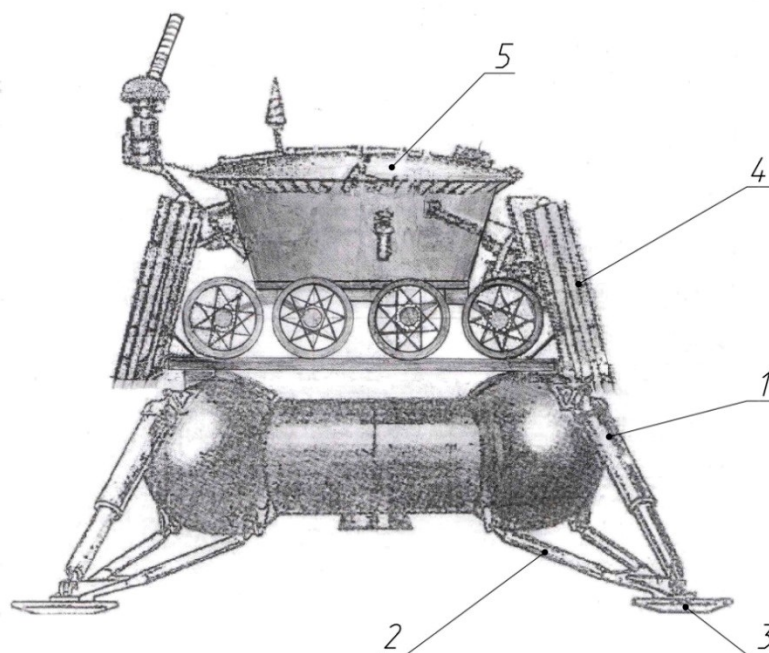


Рис. 1. Автоматическая станция «Луна 17»: 1 – амортизатор, 2 – подкос, 3 – пята, 4 – трапы, 5 – луноход

Для съезда на поверхность Луны лунохода (планетного самоходного транспортного средства для исследования значительных по протяженности районов Луны) использовались выносные двухзвенные трапы.

В случае неблагоприятной посадки для улучшения условий съезда лунохода в амортизаторах были установлены пироузлы, с помощью которых можно снять связь между энергопоглотителем и штоком амортизатора. В результате при срабатывании пироузла (отстреле амортизатора), шток беспрепятственно перемещается в корпусе амортизатора до упора, при этом длина амортизатора уменьшается, и разница с другими амортизаторами также снижается.

Для получения информации о работе амортизаторов на каждой опоре ПУ были установлены датчики углового положения МУ50, с помощью которых можно определить величину обжатия амортизаторов и построить угловое положение



аппарата после амортизации. В узлах вращения трапов были также установлены датчики углового положения.

Для наглядности была разработана и изготовлена механическая регулируемая модель (рисунок 2), с помощью которой были воспроизведены угловое положение опор ПУ аппарата, трапов и склона и было принято решение какие амортизаторы необходимо «отстрелить», чтобы понизить клиренс и тем самым выровнять положение аппарата на поверхности посадки. После чего были раскрыты трапы, по которым луноход успешно съехал на поверхность Луны. Таким образом при проектировании ПУ для космического аппарата (КА) с планетоходом, необходимо в конструкции амортизаторов предусмотреть пироузлы, которые могут быть использованы для улучшения условий съезда по трапам планетохода. Амортизаторы с пироузлами могут также использоваться при наличии на аппарате грунтозаборного устройства и других механизмов.

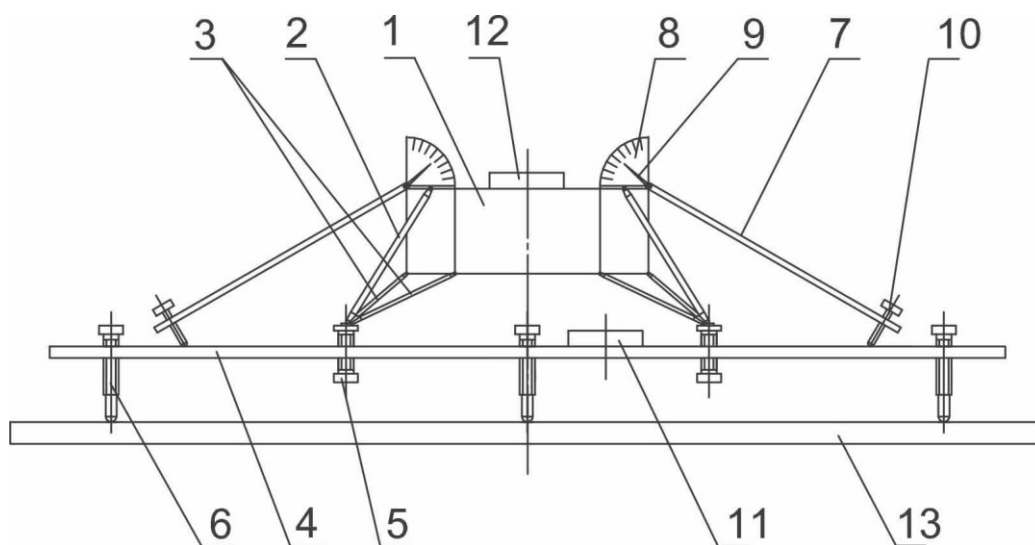


Рис. 2. Модель посадки аппарата: 1 – макет ПА, 2 – амортизатор ПУ, 3 - подкосы ПУ, 4 – площадка контакта (ПК), 5 – регулируемая опора ПУ, 6 – регулируемая опора ПК, 7 – трап, 8 – шкала, 9 – стрелка, 10 – винт, 11 – прибор для измерения углового положения ПК, 12 – прибор для измерения углового положения ПА, 13 – основание.

### Определение коэффициента сцепления между колесом и трапом

Одним из условий надежного съезда планетохода по трапам является обеспечение сцепления колес с трапом, исключающим проскальзывание. Сцепление будет зависеть как от характеристик колеса и его грунтозацепов, так и от материала рабочей поверхности трапа и характеризуются коэффициентом сцепления.

Схема движения планетохода по трапам при съезде на поверхность посадки показана на рисунке 3.

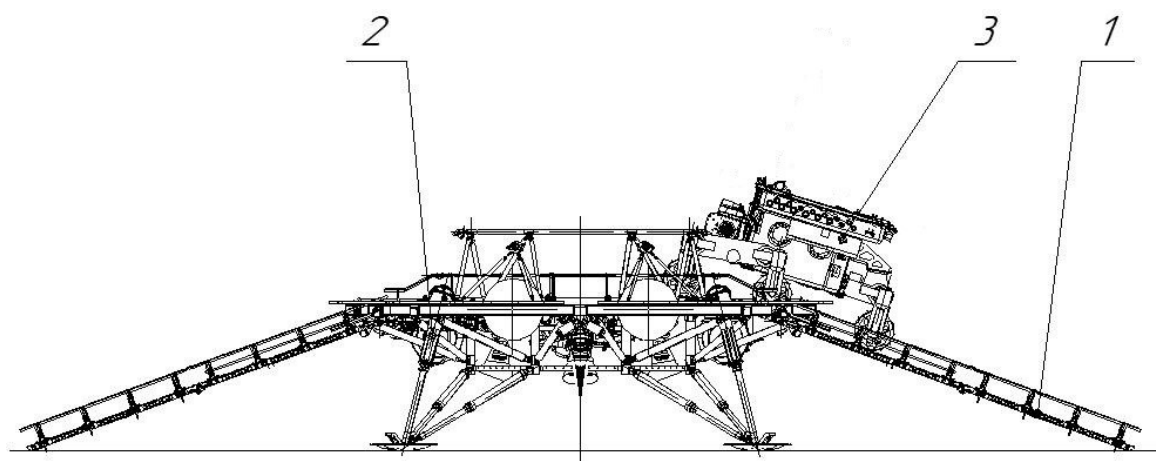


Рис. 3. Схема движения планетохода по трапам:

1 – трап, 2 – посадочный аппарат, 3 – планетоход

В результате решения задачи динамики схода планетохода по трапам, определены возможные безопасные виды его движения. Управление движением

планетохода может осуществляться дистанционно или в автоматическом режиме с помощью блока автоматики шасси. По показаниям датчиков определяются виртуальные режимы движения, определяется оптимальный вариант движения и осуществляется логика управлением движением.

Закон движения планетохода по трапам со сходом на грунт будет зависеть от углового положения ПА и трапов относительно поверхности посадки, которое фиксируется с помощью датчиков углового положения, от упруго-инерционных характеристик транспортного средства, а также от жесткостных характеристик трапов. По результатам расчетов определяется скорость перемещения планетохода и коэффициент сцепления. Как правило, скорость движения по трапам небольшая и составляет 0,005м/с, а коэффициент сцепления находится в диапазоне 0,6-0,8.

Зная массу планетохода, количество ведущих колес и их диаметр, а также угол наклона трапов и подрессоренные свойства колеса, можно найти силу тяги транспортного средства.

Баланс мощности МХ при движении с постоянной скоростью определяется по формуле:

$$kM_k w_k + G \sin \alpha V = kM_f w_k + TV, \quad (1)$$

где:  $M_k$  – крутящий момент колеса с учетом КПД трансмиссии,  $w_k$  – угловая скорость колеса,  $G$  – вес планетохода на планете,  $\alpha$  – угол наклона трапов,  $V$  – скорость движения планетохода,  $T$  – сила тяги,  $M_f = frR_z$  – момент сопротивления качению колеса за счет его деформации,  $R_z$  – нормальная реакция,  $r$  – радиус колеса,  $f$  – коэффициент сопротивления качению,  $k$  – количество ведущих колес.

Из равенства  $T = \varphi G \cos \alpha$  определяем расчетный коэффициент сцепления  $\varphi$ .

При проведении экспериментальных исследований по определению коэффициента сцепления колеса планетохода с материалом рабочей поверхности трапа необходимо учитывать конструктивные особенности трапа, нагрузки на колеса, диапазон температур окружающей среды и другие факторы.

Для предохранения от сваливания планетохода с трапов, в случае посадки аппарата на склон или ровную поверхность с креном аппарата, на боковой поверхности трапов имеются перила, при этом планетоход за счет составляющей силы тяжести может перемещаться до контакта ступицы колес с перилами.

Таким образом, исследуемый материал будет испытывать деформацию в двух направлениях: вдоль и поперек грунтозацепа.

При проведении испытаний учитывался температурный диапазон для планетохода и трапов как на участке перелета, так и после посадки аппарата на поверхность небесного тела.

Испытания по выбору материала и определению коэффициента сцепления проводились с технологическим колесом планетохода и фрагментами трапов, на рабочей поверхности которых были установлены разные материалы.

С этой целью были разработаны программы и методика проведения испытаний, изготовлен стенд, обеспечивающий расчетные нагрузки и температуры.

Испытания по определению коэффициента сцепления проводились на приспособлении, обеспечивающем требуемые нагрузки и температурный диапазон (рисунок 4).

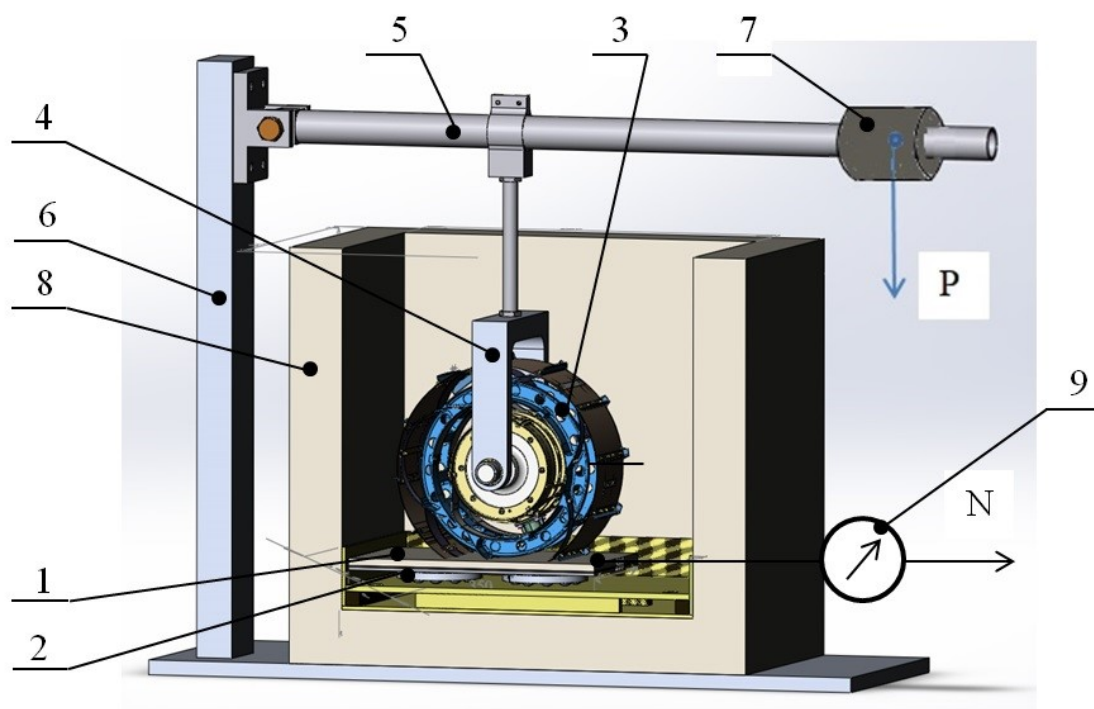


Рис. 4. Приспособление с температурной камерой:

- 1 – испытуемый образец, 2 – подвижная доска, 3 – колесо, 4 – вилка,  
5 – рычаг, 6 т- стойка, 7 – груз, 8 – камера, 9 – тензодинамометр.

Температурная камера представляет собой емкость замкнутого объема из пенопласта, на дне которой располагается жесткий столик из теплоизоляционного материала – стеклотекстолита. На столике устанавливается подвижная доска на подшипниках, на которой закрепляется испытуемый образец. Для создания отрицательных температур на образцах использовался сосуд Дьюара, осуществлялась подача жидкого азота в камеру из пенопласта. Температура на образцах выдерживалась при заданной температуре не менее 10 минут. Для регистрации исследуемых параметров и их обработки использовалась операторская станция МІС-200 [13].

Температурная камера оснащена прибором измерения температуры с датчиками температуры, расположенными на столике, колесе и образце. Измерение

усилия перемещения фрагмента трапа с колесом проводилось с помощью тензорезисторного датчика, встроенного в механизм перемещения с использованием измерительно вычислительного комплекса.

Фрагменты трапа представляют собой прикрепленные металлические и неметаллические материалы на подложку из магниевого сплава толщиной не менее 3 мм, а также пластины из различных материалов (таблица 1).

Таблица 1

Количество и тип образцов, условия для проведения испытаний по определению коэффициента сцепления между колесом и трапом

№ п/п	Наименование материала	Размер образцов, мм (Д×Ш×В)	Температура испытания, °С	Угол положения колеса, град	Прикладываемая нагрузка на колесо, Н (кгс)	Кол-во образцов, шт.
1.	Образец из пенопласта марки ПС-1-200, наклеенного на пластину из магния МА2-1 (Рисунок 1)	Размер пенопласта: 300×20×10 Размер пластины: 300×200×3	плюс 20*	0	392 (40) 196 (20)	72
				+15		
				-15		
			минус 20	0		
				+15		
				-15		
			минус 50	0		
				+15		
				-15		
			минус 70	0		
				+15		
				-15		
2.		300×200×3	плюс 20	0		6
				+15		

	Образец из сплава АМг-6 (пластина)		минус 70	-15		
				0		
				+15		
				-15		
3.	Образец из углепластика КМУ-4л (пластина)	300×200×3	плюс 20	0		
				+15		
				-15		
			минус 70	0		
				+15		
				-15		
4.	Образец из магния МА2-1 (пластина)	300×200×3	плюс 20	0		
				+15		
				-15		
			минус 70	0		
				+15		
				-15		

На рисунке 5 показано колесо планетохода. При испытаниях использовался технологический образец колеса. По периметру колеса равномерно расположены грунтозацепы. Обод колеса может быть выполнен из нержавеющей стали или титанового сплава, зацепы колеса – из алюминиевого сплава. Выбор материалов для колеса обусловлен не только требованием обеспечения коэффициента сцепления и обеспечения высокой проходимости при движении по разным грунтам, но и требования обеспечения температурного режима планетохода и другие требования.

Например, с целью возможности измерения магнитного поля Луны на луноходе обод и сетка колес, а также торсионы выполнены из титанового сплава. Таким образом, при проведении испытаний по выбору материала для трапа необходимо учитывать характеристики колес.

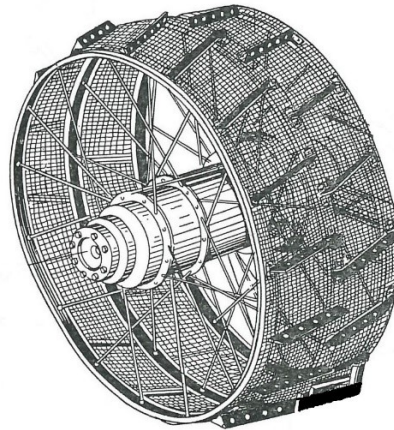


Рис. 5. Колесо планетохода.

Коэффициент сцепления  $\varphi$  определялся как отношение усилия перемещения к нагрузке на колесо:

$$\varphi = F/P, \quad (2)$$

где  $F$  – усилие перемещения,  $P$  – нагрузка.

В качестве альтернативного варианта на фрагментах трапов могут быть установлены ребра, либо материалы с рифлением и другие материалы.

Результаты испытаний показали высокий коэффициент сцепления колеса с материалом из АМГ6 с шахматным рифлением ( $\varphi > 0,8$ ) и стабильные характеристики в диапазоне нагрузок от 200 до 400 Н и температурах от плюс 20 до минус 120 °С. При выборе материала рабочей поверхности трапов для контактного взаимодействия с грунтозацепами колеса, необходимо учитывать условия эксплуатации. Например, пенопласт обеспечивает высокий коэффициент сцепления, однако он склонен к выкрашиванию при взаимодействии с грунтозацепами и не обладает стабильными характеристиками при длительном воздействии вакуума, радиации и термоциклирования. Однако, следует отметить, что для Луноходов -1,2



использовался пенопласт, поскольку они не подвержены длительному воздействию факторов космического пространства.

При посадке КА с работающей тормозной двигательной установкой поднимается рыхлый слой грунта, который затем оседает на конструкцию аппарата, в том числе на трапы и шасси планетохода. Съезд планетохода по трапам возможен по истечении нескольких суток после посадки аппарата. Это обстоятельство также было учтено при проведении испытаний. На рабочую поверхность трапов насыпали аглопоритовый песок толщиной 5мм и проводили испытания по определению коэффициента сцепления при наличии песка на разных материалах трапа.

По результатам испытаний по определению коэффициента сцепления при различных температурах и нагрузках между фрагментами макета трапа, выполненными из различных материалов, и колесом можно сделать следующие выводы:

1. Наибольший коэффициент сцепления у пенопласта ПС1-200 (от 0,8 до 1) и у сетки (~ 1).

2. Коэффициент сцепления  $\phi$  колеса с различными материалами:

- сплав МА2-1 – от 0,4 до 0,6;

- углепластик КМУ4 – от 0,4 до 0,6;

- сплава АМг6 – от 0,5 до 0,9;

- сплав АМг6 с «шахматным рифлением» - от 0,7 до 1,0;

Важной характеристикой трапа является его изгибная жесткость в плоскости движения колес планетохода и его жесткость в боковом направлении.

При недостаточной жесткости трапа возникает большой прогиб, в результате часть колес планетохода не контактирует с рабочей поверхностью трапа и значительно ухудшаются условия его схода. Из решения динамики схода планетохода, имеющего оригинальное шасси, определяется максимально допустимый прогиб трапа, и из расчета на прочность определяется строительная высота трапа и его изгибная жесткость. Как правило, сечение трапа выполнено в виде кессона.

### **Сход планетохода по трапам на рыхлый грунт**

Как уже было сказано ранее, при проектировании ПУ и трапов рассматриваются несколько вероятностных моделей поверхности посадки и грунта. Рельеф поверхности посадки характеризуется уклонами, наличием лунок, распределением камней и выходами скальных пород. Грунты отличаются прежде всего плотностью и несущей способностью, а при посадке на рыхлый грунт – изменением несущей способности по глубине.

Для оценки контактного взаимодействия трапа с рыхлым грунтом поверхности посадки, необходимо знать изменение его несущей способности по глубине.

Из механики грунтов известно, что осадка грунта зависит от нагрузки, площади основания и степени сжимаемости грунта [14].

Грунты для районов посадки на Луну КА «Луна-16» и «Сервейер», исследованы достаточно подробно [15]. Планеты и их спутники изучены пока ещё недостаточно, чтобы можно было дать достоверно и однозначно характеристику грунта в районе посадки. Кроме того, система навигации не может обеспечить ориентированную

посадку КА в заданном районе с высокой точностью. Поэтому при проектировании трапов и проведения их экспериментальной отработки рассматриваются несколько моделей рельефа поверхности посадки и прочности грунта.

Вместе с тем, полученные с помощью КА результаты исследования характеристик поверхностного слоя планет свидетельствуют о том, что, несмотря на существенные их различия, связанные со своеобразием геологического развития планет, атмосферными условиями, силой тяжести, расстоянием от Солнца и прочих характеристик, они имеют много общего, особенно в отношении рельефа и свойств грунта. Поверхности Луны, Фобоса, Марса, Меркурия покрыты рыхлым реголитом. Толщина слоя реголита для них составляет от 0,02 м в горных районах до 1 м и более в морских районах. Несущая способность поверхностного слоя составляет от 1 до 5 кПа для рыхлого грунта, несущая способность скальных пород - от 1 МПа и более [16]. При посадке по глубине погружения опор ПУ в грунт изучались механические свойства лунного реголита. Реголит возникает в результате дробления, перемешивания и спекания лунных пород при падении метеоритов и вследствие воздействия солнечного ветра. Основой реголита является базальт с содержанием железа и других элементов. Грунты безатмосферных планет и спутников, например, Меркурия, Фобоса и астероидов также, как и грунт Луны, представляют собой реголиты.

Для анализа схода планетохода по трапам на рыхлый грунт проводились испытания трапа при его взаимодействии с рыхлым грунтом. Процесс контактного взаимодействия трапа с рыхлым грунтом носит сложный характер.

При проведении испытаний конец трапа опирался на грунт-аналог размещенный в контейнере (рисунок 6). Верхний слой грунта представлял собой рыхлый мелкодисперсный грунт, который характеризуется малым сцеплением и довольно высоким внутренним трением с малой несущей способностью и высокой сжимаемостью [17-19].

По мере приложения расчетной нагрузки на трап: 360 Н, 97 Н и 163 Н (в качестве нагрузки использовались мешки с песком) в точках контакта колес планетохода с трапом, конец трапа погружался в грунт, уплотняя его, при этом несущая способность увеличивалась с глубиной. Например, для трапа длиной 3 м и шириной 140 мм, расположенного под углом  $20^\circ$ , максимальная глубина вдавливания конца трапа в грунт составила 30 мм при нагрузке приведенной к концу трапа равной 500 Н.

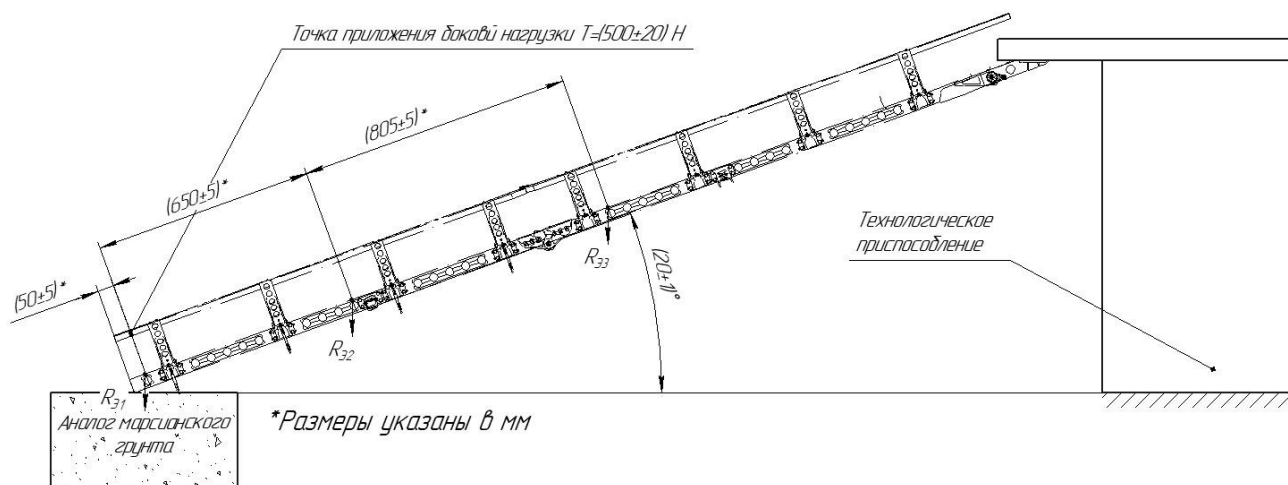


Рис. 6. Схема испытаний трапа на его погружение в рыхлом грунте.

При недостаточной жесткости трапов в боковом направлении, может существенно измениться база между левым и правым бортом трапов, которая не будет соответствовать колее планетохода.

При проведении испытаний по определению бокового перемещения балки трапа, конец трапа опирались на грунт-аналог, размещенный в контейнере (рисунок 7). Для перемещения трапа в боковом направлении нагрузку 500 Н прикладывали к перилам трапа (рисунок 7) дискретно, используя тандер, усилие фиксировали динамометром, перемещение измеряли с помощью триангуляционного датчика. Перемещение балки в грунте составило 19,5 мм, что допустимо для обеспечения съезда.



Рис. 7. Схема испытаний трапа на боковое перемещение в рыхлом грунте.

Зная момент инерции сечения балки трапа  $I$  и его изгибную жесткость  $EI$ , а также координаты приложения нагрузки, можно найти прогиб конца балки при изгибе в среде грунта. Например, при  $I=173\text{см}^4$  и  $EI=72\cdot 10^6 \text{ кгс}\cdot\text{см}^2$  и координатах приложения нагрузки:  $l=2600\text{мм}$ ,  $a=120\text{мм}$  прогиб конца балки составил  $f=19,5\text{мм}$  [20].

Используя уравнение:

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

найдем силу  $F$  вызывающую этот прогиб. Для рассмотренного примера эта сила составила  $F = 23 \text{ кгс}$ , а усилие сопротивления грунта составило  $27 \text{ кгс}$ . Используя уравнение упругой линии балки:

$$y = \frac{F}{EI} \left( l \frac{z^2}{2} - \frac{z^3}{6} \right), \quad (4)$$

можно найти перемещение балки трапа в зоне критичной по зазорам с элементами конструкции ПА.

Важной характеристикой является также жесткость перил, поскольку при движении планетохода с креном ступицы колес опираются на перила.

По результатам испытаний реальной конструкции перила перемещались относительно балки на  $15,9 \text{ мм}$ , что соответствовало расчетной жесткости.

## Посадка на твердую поверхность

Если аппарат совершает посадку на выходы скальных пород или под концом трапа окажется твердая поверхность, например, камень (рисунок 8), то боковое перемещение трапа будет значительно больше, чем в случае рыхлого грунта.

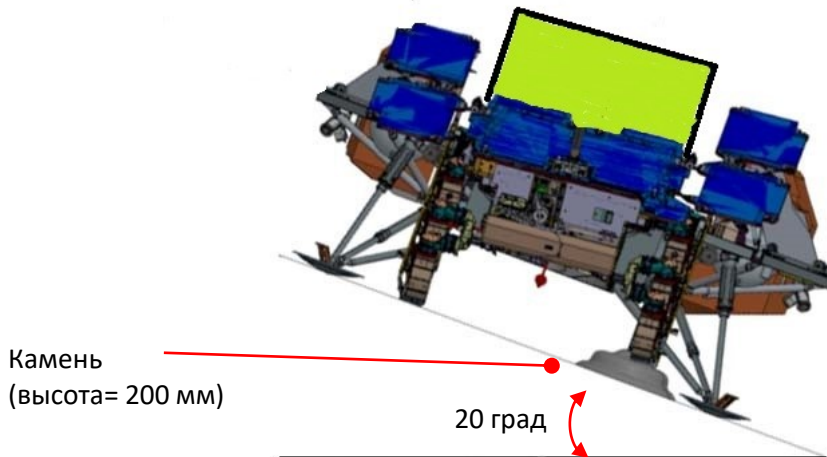


Рис. 8. Случай посадки на склон  $20^\circ$  с камнем под трапом со стороны крена

При крене посадочной ступени и больших нагрузках на один борт перемещение концов трапа может быть значительным и транспортное средство может уйти с колес, что приведет к аварии.

Найдем упругое перемещение конца балки трапа в случае его контакта с камнем. На конец трапа, опирающегося на камень, действует осевая нагрузка  $N = 500$  Н. Как и для случая рыхлого грунта прикладываем к балке трапа боковую нагрузку  $F_{\text{бок}} = 500$  Н. В результате испытаний получили боковое перемещение трапа равное 34 мм. Тот же результат можно получить, если принять, что коэффициент трения при перемещении конца трапа по камню равен  $f_{\text{тр}} = 0,2$ . Тогда нагрузка на

изгиб балки равна  $F_{изг}=F_{бок}-0,2N=400Н$ . Далее из уравнения для прогиба (3) найдено перемещение конца балки, которое составило 34 мм.

Перемещение концов трапа значительное и для обеспечения неизменным расстоянием между трапами, концы трапов могут быть связаны гибкой связью, например, с помощью троса.

Как и в случае рыхлого грунта, используя уравнение упругой линии балки, можно найти перемещение трапа в зоне элемента конструкции ПА критичной с точки зрения зазора.

Этот случай (рисунок 8), является наихудшим с точки зрения зазора между элементами конструкции ПА и внутренней поверхностью планетохода, так как при наличии камня под трапом со стороны крена, зазор между колесом и конструкцией ПА для рассматриваемой геометрии трапа и его жесткости уменьшается на 10 мм

На трапах, как и на опорах ПУ, стоят датчики углового положения. Имея данные по угловому положению левого и правого трапа, принимают решение о направлении съезда планетохода: вперед или назад. Из расчета динамики съезда планетохода угол рассогласования трапов («ножницы»), как правило, должен быть не более  $5^\circ$  и уточняется при проведении ходовых испытаниях планетохода.

В результате анализа съезда планетохода по трапам для случая крена посадочной платформы в плоскости, перпендикулярной установке трапов на угол  $20^\circ$ , были определены зазоры между колесом шасси планетохода и элементами конструкции ПА.

Рассматривались два варианта контактного взаимодействия трапа с поверхностью посадки: рыхлый грунт, камень.



При этом учитывались допуски на установку трапов на платформе, люфты в узлах вращения звеньев трапа, а также жесткостные характеристики трапа (силовой балки и перил).

### **Заключение**

В статье рассмотрена задача обеспечения надежного съезда планетохода по трапам на поверхность планеты. Отмечается, что для ее решения необходимо провести исследование влияние разных факторов: углового положения посадочного аппарата, коэффициентов сцепления между колесами шасси и рабочей поверхностью трапов, посадки аппарата на рыхлый грунт, наличия камней в районе посадки, обеспечения гарантированных зазоров между планетоходом и элементами конструкции ПА и других конструктивных факторы.

В статье представлены результаты натуральных экспериментальных исследований влияния различных факторов на съезд планетохода на поверхности планет и их спутников. В результате испытаний определены коэффициенты сцепления при различных температурах и нагрузках между фрагментами макета трапа, выполненными из различных материалов, и колесом. Рассмотрены типовые характеристики поверхности посадки: склон, несущая способность грунта, наличие камней. Предложены материалы рабочей поверхности трапов, обеспечивающих расчетные коэффициенты сцепления с колесом планетохода. Приведена методика проведения испытаний по определению коэффициента сцепления колеса планетохода.

Выработаны рекомендации в части конструкционного исполнения амортизаторов посадочного устройства и фиксации трапов в рабочем положении.

### **Список источников**

1. Баженов В.И., Осин М.С. Посадка космических аппаратов на планеты. - М.: Машиностроение, 1978. – 159 с.
2. Маленков М.И., Довгань В.Г. Творческий вклад А.Л. Кемурджиана в формирование отечественной школы разработчиков планетоходов // Материалы XXIX Общественно-научных чтений, посвящённых памяти Ю.А. Гагарина. - Гагарин, 2003. Ч.2. - 308 с.
3. Чебышёв П.Л. Теория механизмов, известных под названием паралелограммов. – Москва-Ленинград: Изд-во АН СССР, 1949. – 80 с.
4. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин. - М.: Наука, 1988. – 640 с.
5. Агейкин Я.С. Вездеходные колесные и комбинированные движители. - М.: Машиностроение, 1972. - 184 с.
6. Анисов К.С., Мастаков В.И., Иванов О.Г. и др. Устройство и работа станции «Луна-17» и Лунохода -1. Передвижная лаборатория на Луне Луноход-1. - М.: Наука, 1971. Т. 1. – 128 с.
7. Кемурджиан А.Л. Планетоходы. - М.: Машиностроение, 1993. - 400 с.
8. Крайнов А.М., Воронцов В.А. Результаты формирования схемно-технических решений перспективного космического аппарата для доставки и функционирования лунохода // Труды МАИ. 2015. № 82. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=58632>

9. Кемурджиан А.Л. Передвижение по грунтам Луны и планеты. - М.: Машиностроение, 1986. - 267 с.
10. Берников А.С., Петров Ю.А., Сергеев Д.В., Штокал А.О. Амортизация автоматических космических аппаратов при посадке на планеты и их спутники с учетом упругости конструкции посадочного устройства // Труды МАИ. 2021. № 121. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=162657>. DOI: [10.34759/trd-2021-121-10](https://doi.org/10.34759/trd-2021-121-10)
11. Баженов В.И., Осин М.С. Посадка космических аппаратов на планеты. - М.: Машиностроение, 1978. – 159 с.
12. Кемурджиан А.Л., Громов В.В., Черкасов И.И., Шварев В.В. Автоматические станции для изучения поверхностного покрова Луны. - М.: Машиностроение, 1976. – 200 с.
13. МІС-200. Универсальный мобильный многоканальный измерительный комплекс. URL: <http://www.nppmera.ru/mic-200?ysclid=lai8llkiek16694431>
14. Цытович Н.А. Механика грунтов. – М.: Высшая школа, 1973. – 280 с.
15. Черкасов И.И., Шварев В.В. Грунтоведение Луны. - М.: Наука, 1979. – 144 с.
16. Базилевский А.Т., Маленков М.И., Волов В.А. и др. Оценка прочности лунного грунта по глубине колеи колес луноходов // Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы. 2021. Т. 55. № 4. С. 291-315. DOI: [10.31857/S0320930X21040010](https://doi.org/10.31857/S0320930X21040010)
17. Флоренский К.П., Базилевский А.Т., Николаева О.В. Лунный грунт: свойства и аналоги. Модель 1974 г.: монография. – М.: ВИНТИ РАН, 1975. - 71 с.
18. Слюта Е.Н. Физико-механические свойства лунного грунта (обзор) // Астрономический вестник. 2014. Т. 48. № 5. С. 358–382.
19. Викторов С.В., Чесноков В.И. Химия лунного грунта. - М.: Знание, 1978. - 64 с.

20. Яблонский А.А., Никифорова В.М. Курс теоретической механики. - М.: КноРус, 2011. – 603 с.

## References

1. Bazhenov V.I., Osin M.S. *Posadka kosmicheskikh apparatov na planety* (Spacecraft landing on planets), Moscow, Mashinostroenie, 1978, 159 p.
2. Malenkov M.I., Dovgan' V.G. *Materialy XXIX Obshchestvenno-nauchnykh chtenii, posvyashchennykh pamyati Yu.A. Gagarina, Gagarin*, 2003, Ch. 2, 308 p.
3. Chebyshev P.L. *Teoriya mekhanizmov, izvestnykh pod nazvaniem paralelogrammov* (Theory of mechanisms known as parallelograms), Moscow-Leningrad, Izd-vo AN SSSR, 1949, 80 p.
4. Artobolevskii I.I. *Teoriya mekhanizmov i mashin* (Theory of mechanisms and machines), Moscow, Nauka, 1988, 640 p.
5. Ageikin Ya.S. *Vezdekhodnye kolesnye i kombinirovannye dvizhiteli* (All-terrain wheeled and combined propellers), Moscow, Mashinostroenie, 1972, 184 p.
6. Anisov K.S., Mastakov V.I., Ivanov O.G. et al. *Ustroistvo i rabota stantsii «Luna-17» i Lunokhoda -1. Peredvizhnaya laboratoriya na Lune Lunokhod-1* (Design and operation of the Luna-17 station and the Lunokhod -1. Mobile laboratory on the Moon Lunokhod-1), Moscow, Nauka, 1971, vol. 1, 128 p.
7. Kemurdzhian A.L. *Planetokhody* (Planetokhody), Moscow, Mashinostroenie, 1993, 400 p.
8. Krainov A.M., Vorontsov V.A. *Trudy MAI*, 2015, no. 82. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=58632>

9. Kemurdzhian A.L. *Peredvizhenie po gruntam Luny i planet* (Movement on the soils of the Moon and the planet), Moscow, Mashinostroenie, 1986, 267 p.
10. Bernikov A.S., Petrov Yu.A., Sergeev D.V., Shtokal A.O. *Trudy MAI*, 2021, no. 121. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=162657>. DOI: [10.34759/trd-2021-121-10](https://doi.org/10.34759/trd-2021-121-10)
11. Bazhenov V.I., Osin M.S. *Posadka kosmicheskikh apparatov na planet* (Spacecraft landing on planets), Moscow, Mashinostroenie, 1978, 159 p.
12. Kemurdzhian A.L., Gromov V.V., Cherkasov I.I., Shvarev V.V. *Avtomaticheskie stantsii dlya izucheniya poverkhnostnogo pokrova Luny* (Automatic stations for studying the surface cover of the Moon), Moscow, Mashinostroenie, 1976, 200 p.
13. *MIC-200. Universal'nyi mobil'nyi mnogokanal'nyi izmeritel'nyi kompleks*. URL: <http://www.nppmera.ru/mic-200?ysclid=lai8llkiek16694431>
14. Tsytovich N.A. *Mekhanika gruntov* (Mechanics of soils), Moscow, Vysshaya shkola, 1973, 280 p.
15. Cherkasov I.I., Shvarev V.V. *Gruntovedenie Luny* (Soil Science of the Moon), Moscow, Nauka, 1979, 144 p.
16. Bazilevskii A.T., Malenkov M.I., Volov V.A. et al. *Astronomicheskii vestnik. Issledovaniya Solnechnoi sistemy*, 2021, vol. 55, no. 4, pp. 291-315. DOI: [10.31857/S0320930X21040010](https://doi.org/10.31857/S0320930X21040010)
17. Florenskii K.P., Bazilevskii A.T., Nikolaeva O.V. *Lunnyi grunt: svoistva i analogi. Model' 1974* (Lunar soil: properties and analogues: Model 1974), Moscow, VINITI RAN, 1975, 71 p.
18. Slyuta E.N. *Astronomicheskii vestnik*, 2014, vol. 48, no. 5, pp. 358–382.

19. Viktorov S.V., Chesnokov V.I. *Khimiya lunnogo grunta* (Chemistry of lunar soil), Moscow, Znanie, 1978, 64 p.

20. Yablonskii A.A., Nikiforova V.M. *Kurs teoreticheskoi mekhaniki* (Course of theoretical mechanics), Moscow, KnoRus, 2011, 603 p.

Статья поступила в редакцию 14.10.2022

Статья после доработки 16.10.2022

Одобрена после рецензирования 26.10.2022

Принята к публикации 26.12.2022

The article was submitted on 14.10.2022; approved after reviewing on 26.10.2022; accepted for publication on 26.12.2022