

EDN: YEIBXY

DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-4-13-20



Научная статья

УДК 637.115:637.11



Экспериментальные исследования левитирующей модели доильной платформы карусельного типа

Владимир Вячеславович Кирсанов,
доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент Российской академии наук,
e-mail: kirvv2014@mail.ru;

Юрий Анатольевич Иванов,
доктор сельскохозяйственных наук,
главный научный сотрудник,
академик Российской академии наук,
e-mail: ros-plem@mail.ru;

Сергей Владимирович Кирсанов,
аспирант,
e-mail: kirseryii@mail.ru;

Семен Сергеевич Рузин,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
e-mail: ruzin.s.s@yandex.ru

Федеральный научный агротехнологический центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Проведенный ранее анализ показал перспективность использования технологии магнитного подвеса для создания левитирующей модели доильной платформы карусельного типа на постоянных магнитах и проведения ее экспериментальных исследований (*Цель исследования*) На основе предложенных технологических схем провести экспериментальные исследования и магнитостатический расчет левитирующей доильной платформы «Карусель» с использованием аксиально намагниченных постоянных магнитов прямоугольной формы. (*Материалы и методы*) Рассмотрено три варианта расположения постоянных аксиально намагниченных неодимовых магнитов кубической формы ($0,01 \times 0,01 \times 0,01$ метра) на подвижной вращающейся и неподвижной частях карусели и методика определения левитирующих и боковых зазоров между подвижными и неподвижными магнитами на холостом ходу и под нагрузкой. (*Результаты и обсуждение*) Разработана экспериментальная модель левитирующей доильной платформы карусельного типа на 24 места в масштабе (1:33), проведены экспериментальные исследования. Установлено, что наиболее предпочтительным вариантом является размещение магнитов друг над другом одноименными полюсами навстречу друг другу с тангенциальным зазором (0,004-0,002 метра) на подвижной и неподвижной частях платформы на окружностях одинакового радиуса. Левитирующий зазор между магнитами обратно пропорционален создаваемой нагрузке, которая увеличивается от 9 до 26,8 ньютона с уменьшением радиуса расположения магнитов (от 0,1 до 0,06 метра) и соответствующим уменьшением тангенциального зазора между магнитами (с 0,013-0,016 до 0,004-0,002 метра) при сохраняющемся левитирующем зазоре 0,013 метра. (*Выводы*) Максимальная удельная грузоподъемность платформы с учетом собственной массы подвижной части платформы (26,8 + 8 ньютонов), отнесенная к установленной массе 48 магнитов ($48 \times 0,0074 = 0,355$ килограмма) составила 98 ньютонов на килограмм, что близко к расчетным значениям (84 ньютона на килограмм).

Ключевые слова: доильная платформа карусельного типа, модель, магнитная левитация, воздушный левитационный зазор, постоянные магниты, грузоподъемность платформы.

Для цитирования: Кирсанов В.В., Иванов Ю.А., Кирсанов С.В., Рузин С.С. Экспериментальные исследования левитирующей модели доильной платформы карусельного типа // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2025. Т. 19. №4. 13-20. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-4-13-20. EDN: YEIBXY.

Scientific article

Experimental Study of a Levitating Carousel-Type Milking Platform

Vladimir V. Kirsanov,
Dr.Sc.(Eng.), professor, corresponding member
of the Russian Academy of Sciences,
e-mail: kirvv2014@mail.ru;

Yuri A. Ivanov,
Dr.Sc.(Agri.), chief researcher,
member of the Russian Academy of Sciences,
e-mail: ros-plem@mail.ru;

Sergey V. Kirsanov,
Ph.D. student (Agri.),
e-mail: kirseryii@mail.ru;

Semyon S. Ruzin,
Ph.D.(Eng.), senior researcher,
e-mail: ruzin.s.s@yandex.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. Previous studies have highlighted the potential of magnetic suspension technology for developing a levitating carousel-type milking platform based on permanent magnets and conducting its experimental evaluation. (*Research purpose*) This study aims to perform experimental investigations and magnetostatic calculations of a levitating “Carousel” milking platform using axially magnetized permanent magnets of rectangular shape, in accordance with the proposed technological schemes. (*Materials and methods*) Three configurations for placing axially magnetized neodymium permanent magnets with a cubic shape ($0.01 \times 0.01 \times 0.01$ meters) were examined for the rotating movable and stationary components of the carousel. A methodology was developed to determine the levitation and lateral air gaps between the movable and fixed magnets under both no-load and loaded conditions. (*Results and discussion*) An experimental scale model (1:33) of a levitating carousel-type milking platform with 24 positions was developed and tested. The most effective configuration was identified as the one in which magnets were placed directly opposite each other, with like poles facing each other and a tangential air gap of 0.004–0.002 meters. The magnets were positioned along concentric circles of equal radius on the movable and stationary parts of the platform. The levitation gap between the magnets was found to be inversely proportional to the applied load, which increased from 9 to 26.8 newtons as the radius of magnet placement decreased (from 0.1 to 0.06 meters) and the tangential gap narrowed (from 0.013–0.016 to 0.004–0.002 meters), while the levitation gap remained constant at 0.013 meters. (*Conclusions*) The maximum specific load-bearing capacity of the platform, taking into account the weight of the movable part (26.8 + 8 newtons), relative to the total mass of the 48 magnets ($48 \times 0.0074 = 0.355$ kilograms), reached 98 newtons per kilogram. The value is close to the theoretical estimate of 84 newtons per kilogram, confirming the efficiency of the proposed magnetic suspension configuration.

Keywords: carousel-type milking platform, model, magnetic levitation, air levitation gap, permanent magnets, platform load-bearing capacity.

For citation: Kirsanov V.V., Ivanov Yu.A., Kirsanov S.V., Ruzin S.S. Experimental study of a levitating carousel-type milking platform. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N4. 13-20 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-4-13-20. EDN: YEIBXY.

Крупные молочные фермы агрохолдингов с поголовьем более 1200 коров чаще всего используют доильные установки карусельного типа [1] вместимостью от 36 до 100 доильных мест, обладающие высокой пропускной способностью от 120 до 500 гол/ч за счет постоянного потока животных, рациональной рабочей позы оператора с малой зоной обслуживания [2]. Вместе с тем в процессе эксплуатации могут возникать определенные сложности, связанные с техническим обслуживанием и ремонтом колесных движителей (рельс-колесо) и ведущих колес фрикционных передач электроприводов доильной платформы и др. [3].

Альтернативным вариантом колесным движителям доильной платформы установки «Карусель» может быть ее магнитный подвес на постоянных магнитах. Были проанализированы перспективные способы применения на транспорте магнитной левитации и предложено создание левитирующей доильной платформы карусельного типа на постоянных магнитах. Это позволит исключить саму систему движителей рельс-колесо, снизить шум при движении, уменьшить затраты электроэнергии, материалоемкость, трудоемкость монтажа, технического обслуживания и существенно повысить срок службы доильной платформы (Патент RU 2743104 «Устройство магнитной левитации на постоянных магнитах», 2021).

Ранее была разработана технологическая схема, проведен ее магнитостатический расчет и осуществлено моделирование взаимодействия магнитных

сборок [5]. Для дальнейших исследований необходимо разработать, изготовить и провести испытания действующей модели левитирующей доильной платформы карусельного типа на постоянных магнитах с использованием опыта создания подобных технологий на транспорте [4].

Цель исследования. Провести экспериментальные исследования левитирующей модели доильной платформы «Карусель» на постоянных магнитах.

Методы и материалы. При создании экспериментальной модели за основу была взята технологическая схема платформы «Карусель» [1] с использованием аксиально намагниченных постоянных магнитов кубической формы. Рассматривалось несколько вариантов расположения постоянных магнитов с учетом рекомендаций [6].

В варианте 1 (рис. 1) постоянные магниты 3 и 4 диагонально расположены одноименными полюсами навстречу под углом 90° с образованием левитирующего зазора h и бокового стабилизирующего зазора s в соответствии с рекомендациями [7, 8]. Векторы намагниченности показаны стрелками на магнитах. Магниты взаимодействуют друг с другом с образованием сил левитации и дополнительной боковой стабилизации вращающейся подвижной части 1 доильной платформы относительно оси вращения (показана пунктирной линией) на основе расчетов (Веретимус Д.К., Веретимус Н.К. Основы электростатики и магнитостатики. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. 170 с.) и представленных в работе [9].

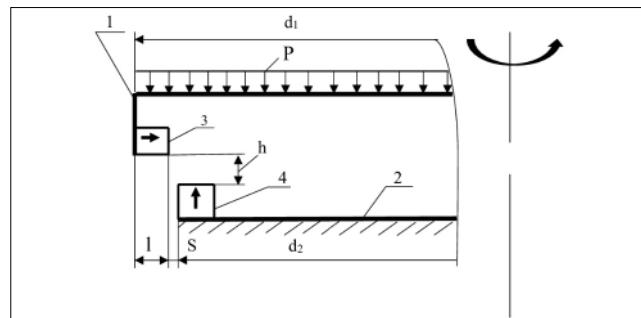


Рис. 1. Технологическая схема магнитного подвеса левитирующей модели доильной платформы карусельного типа (вариант 1): 1 – подвижная часть; 2 – неподвижная часть; 3 – боковые подвижные постоянные магниты; 4 – горизонтальные нижние неподвижные постоянные магниты; h – воздушный левитационный зазор, м; s – воздушный боковой зазор, м; l – размеры магнита, м

Fig. 1. Technological diagram of the magnetic suspension of a levitating carousel-type milking platform model (option 1): 1 – movable part; 2 – stationary part; 3 – lateral movable permanent magnets; 4 – lower horizontal fixed permanent magnets; h – air levitation gap, m; s – lateral air gap, m; l – magnet dimensions, m.

Боковой зазор определялся по формуле:

$$S = d_1 - l - d_2, \quad (1)$$

где s – воздушный боковой зазор, м; d_1 – диаметр подвижной части платформы, м; l – размеры магнита кубической формы, м; d_2 – диаметр неподвижной части платформы, м.

Воздушный левитационный зазор (h) измерялся линейкой в зависимости от нагрузки.

В варианте 2 (схема подвеса на рис. 2а) добавлен верхний ряд магнитов 5 для увеличения левитирующих сил отталкивания между магнитами 3, 4 и 5. Под нагрузкой изменяются левитационные воздушные зазоры h и h_2 за счет оседания подвижной части платформы 1, зазор h_1 – постоянный и конструктивно задан взаимным расположением магнитов 3 и 5. Боковой воздушный зазор s оставался прежним.

Воздушные левитационные зазоры на холостом ходу h_x и под нагрузкой h_p вычислялись в соответствии с рисунком 2а по выражениям:

$$\begin{cases} h_x = h_1 + l + h_{2x} \\ h_p = h_1 + l + h_{2p}. \end{cases} \quad (2)$$

В варианте 3 (рис. 2б) использовались только горизонтальные магниты 4 и 5, работающие на отталкивание. Центрирование от боковых смещений производилось только центральной осью вращения в силу симметричности конструкции и отсутствия бокового смещения, которое необходимо учитывать при создании высокоскоростного железнодорожного транспорта.

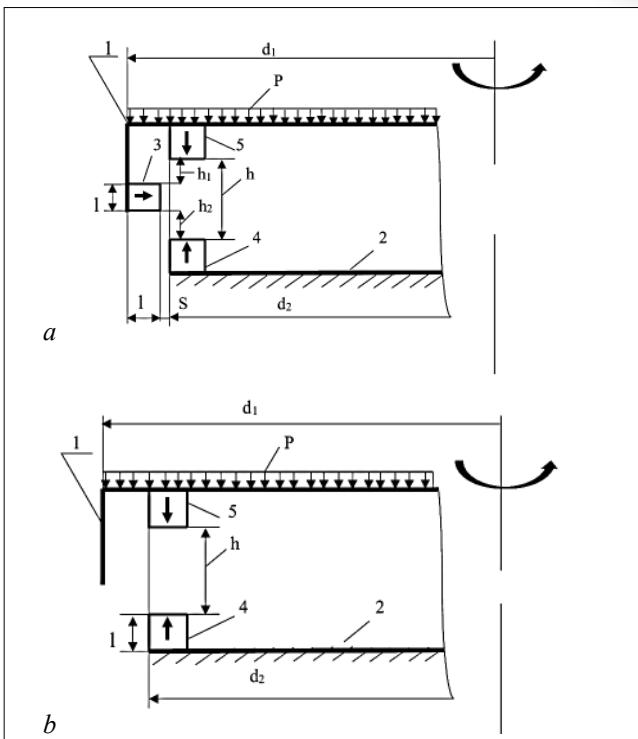


Рис. 2. Технологическая схема магнитного подвеса левитирующей модели доильной платформы карусельного типа: а – вариант 2; б – вариант 3; 1 – подвижная часть; 2 – неподвижная часть; 3 – боковые подвижные постоянные магниты (в варианте 3 отсутствуют); 4 – горизонтальные нижние неподвижные постоянные магниты; 5 – горизонтальные верхние подвижные постоянные магниты; h – воздушный левитационный зазор между нижними и верхними горизонтальными магнитами, м; h_1 – воздушный постоянный зазор между боковыми и верхними горизонтальными магнитами, м; h_2 – воздушный левитационный зазор между боковыми и нижними горизонтальными магнитами, м; s – воздушный боковой зазор между боковыми и горизонтальными магнитами, м; l – размеры магнита, м; P – распределенная нагрузка, Н

Fig. 2. Technological diagram of the magnetic suspension of a levitating carousel-type milking platform model: a – option 2; b – option 3; 1 – movable part; 2 – stationary part; 3 – lateral movable magnets; 4 – lower horizontal fixed permanent magnets; 5 – upper horizontal movable permanent magnets; h – air levitation gap between the lower and upper horizontal magnets, m; h_1 – constant air gap between the lateral and upper horizontal magnets, m; h_2 – air levitation gap between the lateral and lower horizontal magnets, m; s – lateral air gap between the lateral and horizontal magnets, m; l – magnet dimensions, m; P – distributed load, N

Все магниты в специальных держателях равномерно расположены по окружности с определенным шагом в соответствии с рекомендациями по использованию неодимовых магнитов с высокой энергией поля [11].

Результаты и обсуждение. На основе рассмотренных технологических схем магнитного подвеса (*рисунки 1, 2*) была разработана экспериментальная модель левитирующей доильной платформы «Карусель» на 24 места в масштабе 1:33 (*рисунки 3-6*) с учетом структуры создаваемых магнитных полей различными сборками в соответствии с рекомендациями в работах [12, 13].

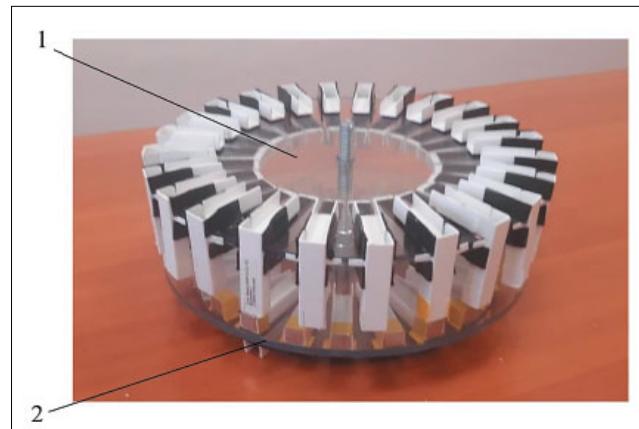


Рис. 3. Общий вид левитирующей модели доильной платформы карусельного типа: 1 – подвижная часть; 2 – неподвижная часть

Fig. 3. General view of the levitating carousel-type milking platform model: 1 – movable part; 2 – stationary part

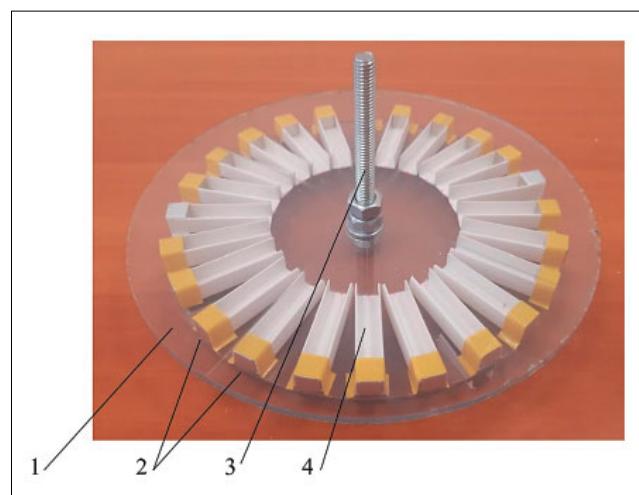


Рис. 4. Неподвижная часть левитирующей модели доильной платформы: 1 – основание; 2 – горизонтальные нижние неподвижные постоянные магниты; 3 – неподвижная ось (репер); 4 – держатели магнитов

Fig. 4. Stationary part of the levitating carousel-type milking platform model: 1 – base; 2 – lower horizontal fixed permanent magnets; 3 – fixed axis (reference point); 4 – magnet holders

Нагрузка создавалась гирьками разной массы, расположенными на подвижной части платформы (*рис. 6*), при этом фиксировался левитационный зазор между магнитами. Анализ данных *таблицы 1* (вариант 2) показывает, что верхние магниты рас-

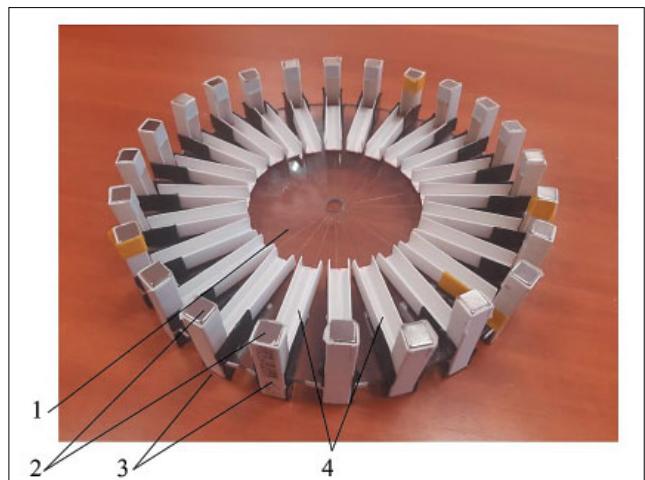


Рис. 5. Подвижная часть левитирующей модели доильной платформы карусельного типа (вид снизу): 1 – основание; 2 – боковые подвижные постоянные магниты; 3 – держатели боковых магнитов; 4 – держатели верхних горизонтальных магнитов

Fig. 5. Movable part of the levitating carousel-type milking platform model (bottom view): 1 – base; 2 – lateral movable permanent magnets; 3 – lateral magnet holders; 4 – upper horizontal magnet holders



Рис. 6. Общий вид вращающейся левитирующей модели доильной платформы карусельного типа под нагрузкой

Fig. 6. General view of the rotating levitating carousel-type milking platform model under load

положены на достаточном большом расстоянии от нижних, исходя из величины воздушного рабочего зазора $h_p = 0,041\text{--}0,033$ м, что не позволяет создать соответствующие силы отталкивания для существенного повышения грузоподъемности платформы по сравнению с первым вариантом (*рис. 1*). Предельные значения грузоподъемности в указанных вариантах составили 4 и 4,5 Н при левитационных зазорах 0,010 и 0,009 м соответственно. Дальнейшее увеличение нагрузки приводило к боковому опрокидыванию платформы за счет примагничивания северных полюсов подвижных боковых магнитов 2 (*рис. 5*) к противоположным полюсам неподвижным магнитам 2 (*рис. 4*) в тангенциальных зазорах между ними.

Таблица 1 Основные параметры левитирующей модели доильной платформы «КАРУСЕЛЬ», собранной по схемам на рисунках 1 и 2а (варианты 1 и 2) MAIN PARAMETERS OF THE LEVITATING CAROUSEL-TYPE MILKING PLATFORM MODEL ASSEMBLED ACCORDING TO THE DIAGRAMS IN FIGURES 1 AND 2A (OPTIONS 1 AND 2)		Table 1	
Показатель		Вариант 1	Вариант 2
Диаметр подвижной части платформы d_1 , м		0,23	0,23
Диаметр неподвижной части платформы d_2 , м		0,2	0,2
Количество постоянных магнитов:			
на неподвижной части		24	24
на подвижной боковой части		24	24
на подвижной верхней части		—	12
Направление вектора намагниченности:			
на неподвижной части		Вверх	Вверх
на подвижной боковой части		Вбок	Вбок
на подвижной верхней части		—	Вниз
Шаг расположения магнитов по окружности:			
на неподвижной части		Через 15°	Через 15°
на подвижной боковой части		Через 15°	Через 15°
на подвижной верхней части		—	Через 30°
Расстояние между магнитами по дуге окружности, м:			
на неподвижной части		0,016	0,016
σ_{\max}		0,013	0,013
σ_{\min}			
на подвижной боковой части		0,022	0,022
σ_{\max}		0,020	0,020
σ_{\min}			
на подвижной верхней части		—	0,032
σ_{\max}		—	0,026
σ_{\min}			
Характеристика постоянных неодимовых магнитов:			
размеры, м		0,01×0,01×0,01	
намагничивание		Аксиальное	
остаточная магнитная индукция, Тл		1,2	
Масса левитирующей подвижной части платформы с магнитами (без нагрузки), кг		0,56	0,63
Величина бокового зазора, s , м		0,08-0,1	
Величина левитирующего холостого зазора без нагрузки, м:			
h_x		—	0,046
h_{2x}		0,022	0,022
$h_{1-const}$		—	0,014
Величина левитирующего рабочего зазора с равномерно распределенной нагрузкой, h_p/h_{2p} , м:			
h_{p1} при нагрузке $P_1=1\text{H}$		—/0,016	0,041/0,017
h_{p2} при нагрузке $P_2=2\text{H}$		—/0,015	0,04/0,016
h_{p3} при нагрузке $P_3=3\text{H}$		—/0,013	0,038/0,014
h_{p4} при нагрузке $P_4=3,5\text{H}$		—/0,012	0,036/0,012
h_{p4} при нагрузке $P_{4\max}=4\text{H}$		—/0,010	0,035/0,011
h_{p5} при нагрузке $P_{5\max}=4,5\text{H}$		—	0,033/0,009

Учитывая данное обстоятельство, был проведен эксперимент, показывающий влияние шага расположения магнитов по дуге окружности на грузоподъемность платформы (вариант 3). Расстояние между магнитами (шаг) по дуге окружности в тангенциальном направлении регулировалось за счет изменения радиуса их расположения (от r_{\min} до r_{\max}) соответствующим перемещением в горизонтальных держателях 4 (рисунки 4 и 5).

Изменение радиуса расположения с 0,1 до 0,06 м привело к более плотной установке магнитов и возрастанию сил их взаимодействия, что показало необходимость усиления крепления к держателям и основанию подвижной и неподвижной частей плат-

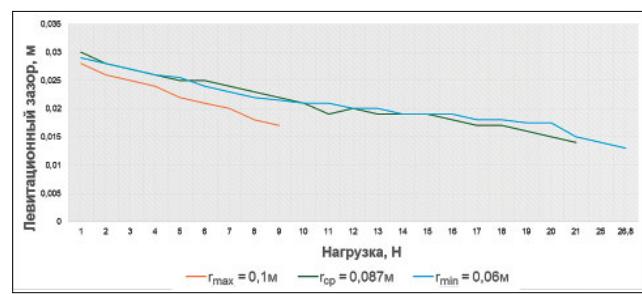


Рис. 7. Зависимости левитационных зазоров от нагрузки (по данным таблицы 2) и радиуса расположения магнитов

Fig. 7. Dependencies of levitation gaps on the load (based on Table 2 data) and magnet placement radius

Таблица 2

Основные параметры левитирующей модели доильной платформы «Карусель», собранной по схеме на рисунке 2в (вариант 3)
MAIN PARAMETERS OF THE LEVITATING CAROUSEL-TYPE MILKING PLATFORM MODEL ASSEMBLED ACCORDING TO THE DIAGRAM ON FIG. 2B (OPTION 3)

Table 2

Показатель	Радиус расположения магнитов, м																																																																																														
	$r_{\max} = 0,1$	$r_{\text{cp}} = 0,087$	$r_{\min} = 0,06$																																																																																												
Диаметр подвижной части платформы, d_1 , м	0,23	0,23	0,23																																																																																												
Диаметр неподвижной части платформы, d_2 , м	0,2	0,2	0,2																																																																																												
Количество постоянных магнитов на неподвижной части на подвижной боковой части на подвижной верхней части	24 — 24	24 — 24	24 — 24																																																																																												
Направление вектора намагниченности: на неподвижной части на подвижной боковой части на подвижной верхней части	Вверх — Вниз	Вверх — Вниз	Вверх — Вниз																																																																																												
Шаг расположения магнитов по окружности: на неподвижной части на подвижной боковой части на подвижной верхней части расстояние между магнитами, м: σ_{\max} σ_{\min}	Через 15° — Через 15° 0,016 0,013	Через 15° — Через 15° 0,010 0,008	Через 15° — Через 15° 0,04 0,02																																																																																												
Характеристика постоянных неодимовых магнитов: размеры, м намагничивание остаточная магнитная индукция, Тл	$0,01 \times 0,01 \times 0,01$ Аксиальное 1,2																																																																																														
Масса левитирующей подвижной части платформы с магнитами (без нагрузки), кг	0,56	0,56	0,81																																																																																												
Величина левитирующего холостого зазора без нагрузки, h_x , м	0,03	0,032	0,03																																																																																												
Величина левитирующего рабочего зазора с равномерно распределенной по окружности нагрузкой, h_p , м:	<table> <tr><td>при нагрузке $P_1=1\text{H}$</td><td>0,028</td><td>0,03</td><td>0,029</td></tr> <tr><td>при нагрузке $P_2=2\text{H}$</td><td>0,026</td><td>0,028</td><td>0,028</td></tr> <tr><td>при нагрузке $P_3=3\text{H}$</td><td>0,025</td><td>0,027</td><td>0,027</td></tr> <tr><td>при нагрузке $P_4=4\text{H}$</td><td>0,024</td><td>0,026</td><td>0,026</td></tr> <tr><td>при нагрузке $P_5=5\text{H}$</td><td>0,022</td><td>0,025</td><td>0,0255</td></tr> <tr><td>при нагрузке $P_6=6\text{H}$</td><td>0,021</td><td>0,025</td><td>0,025</td></tr> <tr><td>при нагрузке $P_7=7\text{H}$</td><td>0,020</td><td>0,024</td><td>0,024</td></tr> <tr><td>при нагрузке $P_8=8\text{H}$</td><td>0,018</td><td>0,023</td><td>0,023</td></tr> <tr><td>при нагрузке $P_{9\max}=9\text{H}$</td><td>0,017</td><td>0,022</td><td>0,022</td></tr> <tr><td>при нагрузке $P_{10}=10\text{H}$</td><td>—</td><td>0,021</td><td>0,0215</td></tr> <tr><td>при нагрузке $P_{11}=11\text{H}$</td><td>—</td><td>0,019</td><td>0,021</td></tr> <tr><td>при нагрузке $P_{12}=12\text{H}$</td><td>—</td><td>0,020</td><td>0,021</td></tr> <tr><td>при нагрузке $P_{13}=13\text{H}$</td><td>—</td><td>0,019</td><td>0,020</td></tr> <tr><td>при нагрузке $P_{14}=14\text{H}$</td><td>—</td><td>0,019</td><td>0,020</td></tr> <tr><td>при нагрузке $P_{15}=15\text{H}$</td><td>—</td><td>0,019</td><td>0,019</td></tr> <tr><td>при нагрузке $P_{16}=16\text{H}$</td><td>—</td><td>0,018</td><td>0,019</td></tr> <tr><td>при нагрузке $P_{17}=17\text{H}$</td><td>—</td><td>0,017</td><td>0,019</td></tr> <tr><td>при нагрузке $P_{18}=18\text{H}$</td><td>—</td><td>0,017</td><td>0,018</td></tr> <tr><td>при нагрузке $P_{19}=19\text{H}$</td><td>—</td><td>0,016</td><td>0,018</td></tr> <tr><td>при нагрузке $P_{20}=20\text{H}$</td><td>—</td><td>0,015</td><td>0,0175</td></tr> <tr><td>при нагрузке $P_{21\max}=21\text{H}$</td><td>—</td><td>0,014</td><td>0,0175</td></tr> <tr><td>при нагрузке $P_{22}=25\text{H}$</td><td>—</td><td>—</td><td>0,015</td></tr> <tr><td>при нагрузке $P_{23\max}=26,8\text{H}$</td><td>—</td><td>—</td><td>0,013</td></tr> </table>			при нагрузке $P_1=1\text{H}$	0,028	0,03	0,029	при нагрузке $P_2=2\text{H}$	0,026	0,028	0,028	при нагрузке $P_3=3\text{H}$	0,025	0,027	0,027	при нагрузке $P_4=4\text{H}$	0,024	0,026	0,026	при нагрузке $P_5=5\text{H}$	0,022	0,025	0,0255	при нагрузке $P_6=6\text{H}$	0,021	0,025	0,025	при нагрузке $P_7=7\text{H}$	0,020	0,024	0,024	при нагрузке $P_8=8\text{H}$	0,018	0,023	0,023	при нагрузке $P_{9\max}=9\text{H}$	0,017	0,022	0,022	при нагрузке $P_{10}=10\text{H}$	—	0,021	0,0215	при нагрузке $P_{11}=11\text{H}$	—	0,019	0,021	при нагрузке $P_{12}=12\text{H}$	—	0,020	0,021	при нагрузке $P_{13}=13\text{H}$	—	0,019	0,020	при нагрузке $P_{14}=14\text{H}$	—	0,019	0,020	при нагрузке $P_{15}=15\text{H}$	—	0,019	0,019	при нагрузке $P_{16}=16\text{H}$	—	0,018	0,019	при нагрузке $P_{17}=17\text{H}$	—	0,017	0,019	при нагрузке $P_{18}=18\text{H}$	—	0,017	0,018	при нагрузке $P_{19}=19\text{H}$	—	0,016	0,018	при нагрузке $P_{20}=20\text{H}$	—	0,015	0,0175	при нагрузке $P_{21\max}=21\text{H}$	—	0,014	0,0175	при нагрузке $P_{22}=25\text{H}$	—	—	0,015	при нагрузке $P_{23\max}=26,8\text{H}$	—	—	0,013
при нагрузке $P_1=1\text{H}$	0,028	0,03	0,029																																																																																												
при нагрузке $P_2=2\text{H}$	0,026	0,028	0,028																																																																																												
при нагрузке $P_3=3\text{H}$	0,025	0,027	0,027																																																																																												
при нагрузке $P_4=4\text{H}$	0,024	0,026	0,026																																																																																												
при нагрузке $P_5=5\text{H}$	0,022	0,025	0,0255																																																																																												
при нагрузке $P_6=6\text{H}$	0,021	0,025	0,025																																																																																												
при нагрузке $P_7=7\text{H}$	0,020	0,024	0,024																																																																																												
при нагрузке $P_8=8\text{H}$	0,018	0,023	0,023																																																																																												
при нагрузке $P_{9\max}=9\text{H}$	0,017	0,022	0,022																																																																																												
при нагрузке $P_{10}=10\text{H}$	—	0,021	0,0215																																																																																												
при нагрузке $P_{11}=11\text{H}$	—	0,019	0,021																																																																																												
при нагрузке $P_{12}=12\text{H}$	—	0,020	0,021																																																																																												
при нагрузке $P_{13}=13\text{H}$	—	0,019	0,020																																																																																												
при нагрузке $P_{14}=14\text{H}$	—	0,019	0,020																																																																																												
при нагрузке $P_{15}=15\text{H}$	—	0,019	0,019																																																																																												
при нагрузке $P_{16}=16\text{H}$	—	0,018	0,019																																																																																												
при нагрузке $P_{17}=17\text{H}$	—	0,017	0,019																																																																																												
при нагрузке $P_{18}=18\text{H}$	—	0,017	0,018																																																																																												
при нагрузке $P_{19}=19\text{H}$	—	0,016	0,018																																																																																												
при нагрузке $P_{20}=20\text{H}$	—	0,015	0,0175																																																																																												
при нагрузке $P_{21\max}=21\text{H}$	—	0,014	0,0175																																																																																												
при нагрузке $P_{22}=25\text{H}$	—	—	0,015																																																																																												
при нагрузке $P_{23\max}=26,8\text{H}$	—	—	0,013																																																																																												

формы, из-за чего произошло увеличение массы подвижной части до 0,81 кг. Анализ результатов таблицы 2 и представленных на рисунке 7 зависимостей показывает, что левитационный зазор между магнитами изменяется обратно пропорционально создаваемой нагрузке, которая увеличивается от 9 до 26,8 Н с уменьшением радиуса расположения магнитов (от 0,1 м до 0,06 м) и соответствующим уменьшением тангенциального зазора между магнитами (с 0,013-0,016 до 0,004-0,002 м). Более плотная установка магнитов с уменьшением радиуса их

расположения обеспечивает увеличение грузоподъемности платформы почти в три раза с 9 до 26,8 Н при сохраняющемся левитационном зазоре 0,013 м, позволяющем еще увеличить нагрузку, которая ограничивается механическим контактом держателей подвижной и неподвижной частей платформы.

Выводы

Экспериментальные исследования левитирующей модели доильной платформы карусельного типа на постоянных неодимовых аксиально намагниченных магнитах кубической формы ($0,01 \times 0,01 \times 0,01$ м)

показали ее работоспособность, заключающуюся в сохранении левитационных зазоров в пределах от 0,03 до 0,009 м в диапазоне нагрузок от 4 до 26,8 Н.

Наиболее предпочтительным вариантом является размещение магнитов друг над другом одинаковыми полюсами навстречу друг другу с тангенциальным зазором (0,004-0,002 м) на подвижной и неподвижной частях платформы на окружностях одинакового радиуса.

Левитационный зазор между магнитами обратно пропорционален грузоподъемности платформы,

которая увеличивается (от 9 до 26,8 Н) с уменьшением радиусов расположения магнитов (от 0,1 до 0,06 м) и соответствующим уменьшением тангенциальных зазоров между магнитами (от 0,013-0,016 до 0,004-0,002 м) при сохраняющемся левитационном зазоре 0,013 м.

Удельная максимальная грузоподъемность платформы с учетом собственной массы подвижной части платформы (26,8 + 8 Н), отнесенная к установленной массе 48 магнитов ($48 \times 0,0074 = 0,355$ кг) составила 98 Н/кг, что близко к расчетным значениям 84 Н/кг, представленным в работе [5].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кирсанов В.В., Федоренко В.Ф., Кирсанов С.В. Магнитостатический расчет левитирующей вращающейся доильной платформы карусель на постоянных магнитах // Техника и оборудование для села. 2024. N6(324). С. 29-32. DOI: 10.33267/2072-9642-2024-6-29-32
2. Морозов Н.М., Кирсанов В.В., Ценч Ю.С. Историко-аналитическая оценка развития процессов автоматизации и роботизации в молочном животноводстве // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2023. Т. 17. N1. С. 11-18. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-1-11-18.
3. Лобачевский Я.П., Кирсанов В.В., Кирсанов С.В. Разработка новой технологической схемы доильной платформы Карусель на принципах магнитной левитации// Российская сельскохозяйственная наука. 2024. N2. С. 63-67. DOI: 10.31857/S2500262724020128.
4. Зайцев А.А., Соколова Я.В., Пантина Т.А. Инновационное развитие транспортной системы с применением технологии магнитной левитации // Мир транспорта. 2019. Т. 17. N4 (83). С. 36-45. DOI: 10.30932/1992-3252-2019-17-4-36-45.
5. Лобачевский Я.П., Федоренко В.Ф., Кирсанов В.В. и др. Моделирование взаимодействия магнитных сбоков левитирующей доильной платформы «карусель»// Российская сельскохозяйственная наука. 2025. N2. С. 54-58. DOI: 10.7868/S3034582025020106.
6. Зайцев А.А. Грузовая транспортная платформа на магнитно-левитационной основе: опыт создания // Транспортные системы и технологии. 2015. Т. 1. N2. С. 5-15. DOI: 10.17816/transsyst2015125-15.
7. Вавилов В.Е., Исмагилов Ф.Р., Жеребцов А.А. и др. Исследование магнитных полей в новой конструкции гомополярного магнитного подшипника // Авиакосмическое приборостроение. 2023. N8. С. 50-61. DOI: 10.25791/aviakosmos.8.2023.1357.
8. Гинзбург Б.А., Каминская Т.П., Поляков П.А., Попов В.В. Микроскопическая структура магнитного поля на поверхности постоянного магнита // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2018. Т. 82. N3. С. 226-231. DOI: 10.7868/S0367676518020187.
9. Ткачев А.Н., Пашковский А.В., Черноиван Д.Н. и др. Моделирование магнитного поля в нелинейных ферромагнитных средах с использованием блочных элементов и их схем замещения // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2020. Т. 63. N2-3. С. 44-54. DOI: 10.17213/0136-3360-2020-2-3-44-54.
10. Антонов Ю.Ф. Устройство левитации и боковой стабилизации на базе ленточного высокотемпературного сверхпроводника второго поколения // Транспортные системы и технологии. 2019. Т. 5. N4. С. 115-123. DOI: 10.17816/transsyst201954115-123.
11. Зайцев А.А., Соколова Я.В., Фиронов А.Н. Магнитная левитация – мировой тренд транспортных технологий // Железнодорожный транспорт. 2019. N3. С. 54-58. EDN: YYTOGD.
12. Гинзбург Б.А., Каминская Т.П., Поляков П.А. и др. Микроскопическая структура магнитного поля на поверхности постоянного магнита // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2018. Т. 82. N2. С. 226-231. DOI: 10.7868/S0367676518020187.
13. Шкаруба В.А., Брагин А.В., Волков А.А. и др. Сверхпроводящие многополюсные вигглеры для генерации синхротронного излучения в ИЯФ СО РАН // Письма в журнал физики элементарных частиц и атомного ядра. 2020. Т. 17. N4. С. 567-575. EDN: OCBKSQ.

REFERENCES

1. Kirsanov V.V., Fedorenko V.F., Kirsanov S.V. Magneto-static calculation of a levitating rotating milking platform carousel on permanent magnets. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2024. N6 (324). 29-32 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2024-6-29-32.
2. Morozov N.M., Kirsanov V.V., Tsench Yu.S. Historical and analytical assessment of automation and robotization for milking processes. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023. Vol. 17. N1. 11-18 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-1-11-18.
3. Lobachevsky Ya.P., Kirsanov V.V., Kirsanov S.V. Development of a new technological scheme of the carousel milking

- platform based on the principles of magnetic levitation. *Russian Agricultural Sciences*. 2024. N2. 63-67 (In Russian). DOI: 10.31857/S2500262724020128.
4. Zaitsev A.A. Sokolova Ya.V., Pantina T.A. Innovative development of transport system using magnetic levitation technology. *World of Transport and Transportation*. 2019. Vol. 17. N4 (83). 36-45 (In Russian). DOI: 10.30932/1992-3252-2019-17-4-36-45.
 5. Kirsanov V.V. Simulation of the interaction of magnetic assemblies of the "Karousel" levitating milking platform. *Russian Agricultural Sciences*. 2025. N2. 54-58 (In Russian). DOI: 10.7868/S3034582025020106.
 6. Zaitsev A.A. Cargo-carrying transport platform based on magnetic levitation: experience of creation. *Transportation Systems and Technology*. 2015. Vol. 1. N2. 5-15 (In Russian). DOI: 10.17816/transsyst2015125-15.
 7. Vavilov V.E., Ismagilov F.R., Zhrebtssov A.A. et al. Investigation of magnetic fields at new construction of a homopolaris magnetic bearing. *Aerospace Instrumentation*. 2023. N8. 50-61 (In Russian). DOI: 10.25791/aviakosmos.8.2023.1357.
 8. Ginzburg B.A., Kaminskaya T.P., Polyakov P.A., Popov V.V. Microscopic structure of the magnetic field on the surface of a permanent magnet. *Izvestiya of the Russian Academy of Sciences. Series Physical*. 2018. Vol. 82. N3. 226-231 (In Russian). DOI: 10.7868/S0367676518020187.
 9. Tkachev A.N., Pashkovsky A.V., Chernov D.N. et al. Modeling of a magnetic field in nonlinear ferromagnetic media using block elements and their replacement schemes. *Russian Electromechanics*. 2020. Vol. 63. N2-3. 44-54 (In Russian). DOI: 10.17213/0136-3360-2020-2-3-44-54.
 10. Antonov Yu.F. Levitation and lateral stabilization device based on a second-generation high-temperature superconductor. *Transport Systems and Technologies*. 2019. Vol. 5. N4. 115-123 (In Russian). DOI: 10.17816/transsyst201954115-123.
 11. Zaitsev A.A., Sokolova Ya.V., Fironov A.N. Magnetic levitation – a global trend in transport technologies. *Railway transport*. 2019. N3. 54-58 (In Russian). EDN: YYTOGD.
 12. Ginzburg B.A., Kaminskaya T.P., Polyakov P.A. et al. Microstructure of the magnetic field on the surface of a permanent magnet. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2018. Vol. 82. N2. 226-231 (In Russian). DOI: 10.7868/S0367676518020187.
 13. Shkaruba V.A., Bragin A.V., Volkov A.A. et al. Superconducting multipole wigglers for generating synchrotron radiation at the Budker institute of nuclear physics. *Physics of Elementary Particles and Atomic Nuclei, Letters*. 2020. Vol. 17. N4. 567-575 (In Russian). EDN: OCBKSQ.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Кирсанов В.В. – формулирование основной концепции статьи, написание введения, методической части и выводов;

Иванов Ю.А. – участие в обосновании и написании методической части статьи и выводов;

Кирсанов С.В. – разработка эскизных проектов левитирующей модели карусели, подготовка графических и табличных материалов, обработка экспериментальных данных;

Рузин С.С. – участие в написании текста статьи, подборе и анализе литературы, изготовлении отдельных деталей для сборки левитирующей модели карусели.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Kirsanov V.V. – formulating the main concept of the manuscript; authoring the introduction, methodology and conclusions sections;

Ivanov Yu.A. – contribution to the justification and writing the methodology and conclusions sections;

Kirsanov S.V. – developing draft designs for the levitating carousel model; preparing graphical and tabular materials; processing experimental data;

Ruzin S.S. – participation in manuscript writing; selection and analysis of relevant literature; fabricating individual components for assembling the levitating carousel model.

The authors read and approved the final manuscript.