

УДК 537.638:536.48

**Ю. Ф. Антонов, А. С. Краснов, Т. С. Зименкова**

Петербургский государственный университет путей сообщения  
Императора Александра I

## **ОХЛАЖДЕНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ**

Дата поступления 12.12.2016

Решение о публикации 16.12.2016

Дата публикации 26.12.2016

**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 возможные способы применения систем охлаждения сверхпроводниковых материалов при разработке перспективных конструкций магнитолевитационных транспортных систем. Актуальность проведенных исследований подтверждена мировым опытом использования высокотемпературных сверхпроводниковых материалов при использовании магнитолевитационных технологий в различных отраслях науки и техники.

**Целью** данной статьи является обобщение существующих на сегодняшний день тенденций развития систем охлаждения низкотемпературных и высокотемпературных сверхпроводниковых устройств. Определение ключевых, стратегических направлений развития технологий в данной области, а также обобщение эксплуатационных особенностей систем с применением низкотемпературных и высокотемпературных сверхпроводниковых устройств.

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

**Результаты**, полученные в ходе проведенных исследований, позволят создать базу для проведения дальнейших исследований, как в области производства сверхпроводниковых материалов, так и в области разработки высокоэффективных систем охлаждения.

Практическая значимость полученных результатов заключается в существенном упрощении проведения дальнейших исследований как в области развития сверхпроводниковой техники и акцентировать внимание на наиболее существенных нерешенных задачах в этой области.

**Заключение:** в статье рассмотрены актуальные вопросы применения систем криостатирования систем с применением НТСП и ВТСП. Рассмотрены существующие на сегодняшний день конструкции систем охлаждения, а также отражены основные перспективные направления развития данной области.

**Ключевые слова:** магнитолевитационные транспортные системы, сверхпроводники, низкотемпературные сверхпроводники, высокотемпературные сверхпроводники, криостат, криокуллер.

**Yury F. Antonov, Anton S. Krasnov, Tatiana S. Zimenkova**

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University

COOLING THE HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTOR MATERIALS MAGNITOLEVITATIONNYH SYSTEMS

**Abstract:** One of the most pressing problems of modern transport systems in terms of volume growth and improve the quality of freight and passenger traffic in the world of today are increasing the traffic speed and decrease energy costs associated with these services. These problems can be solved through the introduction of high-speed, in particular maglev transport systems. This article provides a description and possible applications of cooling superconducting materials in the development of promising structures maglev transport systems. The relevance of the research world experience in the use of high-temperature superconducting materials using maglev technologies in various fields of science and technology.

**The purpose** of this article is to summarize the currently existing cooling systems of tendencies of development of low-temperature and high-temperature superconducting devices. Identify the key strategic directions of development of technologies in this field, as well as the generalization of performance characteristics of systems with low and high temperature superconducting devices.

**Results:** In this article of the used analytical methods. The results obtained in the course of the research, will create the basis for further research in the field of manufacture of superconducting materials and in the development of high-performance cooling systems. The practical significance of the results is the significant simplification of further research in the field of superconducting technology and focus on the most important unsolved problems in this area.

**Conclusions:** The article deals with current issues of application systems cryostatting LTS and HTS systems using high-temperature superconductors. The existing to date design of cooling systems, as well as highlights of the promising directions of development of this area.

**Keywords:** maglev transport systems, superconductors, low-temperature superconductors, high- temperature superconductors, kriokooller.

## Введение

Наиболее перспективным направлением при разработке магнитолевитационных транспортных систем, является использование сверхпроводниковых материалов. Использование таких материалов сопряжено с необходимостью постоянного поддержания стабильных низких температур в различных условиях эксплуатации, в связи с выделением большого количества тепловой энергии при эксплуатации устройств на базе сверхпроводников. Проблема влияния температуры заключается в снижении критического тока сверхпроводимости даже при незначительном увеличении температуры материала, а так же неустойчивость свойств устройств, при изменении его фактической

температуры вне критического диапазона. Ниже описаны особенности условий эксплуатации низкотемпературных сверхпроводников (НТСП) и высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП), а так же возможные способы обеспечения стабильных низких температур при работе данных систем.

## **1. Особенности температурных режимов работы сверхпроводников**

Подробное описание как НТСП и ВТСП приведено в [1]. Основным отличием данных материалов является температурный диапазон их эксплуатации и жесткие требования, как по объему, так и по скорости отводимых избытков тепловой энергии, что в свою очередь влечет за собой высокие требования, предъявляемые к системам охлаждения таких устройств.

В процессе эксплуатации и при разработке устройств с применением сверхпроводников рассматриваются следующие критерии, связанные с обеспечением температурных режимов:

1. Динамическая стабилизация, нарушение которой может приводить к существенным локальным перегревам. В данном случае задача системы охлаждения сводится к обеспечению превышения скорости тепловой диффузии над скоростью магнитной диффузии. Это достигается комплексным решением – применением систем криостатирования и конструктивными особенностями сверхпроводников.

2. Стационарная стабилизация заключается, в том числе в своевременном отводе тепловой энергии из нормальной зоны в криогенную среду. Сложность данных систем заключается в недопущении «кризиса кипения» криоагента, так как это в разы снижает интенсивность теплообмена.

3. Недопущение эффекта деградации – эффекта снижения критического тока магнитной системы по отношению к критическому току «короткого образца». Этот эффект может возникать при недостаточном теплоотводе, так как при этом локально возникшая нормальная зона может распространяться по всей обмотке.

Основным отличием НТСП от ВТСП является температура возникновения критического тока. В связи с этим в большинстве систем охлаждения НТСП в качестве криогенных жидкостей используется жидкий гелий. Использование данной криогенной жидкости позволяет обеспечить температурный режим порядка 4-5 К. Однако эти системы сложны в эксплуатации, небезопасны и требуют огромных эксплуатационных расходов. Решением задачи, связанной с повышением эффективности использования сверхпроводников при разработке современных магнитолевитационных транспортных систем может быть переход от

НТСП к ВТСП. Применение ВТСП позволит повысить рабочие температуры до азотных (77 К). Применение в качестве хладагента жидкого азота имеет ряд неоспоримых преимуществ. Сравнительный анализ характеристик жидкого гелия и жидкого азота приведен в таблице 1.

Таблица 1. Теплофизические свойства хладагентов

| п/п | Параметр  | Ед. изм.           | Жидкий гелий | Жидкий азот |
|-----|---|--------------------|--------------|-------------|
|     | Скрытая теплота парообразования   | МДж/м <sup>3</sup> | 2,58         | 161         |
|     | Тепловой поток  | кВт/м <sup>2</sup> | 9...10       | 115...180   |
|     | Допустимый перепад температур в криогенной зоне                                       | К                  | 0,5...1,0    | 6...18      |
|     | Коэффициент затрат мощности на компенсацию притока тепловой энергии в криогенную зону | -                  | 450...480    | 8...12      |

Основные требования по температурным режимам к современным обмоточным материалам из ВТСП приведены на рисунке 1.

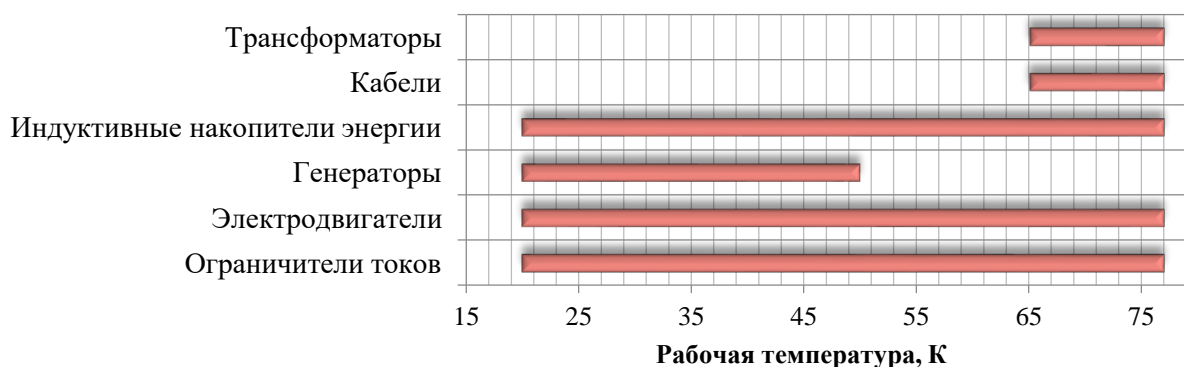


Рис. 1. Температурные диапазоны обмоточных материалов из ВТСП

Как видно из графика, приведенного на рисунке 1 температурные диапазоны большинства устройств с применением современных высокотемпературных материалов укладываются в азотный диапазон.

Таким образом, наиболее оптимальные параметры работы систем с применением ВТСП могут быть достигнуты применением систем охлаждения на основе жидкого азота.

## 2. Способы охлаждения ВТСП

Процесс создания сверхпроводящих магнитных систем является сложной и многоуровневой задачей. Этот процесс охватывает ряд смежных областей, таких как изготовление сверхпроводящих материалов, разработка конструкции криогенных систем охлаждения, выбор хладагента

и др. От правильного выбора обмоточного материала для сверхпроводниковой магнитной системы - катушка, секция или модуль любой формы и назначения, зависят: конструкция и технология намотки ее модулей, конструкция криостата, размещение и тип электрических соединений модулей, способы их крепления, межвитковая и корпусная изоляция, криогенное охлаждение, устройства ввода тока, диагностики и защиты магнитной системы - в конечном итоге эффективная и надежная работа сверхпроводникового комплекса.

Процесс получения жидкого гелия как криоагента для систем охлаждения НТСП довольно сложен и дорогостоящий. Общая схема установки по производству жидкого гелия приведена на рис. 2. Производство жидкого гелия в промышленных масштабах на сегодняшний день довольно затруднительно. Преимущества использования жидкого гелия - возможность получения низких температур порядка 4 - 5 К. К недостаткам можно отнести: Сложность и дороговизну процесса получения жидкого гелия, а также сложность и дороговизна изготовления и эксплуатации систем охлаждения.



Рис. 2. Принципиальная схема получения жидкого гелия  
1 – Ожижитель; 2 – Компрессор; 3 – Маслоотделитель; 4 – Ресивер; 5 - Контроллер давления; 6,7 – Дьюары; 8 – Осушитель; 9 -Главный контроллер; 10 - Дожимающий компрессор; 11 - Рампа с баллонами; 12 - Мягкий газгольдер газообразного гелия

Процесс получения жидкого азота по сравнению с процессом получения жидкого гелия более прост (рис. 3) и находит промышленное применение в различных областях техники. Кроме того, в состав атмосферного воздуха входит 70% азота, что делает его более интересным с точки зрения стоимости.

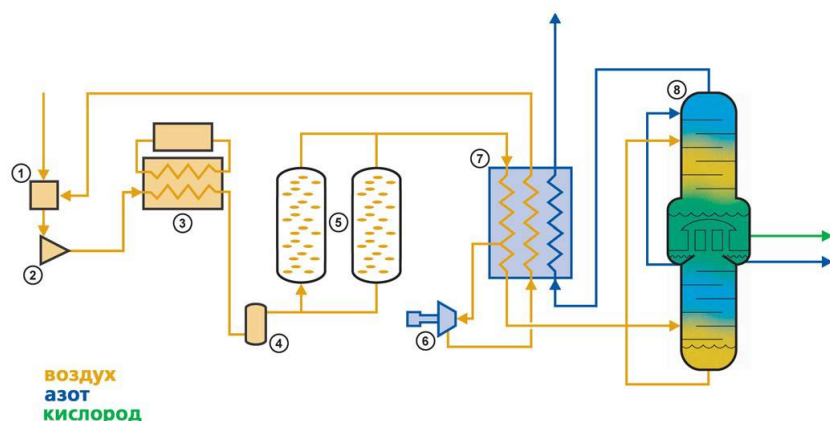


Рис. 3. Принципиальная схема получения жидкого азота

- 1 - Вход в воздушный фильтр; 2 - Воздушный компрессор; 3 - Система охлаждения; 4 - Сепаратор воздух/вода; 5 - Система очистки воздуха; 6 - Турбодетандер; 7 - Главный теплообменник; 8 - Колонна дистилляции

Наиболее интересными и перспективными для дальнейших исследований и усовершенствования конструкции являются многоконтурные системы криогенного обеспечения высокотемпературных сверхпроводниковых устройств. Схема такого устройства показана на рис.4.

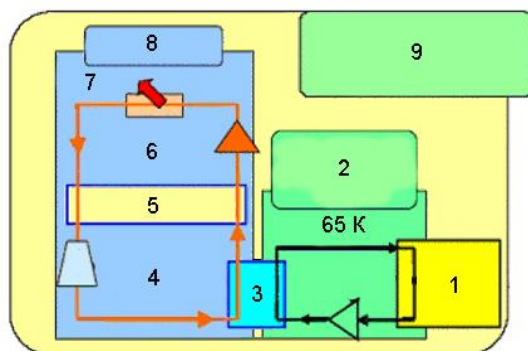


Рис. 4. Схема двухконтурного криогенного обеспечения высокотемпературных сверхпроводниковых устройств

- 1 – сверхпроводниковое устройство; 2 – система циркуляции переохлажденного жидкого азота; 3 – теплообменник; 4 – турбодетандер; 5 – главный теплообменник; 6 – компрессор; 7 – отвод тепла; 8 – неоновый криокулер; 9 – пульт управления

Особенностью данных систем относительно применения в Маглев системах является автономность и возможность длительной эксплуатации без дозаправки хладагента. Такие системы могут быть изготовлены в модульном исполнении, что конструктивно облегчает установку оборудования на подвижной состав.

Наиболее распространенные марки криокуллеров, которые могут использоваться в системах Маглев, приведены в табл. 2.

Таблица 2. Потребные марки криокуллеров

| Марка криокуллера                         | Рабочая температура | Холодо-производ-ть      | Потребляема я мощность |
|---|---------------------|-------------------------|------------------------|
| Рабочая температура 4,2 К                 |                     |                         |                        |
| Cryomech PT415                            | 4,2/45 К            | 1,5/40 Вт               | 10,5 кВт               |
| SHI Cryogenics RDK-415                    | 4,2/50 К            | 1,5/35 Вт               | 7,2 кВт                |
| Рабочая температура 20-30 К               |                     |                         |                        |
| Leybold Coldpower 140 T                   | 20 К                | 20 Вт                   | 6,2 кВт                |
| Leybold Coolpower 10 MD                   | 20/80 К             | 18/110 Вт               | 6,5 кВт                |
| Striling Cryogenics LPC-1T RL (LPC-8T RL) | 26 К                | 105 Вт (820 Вт)         | 11 кВт (90 кВт)        |
| Striling Cryogenics GPC-1 (GPC-4)         | 20/80 К             | 50/400 Вт (200/1600 Вт) | 11 кВт (45 кВт)        |
| Рабочая температура 77 К                  |                     |                         |                        |
| Cryomech AL600                            | 80 К                | 620 Вт                  | 15,5 кВт               |
| Q-drive 2S362K                            | 77 К                | 1000 Вт                 | 21 кВт                 |
| Striling Cryogenics LPC-1 FF (LPC-8 FF)   | 77 К                | 750 Вт (7400 Вт)        | 12 кВт (98 кВт)        |
| Striling Cryogenics LPC-1 RL (LPC-8 RL)   | 77 К                | 1000 Вт (8000 Вт)       | 11 кВт (88 кВт)        |

### 3. Перспективные направления разработки систем ВТСП

Кроме того, важной задачей развития криосистем является разработка эффективной системы охлаждения токовыводов (рис. 5).

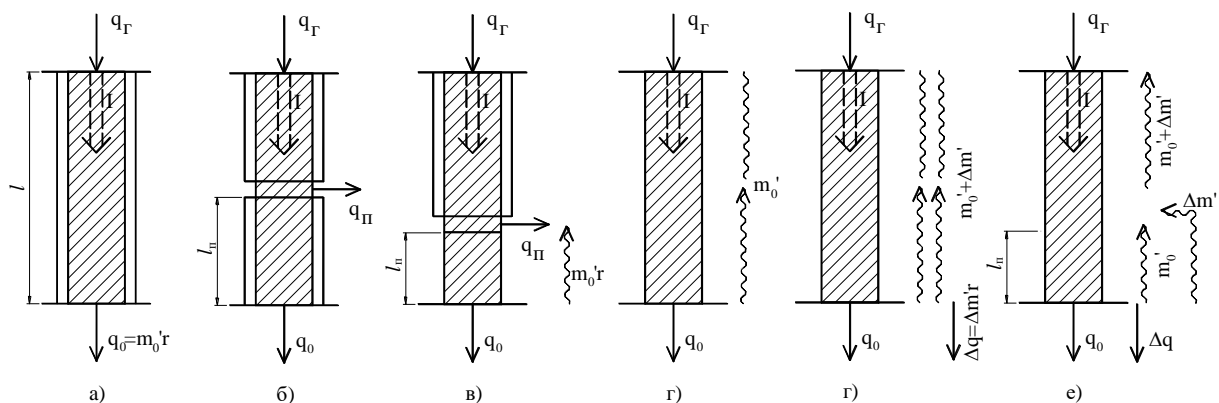


Рис. 5. Схемы охлаждения токовыводов

Данная задача является немало важной, так как по токовыводам осуществляется большой приток тепловой энергии из внешней среды. Критериями тепловой оптимизации являются: наименьший теплоприток по токовыводу в криогенную зону; минимальные энергетические затраты на охлаждение токовывода. Перспективные направления исследований: оптимальные температурный профиль, тепловой поток, расход криоагента по длине токовывода.

В качестве критериев тепловой оптимизации тоководов можно принять следующие:

- наименьший теплоприток по тоководу в криогенную зону;
- минимальные энергетические затраты на охлаждение токовода.

В настоящее время наиболее актуальными и перспективными являются следующие направления модернизации и оптимизации систем охлаждения сверхпроводниковых материалов и устройств:

1. Снижение массогабаритных характеристик систем криостатирования;
2. Снижение стоимости производства жидкого гелия и жидкого азота;
3. Снижение энергозатрат в системах охлаждения ВТСП;
4. Разработка комплексных систем охлаждения и производства хладагентов, а также создание автономных систем криостатирования.

### **Заключение**

В статье рассмотрены актуальные вопросы применения систем криостатирования систем с применением НТСП и ВТСП. Рассмотрены существующие на сегодняшний день конструкции систем охлаждения, а также отражены основные перспективные направления развития данной области.

### **Библиографический список**

1. Магнитолевитационная транспортная технология / Ю. Ф. Антонов, А. А. Зайцев / Под ред. В. А. Гапановича. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 476 с.
2. Бахвалов Ю. А. Транспорт с магнитным подвесом / Ю. А. Бахвалов, В. И. Бочаров, В. А. Винокуров В. Д. Нагорский. М.: Машиностроение. – 1991. – 320 с.
3. Беляков В. П. Газоохлаждаемые тоководы криоэнергетических установок / В. П. Беляков, С. П. Горбачев, В. К. Матющенко // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1982. – № 3. – С. 106-113.
4. Брехна Г. Сверхпроводящие машины и устройства / Г. Брехна М.: Мир. – 1976. – 704 с.
5. Бродянский В. М. Энергетические затраты на компенсацию теплопритоков по токовым сверхпроводящим устройствам / В. М. Бродянский, Л. И. Ройзен, Р. И. Абрамов // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1971. – № 6. – С. 126-128.
6. Высоцкий В. С. Тепловые свойства и критические токи сверхпроводящих ключей-перемычек / В. С. Высоцкий, А. А. Конюхов // Тр. ФИАН. – 1984. – Т. 150. – С. 57-69.
7. Глебов И. А. Проблема ввода тока в сверхпроводниковые



устройства / И. А. Глебов, В. Н. Шахтарин, Ю. Ф. Антонов. Л.: Наука. – 1985. – 208 с.

8. Зенкевич В. Б. Сверхпроводники в судовой технике / В. Б. Зенкевич, Е. Я. Казовский, М. Г. Кремлев, П. П. Орлов, В. В. Сычев, М. И. Федосов, В. Н. Шахтарин. Л.: «Судостроение», 1971. – 256 с.

9. Ким К. К. Системы электродвижения с использованием магнитного подвеса и сверхпроводимости / К. К. Ким. М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте» – 2007. – 360 с.

10. Ковалев Л. К. Магнитные подвесы с использованием объемных ВТСП элементов для перспективных систем высокоскоростного наземного транспорта / Л. К. Ковалев, С. М.-А. Конев, В. Н. Полтавец, М. В. Гончаров, Р. И. Ильясов // Электричество. – 2007. – № 6.

11. Ковалев Л. К. Электромеханические преобразователи на основе массивных высокотемпературных сверхпроводников / Л. К. Ковалев, К. Л. Ковалев, С. М.-А. Конев, В. Т. Пенкин, В. Н. Полтавец. – М.: МАИ-ПРИНТ, 2008. – 440 с.

## References

1. Antonov Yu. F. & Zaytsev A. A. Magnitolevitatsionnaya transportnaya tekhnologiya [Magnetic Levitation Transport Technology]. Moscow, 2014. 476 p.

2. Bahvalov Yu. A., Bocharov V. I., Vinokurov V. A. & Nagorskij V. D. Transport s magnitnym podvesom [Vehicles with Magnetic Suspension]. Moscow, 1991. 320 p.

3. Belyakov V. P., Gorbachev S. P. & Matyushchenkov V. K. *Izv. AN SSSR. Ehnergetika i transport – Math. USSR Academy of Sciences. Energy and Transport*, 1982, no. 3, pp. 106–113.

4. Brekhna G. Sverhprovodyashchie mashiny i ustrojstva [Superconducting Machines and Devices]. Moscow, 1976. 704 pp.

5. Brodyanskij V. M., Rojzen L. I. & Abramov R. I. *Izv. AN SSSR. Ehnergetika i transport – Math. USSR Academy of Sciences. Energy and transport*, 1971, no. 6, pp. 126–128.

6. Vysockij V. S. & Konyuhov A. A. *Tr. FIAN – Tr. LPI*, 1984, vol. 150, pp. 57–69.

7. Glebov I. A., Shahtarin V. N. & Antonov Yu. F. Problema vvoda toka v sverhprovodnikovye ustrojstva [Current Input Problem in Superconducting Devices]. Leningrad, 1985. 208 p.

8. Zenkevich V. B., Kazovskij E. YaA., Kremlev M. G., Orlov P. P., Sychev V. V., Fedosov M. I. & Shahtarin V. N. Sverhprovodniki v sudovoj tekhnike [Superconductors in Shipbuilding]. Leningrad, 1971. 256 p.

9. Kim K. K. Sistemy ehlektrodvizheniya s ispol'zovaniem magnitnogo podvesa i sverhprovodimosti [Propulsion Systems with Magnetic Suspension

and Superconductivity]. Moscow, 2007. 360 p.

10. Kovalev L. K., Konev S. M.-A., Poltavec V. N., Goncharov M. V. & П'yasov R. I. *Ehlektrichestvo – Electricity*, 2007, no. 6.

11. Kovalev L. K., Kovalev K. L., Konev S. M.-A., Penkin V. T. & Poltavec V. N. *Ehlektromekhanicheskie preobrazovateli na osnove massivnyh vysokotemperaturnykh sverhprovodnikov [Electromechanical Converters Based on the Massive High-Temperature Superconductors]*. Moscow, 2008. 440 p.

**Сведения об авторах:**

АНТОНОВ Юрий Федорович, профессор кафедры «Электромеханические комплексы и системы», заведующий НИЛ «МЭТС» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I

E-mail: yuri-anto@yandex.ru

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

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

ЗИМЕНКОВА Татьяна Сергеевна, инженер НИЛ «МЭТС» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I

E-mail: tatyana.zimenkova@gmail.com

**Information of authors:**

Yury F. ANTONOV, professor of the department "Electromechanical systems and systems", Head of the Laboratory "MATS" Emperor Alexander I Petersburg State Transport University

E-mail: yuri-anto@yandex.ru

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

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

Tatiana S. ZIMENKOVA, Engineer Head of the Laboratory "MATS" Emperor Alexander I Petersburg State Transport University

E-mail: tatyana.zimenkova@gmail.com