

С. А. Казначеев, Т. С. Зименкова, А. С. Краснов

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ СБОРОК МАГНИТНЫХ ПОЛЮСОВ НА ОСНОВЕ МАССИВА ХАЛЬБАХА

Дата поступления: 23.03.2017

Решение о публикации: 27.03.2017

Дата публикации: 30.04.2017

**Аннотация:** Одними из наиболее актуальных задач современных транспортных систем с точки зрения роста объемов и повышения качества, грузовых и пассажирских перевозок во всем мире, на сегодняшний день являются повышение скорости перевозок и снижение затрат энергетических ресурсов, связанных с этими перевозками. Данные задачи могут быть решены с помощью внедрения высокоскоростных, в частности магнитолевитационных транспортных систем. В данной статье приводятся описание и сравнительный анализ вариантов сборок магнитных полюсов на основе массива Хальбаха. Актуальность проведенных исследований подтверждена мировым опытом использования постоянных магнитов в области магнитолевитационных технологий в различных отраслях науки и техники.

**Целью** проведения исследований и сравнительного анализа вариантов сборок магнитных полюсов на основе массива Хальбаха является получение данных о возможности применения таких вариантов сборок в системах левитации магнитолевитационного транспорта [7], а также наглядное доказательство того, что математическое моделирование не позволяет в полной мере описать возникающие явления

В рассматриваемой статье использованы эмпирические **методы** исследования.

Полученные **результаты** найдут свое применение при разработке конструкции, которая снизит как массогабаритные показатели, так и потребление энергии системы левитации. Практическая значимость полученных исследований заключается в возможности применения рассмотренных принципов практически в любых магнитолевитационных транспортных системах.

**Заключение:** На основании проведенных экспериментальных исследований получены данные о силах левитации и силах торможения, позволяющих сделать выводы о целесообразности применения данных вариантов сборок.

**Ключевые слова:** Магнитолевитационный транспорт, магнитолевитационный экспериментальный стенд, магнитный полюс, массив Хальбаха.

---

Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках научного проекта офи\_м\_РЖД № 17-20-04121.

**Sergey A. Kaznacheev, Tatyana S. Zimenkova, Anton S. Krasnov**

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ СБОРОК МАГНИТНЫХ ПОЛЮСОВ НА ОСНОВЕ МАССИВА ХАЛЬБАХА

**Abstract:** Today, one of the most urgent tasks of modern transport systems in terms of volume growth and quality improvement, freight and passenger transportation worldwide, is to increase the speed of transportation and reduce the cost of energy resources associated with these transportations. These tasks can be solved by introducing high-speed, in particular magnetic-lev- el transport systems. In this paper, we describe and compare the variants of assemblies of magnetic poles based on the Halbach massif. The relevance of the studies carried out is confirmed by the world experience in the use of permanent magnets in the field of magneto-levitation technologies in various branches of science and technology.

**The purpose** of the research and comparative analysis of variants of assemblies of magnetic poles based on the Halbach massif is to obtain data on the possibility of using such assembly variants in levitation systems of magnetic-leav- ing transport [7], as well as visual proof that mathematical modeling does not allow to fully describe emerging phenomena

In this article, we use empirical methods of investigation.

**The results** obtained will find their application in the design of the design, which will reduce both the mass-dimensions and the energy consumption of the levitation system. The practical significance of the studies obtained lies in the possibility of applying the principles considered practically in any magnetic-levitation transport systems.

**Conclusion:** Based on the experimental studies, data were obtained on the levitation forces and the braking forces, which make it possible to draw conclusions about the advisability of using these assembly variants.

**Key words:** Maglev transport, maglev experimental stand, lateral stabilization, magnetic pole, Halbah array.

### Введение

Одной из главных и наиболее значимых на сегодняшний день задач [2, 8] при создании современного магнитолевитационного транспорта является снижение как массогабаритных показателей транспортных единиц, так и снижение потребления энергии, затрачиваемой на обеспечение левитации, боковой стабилизации и движения [4, 5, 6]. Обозначенная задача может быть решена путем использования в основных системах левитации магнитолевитационного транспорта постоянных магнитов [14, 15]. Используемые в настоящее время постоянные магниты NdFeB обладают всеми необходимыми качествами для использования их при решении данной задачи. В данной статье описаны три варианта сборок магнитных полюсов на основании массива Хальбаха [11, 13, 16] с применением постоянных магнитов NdFeB класса N45 [12]. Подтверждены результаты экспериментальных исследований сборок полюсов из элементарных магнитов по схеме, обеспечивающих практически удвоение

значения магнитной индукции в рабочей зоне и весьма малых магнитных полей рассеяния.

## 1. Описание сборок магнитных полюсов

Все рассматриваемые сборки магнитных полюсов строились по классической схеме массива Хальбаха (рис.1). Применение такой схемы позволяет получить максимальное значение магнитного поля в рабочем зазоре и минимальные значения полей рассеяния [1].

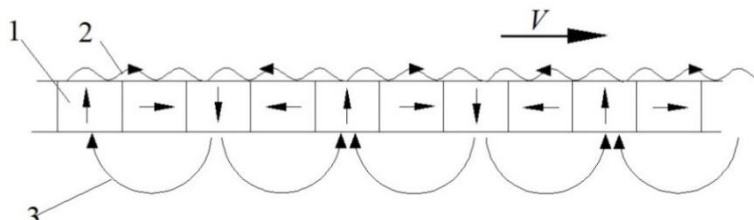


Рис. 1. Схематическое изображение простейшей сборки из постоянных магнитов:  
1 - простейшая сборка из постоянных магнитов; 2 – магнитное поле рассеяния;  
3 – магнитное поле в рабочем зазоре

На рис. 2 - 4 приведены схемы рассматриваемых сборок и распределение магнитных силовых линий, полученных посредством визуализатора магнитного поля [9].

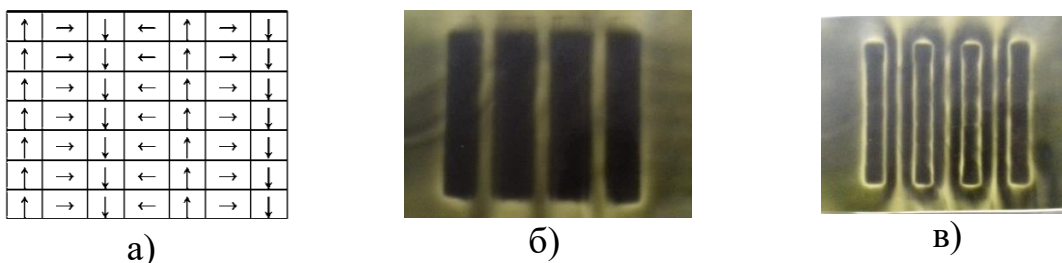


Рис. 2. Упрощенная сборка Хальбаха

- а) - схема сборки магнитов;  
б) - магнитные силовые линии рабочей стороны магнитного полюса;  
в) - магнитные силовые линии обратной стороны магнитного полюса

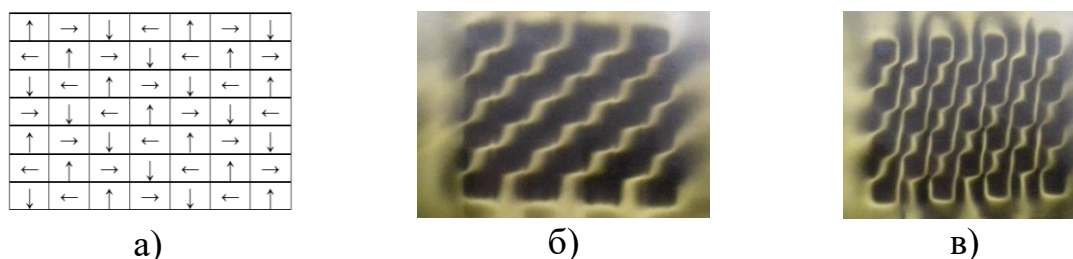


Рис. 3. Сборка №1 на основе массива Хальбаха

- а) - схема сборки магнитов;  
б) - магнитные силовые линии рабочей стороны магнитного полюса;  
в) - магнитные силовые линии обратной стороны магнитного полюса

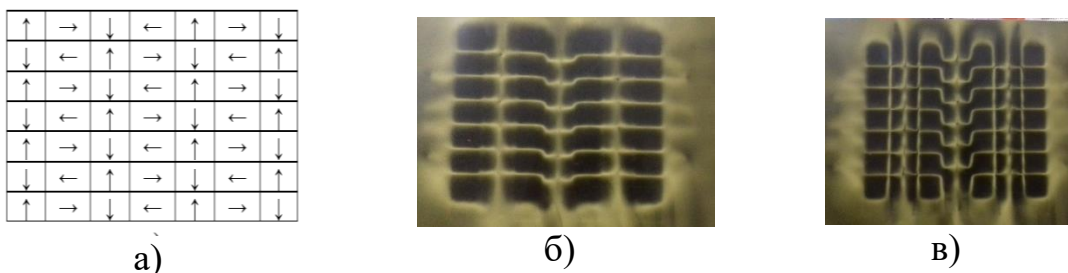


Рис. 4. Сборка №2 на основе массива Хальбаха

- а) - схема сборки магнитов;  
 б) - магнитные силовые линии рабочей стороны магнитного полюса;  
 в) - магнитные силовые линии обратной стороны магнитного полюса

## 2. Описание экспериментального стенда

Существуют различные средства и методы измерений магнитных параметров материалов [3].

Описанные исследования проводились на магнитолевитационном экспериментальном стенде, общий вид которого приведен на рис. 5.

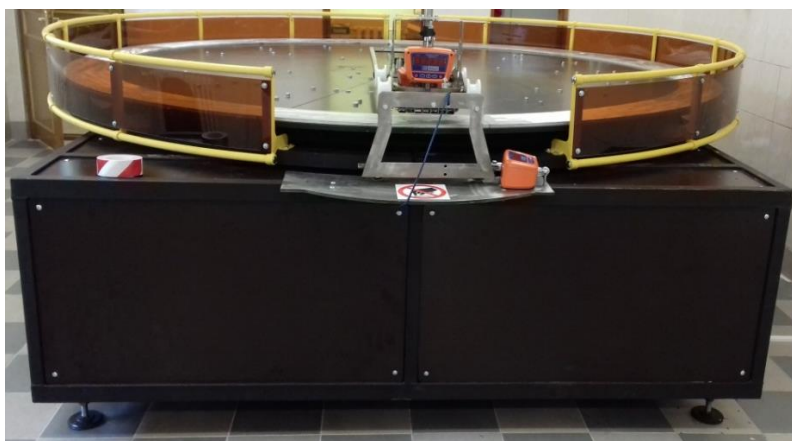


Рис. 5. Общий вид экспериментального стенда, установленного в НИЛ «Магнитоэлектрические транспортные системы»

Стенд состоит из вращающегося диска диаметром 3 м, на котором крепится трековый модуль, изготовленный из сплошного листа алюминия толщиной 10 мм. Вращение обеспечивается двигателем, установленным под диском, мощностью 3,5 кВт.

Исследуемый образец сборки магнитного полюса располагается непосредственно над трековым модулем. Регулирование скорости вращения диска осуществляется с помощью преобразователя частоты. В состав приборного оснащения экспериментальной установки входят датчики усилия, с помощью которых фиксируются силы, действующие на исследуемую сборку магнитного полюса вследствие возникновения динамической левитации.

### 3. Экспериментальные исследования упрощенной сборки Хальбаха

Экспериментальные исследования проводились по схемам, показанным на рис. 6. Целью данных исследований являлось получение сравнительных характеристик по показателям подъемная сила, сила торможения и сила поперечного сдвига.

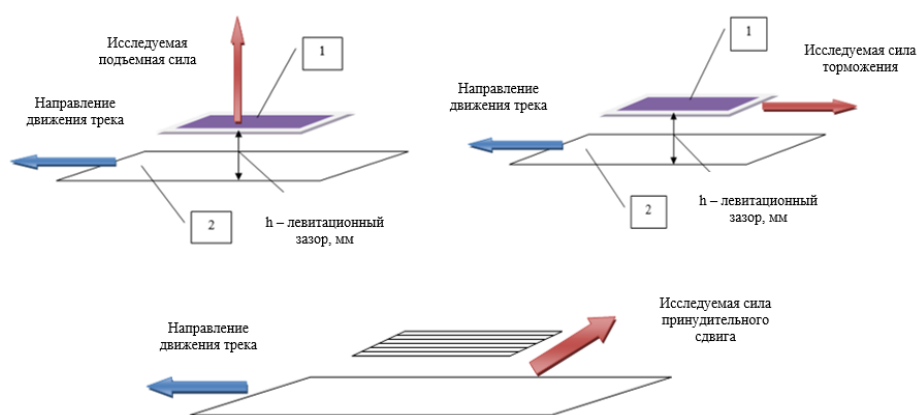


Рис. 6. Схемы экспериментальных исследований

1 – исследуемая сборка магнитного полюса; 2 – трековый левитационный модуль

В ходе проведения исследований получены следующие результаты по упрощенной сборке Хальбаха:

1. При левитационном зазоре от 6 до 13 мм величина силы торможения не позволяет асинхронному двигателю мощностью 3 кВт, оборудованным редуктором с передаточным числом 7,5 к 1 создать скорость движения выше 6 - 9 м/с (рис. 7). При достижении данных скоростей система безопасности и управления двигателя производит аварийное отключение из-за превышения допустимых нагрузок;

2. При зазоре между трековым модулем и магнитным полюсом от 16 мм и выше наблюдается снижение сил сопротивления при достижении скорости движения 12 м/с;

3. При достижении скорости 12-13 м/с наблюдается существенное снижение сил сопротивления движению;

4. При скорости движения свыше 13 м/с, характеристика снижения сил торможения приобретает более стабильный и пологий вид, продолжая при этом снижаться;

5. Процесс левитации при зазоре между путевым треком и сборкой магнитного полюса в 16 мм начинается при скорости 7 ... 7,5 м/с (рис. 8);

6. При малых скоростях движения сила торможения создает "обратный" эффект и жестко закрепленный образец сборки магнитного полюса притягивает вслед за движущимся треком.

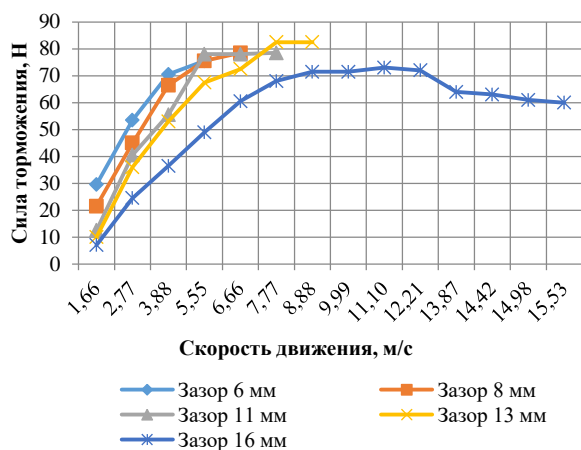


Рис.7. Зависимость силы торможения при изменении левитационного зазора и скорости движения магнитного полюса

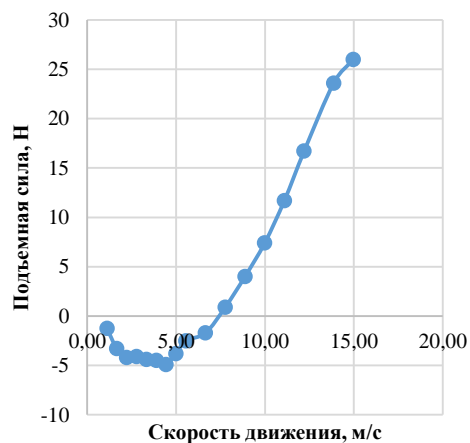


Рис. 8. Зависимость подъемной силы от скорости движения полюса при левитационном зазоре 16 мм

С увеличением скорости проявляется выраженный эффект демпфирования (рис. 9), который не является стабилизирующей силой, так как не возвращает конструкцию в исходную точку.

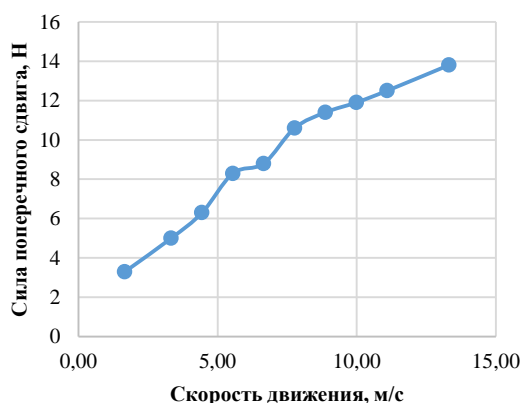


Рис. 9. Зависимость изменения силы поперечного сдвига от скорости движения магнитного полюса (силовые линии вдоль вектора движения)

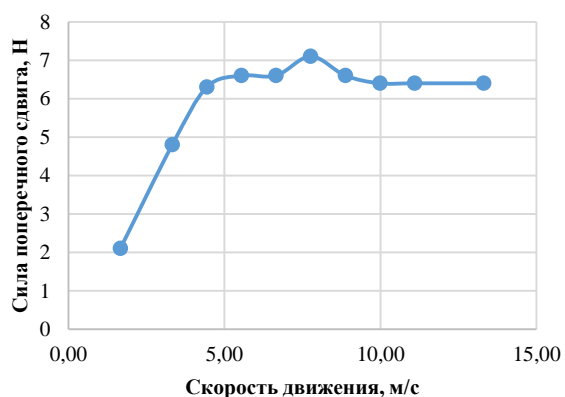


Рис. 10. Зависимость изменения силы поперечного сдвига от скорости движения магнитного полюса (силовые линии поперек вектора движения)

При увеличении скорости до 6 м/с наблюдается рост силы поперечного принудительного сдвига (рис.10). По достижении скорости 7,7 м/с и выше характеристика зависимости силы поперечного сдвига от скорости движения принимает пологий вид.

В ходе эксперимента доказано, что математическое моделирование не позволяет в полной мере описать возникающие явления. Как видно из рис.11 [10], при малых скоростях подъемная сила нулевая, однако при эмпирических исследованиях, подъемная сила отрицательная в том же

диапазоне скоростей, вследствие «притягивания» полюса под действием возникающих сил торможения.

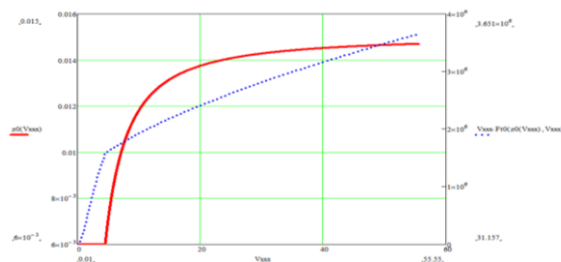


Рис. 11. Зависимость подъемной силы и мощности потерь от скорости движения

#### 4. Экспериментальные исследования сборок магнитных полюсов №1 и №2

При расположении магнитного полюса №1 над треком таким образом, чтобы магнитные силовые линии располагались по диагонали к осевой линии трека (при этом трубки с магнитами расположены вдоль осевой линии трека), подъемная сила возникает при скорости движения от 9 м/с, но она недостаточна применительно к магнитолевитационному транспорту.

В зависимости от воздушного зазора между полюсом и треком показатели изменяются не существенно.

При расположении магнитного полюса над треком таким образом, чтобы магнитные силовые линии располагались параллельно осевой линии трека, незначительная подъемная сила возникает при скорости движения от 6,7 м/с. Полагается, что такие значения сил левитации малы, чтобы рассматривать их в качестве основной подъемной силы магнитолевитационного транспорта. Силы стабилизации и силы торможения минимальны.

С увеличением воздушного зазора между магнитным полюсом и трековым модулем показатели силы левитации уменьшаются, показатели силы стабилизации и торможения также ухудшаются.

При расположении магнитного полюса над треком таким образом, чтобы магнитные силовые линии располагались перпендикулярно осевой линии, подъемная сила в ходе всего эксперимента не достигла положительных значений. Силы торможения пропорционально увеличивается с ростом скорости движения, при скорости движения свыше 8 м/с происходит аварийное отключение двигателя. С увеличением воздушного зазора между полюсом и треком показатели силы левитации и стабилизации не изменяются.

При расположении магнитного полюса над треком таким образом, чтобы магнитные силовые линии располагались параллельно осевой линии трека, подъемная сила в ходе всего эксперимента не наблюдалась.

Полученные данные этой серии испытаний говорят о том, что при вышеописанной схеме сборки магнитного полюса и трека работа не возможна ввиду неудовлетворительных значений сил левитации и стабилизации.

Проведя полную серию испытаний со сборкой магнитного полюса №2, все результаты можно назвать отрицательными.

### **Заключение**

В результате проведенных исследований получены данные о целесообразности использования различных вариантов сборок магнитных полюсов. При использовании в качестве путевого трека гладкой алюминиевой полосы рекомендуется использование магнитного полюса собранного на основе классического массива Хальбаха. Применение сборок магнитных полюсов №1 и №2, при использовании такого трекового модуля нецелесообразно, однако данные варианты сборок могут показать положительные результаты при использовании других конструкций путевых треков.

### **Библиографический список**

1. Антонов Ю. Ф. Магнитолевитационная транспортная технология / Ю. Ф. Антонов, А. А. Зайцев // под ред. А. А. Гапановича. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014 г.
2. Бахвалов Ю. А. Транспорт с магнитным подвесом / Ю. А. Бахвалов, В. И. Бочаров, В. А. Винокуров, В. Д. Нагорский. – М.: Машиностроение, 1991.
3. Антонов В. Г. Средства измерений магнитных параметров материалов / В. Г. Антонов, Л. М. Петров, А. П. Щелкин. – Л.: Энергоатомиздат, 1986.
4. Винокуров В. А. Наземный транспорт на новых технологических принципах: Монография / В. А. Винокуров, А. А. Галенко, А. Т. Горелов, А. Н. Фиронов // под ред. В. А. Винокурова. – М.: МИИТ, 2004, часть I – 185 с..
5. Винокуров В. А. Наземный транспорт на новых технологических принципах: Монография / В. А. Винокуров, А. А. Галенко, А. Т. Горелов, А. Н. Фиронов // под ред. В. А. Винокурова. – М.: МИИТ, 2004, часть II. – 140 с.
6. Дзензерский В. А. Высокоскоростной магнитный транспорт с электродинамической левитацией / В. А. Дзензерский, В. И. Омеляненко, С. В. Васильев, В. И. Матин, С. А. Сергеев. – Киев: Наукова думка, 2001.



7. Зайцев А. А. Особенности магнитолевитационной технологии для общественного транспорта / А. А. Зайцев, Ю. Ф. Антонов // Известия ПГУПС. – 2012. – Вып. 3. – с. 11-18.
8. Кочетков В. М. Теория электродинамической левитации. Основные результаты и дальнейшие задачи / В. М. Кочетков, К. И. Ким, И. И. Трещев // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1981. – №1.
9. Магнитный индикатор – URL: <http://magnet-prof.ru/index.php/Magnitnyiy-indikator/Magnitnyiy-indikator-210x297mm/flypage.tpl.html> (дата обращения: 12.09.2016).
10. НПК «Энергодвижение» / Расчет левитационной опоры // Справка-отчет. Санкт-Петербург, 2016.
11. Пат. 6664880 USA. Inductrack magnet configuration / R. F. Post. – Оpubл. 09.01.2003.
12. Таблица магнитных характеристик неодимовых магнитов (материалов NdFeB) – URL: <http://powermagnet.by/neodimovye-magnityi-harakteristiki> (дата обращения: 28.11.2016).
13. Halbach K., Design of Permanent Multipole Magnets with Oriented Rare Earth Cobalt Material. Nuclear Instruments and Methods. - 1980. - pp. 1-10.
14. Murai T., Fujiwara S. Characteristics of combined propulsion, levitation and guidance system with asymmetric figure between upper and lower coils in EDS, Trans. IEE Jpn., 116-D, 1996, – 128 p.
15. Pope D. Halbach Arrays Enter the Maglev Race. The Industrial Physicist. – 2003. – № 4 – pp. 12-15.
16. Sawada Kazuo. Technological Development of the Superconducting Magnetically Levitated Train. Japanese railway engineering, 2008. – № 160. – pp. 29-33.

## References

1. Antonov Yu. F. & Zaytsev A. A. Magnitolevitatsionnaya transportnaya tekhnologiya [Magnetic Levitation Ttransport Technology]. Moscow, 2014. 476 p.
2. Bahvalov Yu. A. Bocharov V. I., Vinokurov & Nagorskij V. D. Transport s magnitnym podvesom [Transport with magnetic suspension]. Moscow, 1991.
3. Antonov V. G., Petrov L. M., SHCHelkin A. P. Sredstva izmerenij magnitnyh parametrov materialov [Means of measuring magnetic parameters of materials]. Leningrad, 1986.
4. Vinokurov V. A., Galenko A. A., Gorelov A. T. & Fironov A. N. Nazemnyj transport na novyh tekhnologicheskikh principah: Monografiya [Ground transportation on new technological principles: Monograph]. Moscow, 2004, vol. I, 185 p.

5. Vinokurov V. A., Galenko A. A., Gorelov A. T. & Fironov A. N. Nazemnyj transport na novyh tekhnologicheskikh principah: Monografiya [Ground transportation on new technological principles: Monograph]. Moscow, 2004, vol. II, 140 p.
6. Dzenzerskij V. A., Omel'yanenko V. I., Vasil'ev S. V., Matin V. I. & Sergeev S. A. Vysokoskorostnoj magnitnyj transport s ehlektrodinamicheskoj levitaciej [High-speed magnetic transport with electrodynamic levitation]. Kiev, 2001.
7. Zajcev A. A. & Antonov Yu. F. *Izvestiya PGUPS – News of PSTU*, 2012, no. 3. pp. 11–18.
8. Kochetkov V. M., Kim K. I. & Treshchev I. I. *Izv. AN SSSR. EHnergetika i transport – Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Energy and transport*, 1981, №1.
9. Magnitnyj indikator [The magnetic indicator]. URL: <http://magnet-prof.ru/index.php/Magnitnyiy-indikator/Magnitnyiy-indikator-210x297mm/flypage.tpl.html> (12/09/2016)
10. Raschet levitacionnoj opory. Spravka-otchet NPK «EHnergodvizhenie» [Calculation of levitation support. Help-report NPK «EHnergodvizhenie»]. St. Peterburg, 2016.
11. Post R. F. Pat. 6664880 USA. Inductrack magnet configuration (09/01/2003).
12. Tablica magnitnyh harakteristik neodimovyh magnetov (materialov NdFeB) [Table of magnetic characteristics of neodymium magnets (NdFeB materials)]. URL: <http://powermagnet.by/neodimovye-magnity-harakteristiki> (28/11/2016).
13. Halbach K. Design of Permanent Multipole Magnets with Oriented Rare Earth Cobalt Material. *Nuclear Instruments and Methods*, 1980, pp. 1–10.
14. Murai T. & Fujiwara S. Characteristics of combined propulsion, levitation and guidance system with asymmetric figure between upper and lower coils in EDS, *Trans. IEE Jpn.*, 116-D, 1996, 128 p.
15. Pope D. *The Industrial Physicist*, 2003, no. 4, pp. 12–15.
16. Kazuo S. *Japanese railway engineering*, 2008, № 160, pp. 29–33.

**Сведения об авторах:**

КАЗНАЧЕЕВ Сергей Александрович, инженер НИЛ «Магнитоэлектрические транспортные системы» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I  
E-mail: kaznacheeff.serezha@yandex.ru

ЗИМЕНКОВА Татьяна Сергеевна, аспирант, инженер НИЛ «Магнитоэлектрические транспортные системы» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I  
E-mail: tatyana.zimenkova@gmail.com

КРАСНОВ Антон Сергеевич, преподаватель кафедры «Теплотехника»  
Петербургского государственного университета путей сообщения Императора  
Александра I

E-mail: anton.s.krasnov@gmail.com

**Information of authors:**

Sergey A. KAZNACHEEV, eng., Emperor Alexander I Petersburg State Transport University

E-mail: kaznacheeff.serezha@yandex.ru

Tatyana S. ZIMENKOVA, eng., postgraduate student, Emperor Alexander I Petersburg State  
Transport University

E-mail: tatyana.zimenkova@gmail.com

Anton S. KRASNOV, lecturer in "Heat" Emperor Alexander I Petersburg State Transport  
University

E-mail: anton.s.krasnov@gmail.com