

МЕХАНИКА

Научная статья
УДК 531.112.8
DOI: [10.34759/trd-2023-128-01](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-01)

О СКОРОСТИ СБЛИЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ПРИ КОСМИЧЕСКИХ ПЕРЕЛЕТАХ

Игорь Павлович Попов

Курганский государственный университет,
Курган, Россия
ip.popov@yandex.ru

Аннотация. Отмечено, что в классической механике скорость коллинеарного сближения двух объектов неотличима от скорости одного из объектов относительно другого. В релятивистской механике скорость сближения имеет ряд особенностей, в некоторых случаях, препятствующих отождествлению ее с относительной скоростью. Первой особенностью скорости сближения объектов является то, что она может превышать скорость света c , в отличие от любой относительной скорости. Целью работы является установление других особенностей скорости коллинеарного сближения двух объектов. Скорость коллинеарного сближения двух объектов в релятивистской механике является существенно неоднозначной величиной. Если другие механические величины имеют два варианта значений (в собственной системе отсчета и движущейся), то скорость сближения имеет четыре варианта. Это обстоятельство следует учитывать при дальних космических перелетах.

Ключевые слова: скорость сближения, относительная скорость, скорость света, система отсчета, отрезок длины, интервал времени

Для цитирования: Попов И.П. О скорости сближения объектов при космических перелетах // Труды МАИ. 2023. № 128. DOI: [10.34759/trd-2023-128-01](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-01)

MECHANICS

Original article

ON THE SPEED OF APPROACH OF OBJECTS DURING SPACE FLIGHTS

Igor P. Popov

Kurgan State University,

Kurgan, Russia

ip.popow@yandex.ru

Abstract. It is noted that the first feature of the speed of approach of objects is that it can exceed the speed of light c , in contrast to any relative speed. We consider an inertial frame of reference with three recorders located in coordinates $x_0 = 0$, x_1 , x_2 . Recorder clocks are synchronized. At the moment of time t_0 , the registrar located at the coordinate x_0 registers the passage of the first object, and the registrar located at the coordinate x_2 registers the passage of the second object. At the moment of time t_1 , the registrar located in the coordinate x_1 registers the passage of both objects. The speeds of objects are constant. In the reference systems associated with the first and second objects, no measurements are made. To calculate the speed of approach of objects in this situation, the only way of

reasoning is possible, namely: at the moment of time t_0 , the distance from the first object to the second was ${}^0l = x_2 - x_0$; at the moment of time t_1 this distance became equal to zero; so the approach time was ${}^0\tau = t_1 - t_0$; therefore, the speed of approach of objects is equal to the ratio of these quantities. At the Large Hadron Collider, the speed of protons approaching is almost twice the speed of light. The aim of the work is to establish other features of the speed of collinear approach of two objects. The rate of collinear approach of two objects in relativistic mechanics is an essentially ambiguous quantity. The results obtained do not contradict anything, do not refute anything, and are not a paradox.

Keywords: approach speed, relative speed, speed of light, frame of reference, length segment, time interval

For citation: Popov I.P. On the speed of approach of objects during space flights. *Trudy MAI*, 2023, no. 128. DOI: [10.34759/trd-2023-128-01](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-01)

В классической механике скорость коллинеарного сближения двух объектов неотличима от скорости одного из объектов относительно другого [1].

В релятивистской механике скорость сближения имеет ряд особенностей, в некоторых случаях препятствующих отождествлению ее с относительной скоростью.

Первой особенностью скорости сближения объектов является то, что она может превышать скорость света c , в отличие от любой относительной скорости.

Пусть три регистратора расположены в координатах $x_0 = 0$, x_1 , x_2 некой инерциальной системы отсчета (см. рисунок). Часы регистраторов

синхронизированы. В момент времени t_0 регистратор, расположенный в координате x_0 , регистрирует прохождение первого объекта, а регистратор, расположенный в координате x_2 , регистрирует прохождение второго объекта. В момент времени t_1 регистратор, расположенный в координате x_1 , регистрирует прохождение обоих объектов. Скорости объектов постоянны.

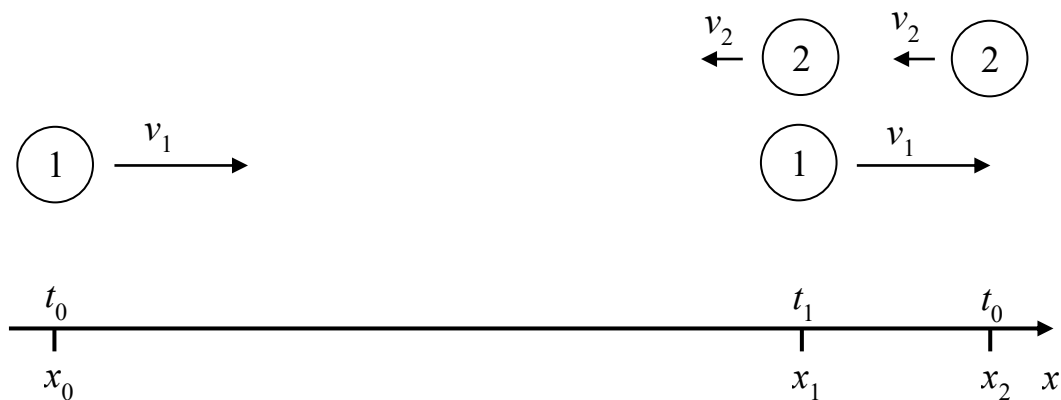


Схема измерительного комплекса

В системах отсчета, связанных с первым и вторым объектами, никакие измерения не производятся.

Для расчета скорости сближения объектов в этой ситуации возможен единственный ход рассуждений, а именно:

1. в момент времени t_0 расстояние от первого объекта до второго составляло

$${}^0l = x_2 - x_0 \quad (1)$$

(индекс « 0 » указывает на систему отсчета, связанную с регистраторами);

2. в момент времени t_1 это расстояние стало равно нулю;

3. поэтому время сближения составило

$${}^0\tau = t_1 - t_0; \quad (2)$$

4. следовательно, скорость сближения объектов равна

$${}^0v_{12} = \frac{x_2 - x_0}{t_1 - t_0} = \frac{x_2}{t_1 - t_0};$$

5. скорость первого объекта –

$$v_1 = \frac{x_1 - x_0}{t_1 - t_0} = \frac{x_1}{t_1 - t_0};$$

6. скорость второго объекта –

$$v_2 = \frac{x_1 - x_2}{t_1 - t_0} (< 0);$$

7. связь между полученными выражениями:

$${}^0v_{12} = \frac{x_2}{t_1 - t_0} = \frac{x_2 - x_1 + x_1}{t_1 - t_0} = \frac{x_2 - x_1}{t_1 - t_0} + \frac{x_1}{t_1 - t_0} = v_1 - v_2. \quad (3)$$

Система отсчета, связанная с регистраторами, движется относительно второго объекта со скоростью

$$V = -v_2. \quad (4)$$

Поэтому (3) приобретает вид:

$${}^0v_{12} = v_1 + V. \quad (5)$$

Пример 1. В Большом адронном коллайдере (БАК) протоны разгоняют до энергии 7 ТэВ [2], что соответствует скорости

$$v_1 = -v_2 = 0,999999991 \text{ с.}$$

В соответствии с (3) и (5) скорость сближения протонов составляет

$${}^0v_{12} = v_1 - v_2 = 1,999999982 \text{ с.}$$

Почти в два раза выше скорости света.

Целью работы является установление других особенностей скорости коллинеарного сближения двух объектов.

Настоящая тематика актуальна для небесной механики [3, 4] межзвездной и межпланетной космонавтики [5–10].

Методика

Два объекта, движущихся навстречу друг другу без ускорений, рассматриваются в Σ . Эти условия позволяют определять скорость их сближения в *любой инерциальной системе отсчета* [11] как отношение расстояния между ними ко времени его преодоления.

Вторая особенность

В инерциальных системах отсчета, связанных с первым и вторым объектами, отрезку длины 0l (1) соответствуют отрезки длин 1l (для первой системы) и 2l (для второй системы), а интервалу времени ${}^0\tau$ (2) соответствуют интервалы ${}^1\tau$ и ${}^2\tau$.

В инерциальной системе отсчета, связанной с регистраторами, отрезки длины 0l (1) и 1l связаны следующим образом

$${}^0l = {}^1l \sqrt{1 - \frac{v_1^2}{c^2}}, \quad (6)$$

а интервалы ${}^0\tau$ (2) и ${}^1\tau$ –

$${}^0\tau = \frac{{}^1\tau}{\sqrt{1 - \frac{v_1^2}{c^2}}}. \quad (7)$$

При этом

$${}^1l = \frac{{}^0l}{\sqrt{1 - \frac{v_1^2}{c^2}}} = \frac{x_2}{\sqrt{1 - \frac{v_1^2}{c^2}}},$$

$${}^1\tau = {}^0\tau \sqrt{1 - \frac{v_1^2}{c^2}} = (t_1 - t_0) \sqrt{1 - \frac{v_1^2}{c^2}}.$$

Скорость сближения объектов в системе отсчета, связанной с первым объектом, равна

$${}^1v_{12} = \frac{{}^1l}{{}^1\tau} = \frac{x_2}{\sqrt{1 - \frac{v_1^2}{c^2}}} \frac{1}{(t_1 - t_0) \sqrt{1 - \frac{v_1^2}{c^2}}} = \frac{x_2}{t_1 - t_0} \frac{1}{1 - \frac{v_1^2}{c^2}} = \frac{{}^0v_{12}}{1 - \frac{v_1^2}{c^2}}. \quad (8)$$

Аналогичным образом скорость сближения объектов в системе отсчета, связанной со вторым объектом, равна

$${}^2v_{12} = \frac{{}^2l}{{}^2\tau} = \frac{{}^0v_{12}}{1 - \frac{v_2^2}{c^2}}.$$

Пример 2. Для протонов БАКа

$${}^1v_{12} = {}^2v_{12} = \frac{{}^0v_{12}}{1 - \frac{v_2^2}{c^2}} = \frac{1,999999982c}{1 - \frac{(0,999999991c)^2}{c^2}} \approx 1,1 \cdot 10^8 c.$$

Результат, как и все эффекты специальной теории относительности (СТО) представляется нетривиальным (и может даже использоваться для укрепления позиций теории дальнего действия).

Замечание. Такая большая скорость не является беспрецедентной. Фазовая скорость волны де Бройля $v_\phi = c^2/v$ может быть еще выше при малых значениях скорости объекта v .

Третья особенность

В инерциальной системе отсчета, связанной с первым объектом, отрезки длины 1l и 0l (1) связаны следующим образом

$${}^1l = {}^0l \sqrt{1 - \frac{v_1^2}{c^2}}, \quad (9)$$

а интервалы ${}^1\tau$ и ${}^0\tau$ (2) –

$${}^1\tau = \frac{{}^0\tau}{\sqrt{1 - \frac{v_1^2}{c^2}}}. \quad (10)$$

Скорость сближения объектов в системе отсчета, связанной с первым объектом, равна

$${}^1v_{12} = \frac{{}^1l}{{}^1\tau} = (x_2 - x_0) \sqrt{1 - \frac{v_1^2}{c^2}} \frac{\sqrt{1 - \frac{v_1^2}{c^2}}}{t_1 - t_0} = \frac{x_2 - x_0}{t_1 - t_0} \left(1 - \frac{v_1^2}{c^2}\right) = {}^0v_{12} \left(1 - \frac{v_1^2}{c^2}\right). \quad (11)$$

Аналогичным образом скорость сближения объектов в системе отсчета, связанной со вторым объектом, равна

$${}^2v_{12} = \frac{{}^2l}{{}^2\tau} = {}^0v_{12} \left(1 - \frac{v_2^2}{c^2}\right).$$

Пример 3. Для протонов БАКа

$$\begin{aligned}
{}^1v_{12} &= {}^2v_{12} = {}^0v_{12} \left(1 - \frac{v_2^2}{c^2} \right) = \\
&= 1,999999982c \left(1 - \frac{(0,9999999991c)^2}{c^2} \right) \approx 0,4 \cdot 10^{-8} c \approx 1,2 (м/с).
\end{aligned}$$

Результат не менее нетривиален, чем в примере 2.

Замечания

Замечание 1. Выражения (6) и (9), (7) и (10), (8) и (11) противоречат друг другу, но для СТО – обычное дело, когда одно и то же явление с разных точек зрения выглядит существенно по-разному.

Замечание 2. Выражения (6) и (9) порождают следующее обстоятельство. Отрезку 0l_1 (в «нулевой» системе) соответствует отрезок 1l_2 (в «первой» системе). При этом в «первой» системе

$${}^1l_2 = {}^0l_1 \left(1 - \frac{v_1^2}{c^2} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Отрезку 1l_2 (в «первой» системе) соответствует отрезок 0l_3 (в «нулевой» системе). При этом в «нулевой» системе

$${}^0l_3 = {}^1l_2 \left(1 - \frac{v_1^2}{c^2} \right)^{\frac{1}{2}} = {}^0l_1 \left(1 - \frac{v_1^2}{c^2} \right)^{\frac{1}{2}} \left(1 - \frac{v_1^2}{c^2} \right)^{\frac{1}{2}} = {}^0l_1 \left(1 - \frac{v_1^2}{c^2} \right)^{\frac{2}{2}}.$$

Продолжение этой последовательности дает:

(в «первой» системе)

$${}^1l_{n+1} = {}^0l_n \sqrt{1 - \frac{v_1^2}{c^2}} = {}^0l_1 \left(1 - \frac{v_1^2}{c^2}\right)^{\frac{n}{2}} \quad (n - \text{нечетное}),$$

(в «нулевой» системе)

$${}^0l_{n+1} = {}^1l_n \sqrt{1 - \frac{v_1^2}{c^2}} = {}^0l_1 \left(1 - \frac{v_1^2}{c^2}\right)^{\frac{n}{2}} \quad (n - \text{четное}).$$

${}^1l_k, {}^0l_k$ – это не разные отрезки. Это один и тот же отрезок, отображенный k раз.

С ростом n отрезок сокращается до нуля.

Аналогичные рассуждения для интервала времени дают:

(в «первой» системе)

$${}^1\tau_{n+1} = \frac{{}^0\tau_1}{\left(1 - \frac{v_1^2}{c^2}\right)^{\frac{n}{2}}} \quad (n - \text{нечетное}),$$

(в «нулевой» системе)

$${}^0\tau_{n+1} = \frac{{}^0\tau_1}{\left(1 - \frac{v_1^2}{c^2}\right)^{\frac{n}{2}}} \quad (n - \text{четное}).$$

С ростом n интервал времени растягивается до бесконечности

Соответствующие скорости равны

(в «первой» системе)

$${}^1v_{n+1} = \frac{{}^1l_{n+1}}{{}^1\tau_{n+1}} = {}^0l_1 \left(1 - \frac{v_1^2}{c^2}\right)^{\frac{n}{2}} \frac{\left(1 - \frac{v_1^2}{c^2}\right)^{\frac{n}{2}}}{{}^0\tau_1} = {}^0v_1 \left(1 - \frac{v_1^2}{c^2}\right)^n \quad (n - \text{нечетное}),$$

(в «нулевой» системе)

$${}^0v_{n+1} = {}^0v_1 \left(1 - \frac{v_1^2}{c^2}\right)^n \quad (n - \text{четное}).$$

С ростом n скорость сокращается до нуля.

Четвертая особенность

В системе отсчета, связанной со вторым объектом, скорость второго объекта равна нулю, поэтому скорость сближения двух объектов неотличима от скорости первого объекта относительно второго. Имея в виду (4), эти скорости равны

$${}^2v_{12} = {}^2v_1 = \frac{v_1 + V}{1 + v_1 V / c^2}. \quad (12)$$

Четвертая особенность скорости сближения объектов заключается в том, что по версии, опирающейся на формулу (12), она тождественно равна скорости одного из объектов относительно другого, в то время как по другим версиям она существенно не совпадает с относительной скоростью (в том числе и потому, что относительная скорость не может превышать скорость света, а скорость сближения – может).

Обсуждение

Оппоненты могут оспорить любую из указанных четырех особенностей. Это мало что изменит. В этом случае спорная особенность просто может быть исключена из рассмотрения. Однако это не сможет опорочить оставшиеся

особенности, которые характеризуются нетривиальными величинами, и которые обуславливают особый статус скорости сближения (за счет ее неоднозначности) по сравнению с другими механическими величинами, в том числе, с относительной скоростью.

Может, в частности, возникнуть возражение, что вместо релятивистского преобразования длин и интервалов времени следует непосредственно использовать формулу преобразования скоростей.

Применительно к данным примера 1 это могло бы дать

$${}^2v_{12} = \frac{{}^0v_{12} + V}{1 + {}^0v_{12}V/c^2} = \frac{1,999999982c + 0,999999991c}{1 + 1,999999982c \cdot 0,999999991c/c^2} \approx 1,000000003 c.$$

Однако это тоже нетривиальный результат.

Оппоненты могут предложить «правильный» алгоритм расчета скорости сближения, а все другие объявить (постулировать) «неправильными».

При этом признак «неправильности», заключающийся единственно в отличии от «правильного» алгоритма, совершенно недостаточен – необходимо показать фактическую недопустимую ошибку «неправильного» алгоритма (вроде деления на ноль или сложения длины со временем).

Оппоненты могут обратить внимание на то, что четвертая особенность обобщает на релятивистскую механику правило классической механики о неразличимости скорости сближения и относительной скорости, что на первый взгляд обнуляет актуальность настоящего исследования. Из этого, однако, следует, что для данных примера 1 относительная скорость почти в два раза выше скорости света.

Заключение

Скорость коллинеарного сближения двух объектов в релятивистской механике является существенно неоднозначной величиной. Если другие механические величины имеют два варианта значений (в собственной системе отсчета и движущейся), то скорость сближения имеет четыре варианта. Это обстоятельство следует учитывать при дальних космических перелетах [12–20] и всюду, где учитываются релятивистские эффекты.

Полученные результаты ничему не противоречат, ничего не опровергают и не являются парадоксом.

Список источников

1. Попов И.П. Применение методов классической механики к электрическим зарядам // Труды МАИ. 2021. № 119. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=159756>. DOI: 10.34759/trd-2021-119-01
2. Дрёмин И.М. Физика на Большом адронном коллайдере // Успехи физических наук. 2009. Т. 179. № 6. С. 571-579.
3. Морозов А.Ю. Алгоритм адаптивной интерполяции для решения задач небесной механики с интервальными неопределенностями // Труды МАИ. 2022. № 123. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=165501>. DOI: 10.34759/trd-2022-123-14
4. Тимошенко А.В., Кошкарлов А.С. Сравнительный анализ энтропийных метрик информативности оптических изображений космических объектов // Труды МАИ.

2020. № 112. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=116348>. DOI: 10.34759/trd-2020-112-10
5. Привалов А.Е. Унифицированная программная платформа для разработки многоагентных моделей орбитальных группировок космических аппаратов // Труды МАИ. 2022. № 123. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=165498>. DOI: 10.34759/trd-2022-123-12
6. Кондратьева Л.А. Аналитическое приближение инерциального многообразия для модели движения спутника // Труды МАИ. 2022. № 123. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=165503>. DOI: 10.34759/trd-2022-123-15
7. Павлов А.Н., Павлов Д.А., Умаров А.Б. Метод оценивания показателей живучести бортовых систем малых космических аппаратов в условиях изменяющихся режимов функционирования и деструктивных воздействий // Труды МАИ. 2021. № 120. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=161425>. DOI: 10.34759/trd-2021-120-11
8. Екименко А.А., Михайлов Д.Ю. Исследование взаимодействия частиц космического мусора с элементами конструкции космического аппарата // Труды МАИ. 2021. № 119. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=159756>. DOI: 10.34759/trd-2021-119-02
9. Колпин М.А., Проценко П.А. Метод коррекции плана работы средств наземного автоматизированного комплекса управления космическими аппаратами на основе поиска максимальной клики в разреженном сетевом графе операций //

- Труды МАИ. 2021. № 118. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=158256>. DOI: 10.34759/trd-2021-118-17
10. Зайцев Д.О., Павлов Д.А., Нестечук Е.А. Методика контроля технического состояния бортовых систем ракет-носителей на основе обработки быстроменяющихся параметров // Труды МАИ. 2021. № 121. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=162665>. DOI: 10.34759/trd-2021-121-18
11. Попов И.П. Абсолютные системы отсчета при относительном движении // Труды МАИ. 2022. № 124. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=166905>. DOI: 10.34759/trd-2022-124-02
12. Попов И.П. К расчетам параметров пассивных гравитационных маневров межпланетных космических аппаратов // Труды МАИ. 2021. № 118. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=158210>. DOI: 10.34759/trd-2021-118-01
13. 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
14. Дмитриев А.О., Москатиный И.В., Нестерин И.М., Сысоев В.К. Анализ вариантов навигационных систем для Луны // Труды МАИ. 2021. № 118. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=158243>. DOI: 10.34759/trd-2021-118-09
15. Воронов К.Е., Григорьев Д.П., Телегин А.М. Применение нейронной сети прямого распространения для локализации места удара микрочастиц о поверхность

- космического аппарата // Труды МАИ. 2021. № 118. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=158245>. DOI: 10.34759/trd-2021-118-10
16. Вернигора Л.В., Казмерчук П.В., Сысоев В.К., Дмитриев А.О. Методика измерения координат лунных посадочных станций с помощью оптических телевизионных средств космических аппаратов // Труды МАИ. 2020. № 114. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=118986>. DOI: 10.34759/trd-2020-114-12
17. Зарецкий Б.Ф., Курмазенко Э.А., Прошкин В.Ю. Управление жизнеобеспечением экипажей космических объектов: системный подход // Труды МАИ. 2020. № 113. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=118179>. DOI: 10.34759/trd-2020-113-13
18. Багров А.В., Дмитриев А.О., Леонов В.А., Москатиньев И.В., Сысоев В.К. Двухволновая оптическая лунная навигационная система // Труды МАИ. 2020. № 112. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=116356>. DOI: 10.34759/trd-2020-112-13
19. Проценко П.А., Скрипников А.Н. Методика оценивания точности определения параметров движения космического аппарата на окололунной орбите // Труды МАИ. 2020. № 111. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=115201>. DOI: 10.34759/trd-2020-111-21
20. Глущенко А.А., Хохлов В.П. Метод обнаружения маневра космического аппарата на основе текущих траекторных измерений // Труды МАИ. 2019. № 109. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=111402>. DOI: 10.34759/trd-2019-109-17

References

1. Popov I.P. *Trudy MAI*, 2021, no. 119. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=159756>. DOI: 10.34759/trd-2021-119-01
2. Dremin I.M. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 2009, vol. 179, no. 6, pp. 571-579.
3. Morozov A.Yu. *Trudy MAI*, 2022, no. 123. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=165501>. DOI: 10.34759/trd-2022-123-14
4. Timoshenko A.V., Koshkarov A.S. *Trudy MAI*, 2020, no. 112. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=116348>. DOI: 10.34759/trd-2020-112-10
5. Privalov A.E. *Trudy MAI*, 2022, no. 123. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=165498>. DOI: 10.34759/trd-2022-123-12
6. Kondrat'eva L.A. *Trudy MAI*, 2022, no. 123. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=165503>. DOI: 10.34759/trd-2022-123-15
7. Pavlov A.N., Pavlov D.A., Umarov A.B. *Trudy MAI*, 2021, no. 120. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=161425>. DOI: 10.34759/trd-2021-120-11
8. Ekimenko A.A., Mikhailov D.Yu. *Trudy MAI*, 2021, no. 119. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=159756>. DOI: 10.34759/trd-2021-119-02
9. Kolpin M.A., Protsenko P.A. *Trudy MAI*, 2021, no. 118. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=158256>. DOI: 10.34759/trd-2021-118-17
10. Zaitsev D.O., Pavlov D.A., Nestechuk E.A. *Trudy MAI*, 2021, no. 121. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=162665>. DOI: 10.34759/trd-2021-121-18
11. Popov I.P. *Trudy MAI*, 2022, no. 124. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=166905>. DOI: 10.34759/trd-2022-124-02

12. Popov I.P. *Trudy MAI*, 2021, no. 118. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=158210>. DOI: 10.34759/trd-2021-118-01
13. 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
14. Dmitriev A.O., Moskatin'ev I.V., Nesterin I.M., Sysoev V.K. *Trudy MAI*, 2021, no. 118. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=158243>. DOI: 10.34759/trd-2021-118-09
15. Voronov K.E., Grigor'ev D.P., Telegin A.M. *Trudy MAI*, 2021, no. 118. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=158245>. DOI: 10.34759/trd-2021-118-10
16. Vernigora L.V., Kazmerchuk P.V., Sysoev V.K., Dmitriev A.O. *Trudy MAI*, 2020, no. 114. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=118986>. DOI: 10.34759/trd-2020-114-12
17. Zaretskii B.F., Kurmazenko E.A., Proshkin V.Yu. *Trudy MAI*, 2020, no. 113. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=118179>. DOI: 10.34759/trd-2020-113-13
18. Bagrov A.V., Dmitriev A.O., Leonov V.A., Moskatin'ev I.V., Sysoev V.K. *Trudy MAI*, 2020, no. 112. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=116356>. DOI: 10.34759/trd-2020-112-13
19. Protsenko P.A., Skripnikov A.N. *Trudy MAI*, 2020, no. 111. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=115201>. DOI: 10.34759/trd-2020-111-21
20. Glushchenko A.A., Khokhlov V.P. *Trudy MAI*, 2019, no. 109. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=111402>. DOI: 10.34759/trd-2019-109-17

Статья поступила в редакцию 24.12.2022

Одобрена после рецензирования 08.01.2023

Принята к публикации 27.02.2023

The article was submitted on 24.12.2022; approved after reviewing on 08.01.2023;
accepted for publication on 27.02.2023