

Раздел 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

УДК 53.537

**А. А. Дёмина, А. В. Сафонов, О. А. Ковальчук, Е. Р. Запретилина,
И. Ю. Родин, Е. Н. Андреев**

АО Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры
им. Д. В. Ефремова

РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЯ МАКЕТА ВТСП МОДУЛЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ МАГНИТНОЙ ЛЕВИТАЦИИ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Дата поступления 28.07.2015

Решение о публикации 01.09.2015

Дата публикации 21.10.2015

Аннотация: В последнее время все чаще рассматриваются перспективы применения высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) в качестве обмоточных токонесущих элементов магнитных систем различного назначения [1], [2], [6]. Особенно привлекательной кажется возможность работы таких систем при температуре жидкого азота.

В предлагаемой статье описывается макет модуля магнитной системы, выполненный на основе высокотемпературных сверхпроводящих лент ВТСП-2, разработанный для установки и испытаний на действующем макете статической левитации. В действующем макете левитация платформы осуществляется за счет взаимодействия магнитного поля сборки постоянных магнитов, установленных на платформе, с полем аналогичных сборок, расположенных в путевой структуре. Компактный ВТСП модуль замещает две сборки постоянных магнитов, установленных на платформе. Каждый из блоков модуля представляет собой ВТСП-2 обмотку рейтрековой формы с токовыми вводами, силовой структурой, системой позиционирования и раскрепления, размещенную в криостате, обеспечивающем при минимальной толщине стенки требуемую механическую прочность и тепловую изоляцию при азотной температуре.

Макет унифицированного сверхпроводникового модуля успешно прошел предварительные испытания.

Ключевые слова: магнитная левитация, катушка, галета, криостат, сверхпроводник.

**A. A. Demina, A. V. Safonov, O. A. Kovalchuk, E. R. Zapretilina,
I. Yu. Rodin, E. N. Andreev**
JSC «Efremov's NII EFA»

DEVELOPMENT AND TESTING PROTOTYPE OF HTS MODULE FOR THE SYSTEM OF MAGNETIC LEVITATION OF VEHICLE

Abstract: In recent years increasingly discusses the prospects of application of high-temperature superconductors (HTS) as the winding current-carrying elements of magnetic systems for various purposes. It seems particularly attractive possibility of such systems at liquid nitrogen temperature.

The article describes the prototype of module of the magnetic system which is made on the basis of high-temperature superconducting tapes, designed for the installation and testing on a working model of a static levitation. In the working model levitation of the platform carried by the interaction of the magnetic field of the assembly of permanent magnets mounted on the platform with a field similar to assemblies located in the track structure. Compact HTS module replaces the two assemblies of permanent magnets mounted on the platform. Each block of the module represents HTS racetrack coil with current inputs, power structure, positioning system and bracing which is placed in a cryostat, providing at minimum wall thickness of the required mechanical strength and thermal insulation at liquid nitrogen temperature.

The prototype of unified superconducting module successfully passed preliminary tests.

Key words: magnetic levitation, coil, pancake, cryostat, superconductor.

Введение

Макет сверхпроводникового модуля состоит из двух блоков, каждый из которых включает в себя сверхпроводящую (ВТСП-2) катушку рейтрековой формы с силовой конструкцией и системой токовых вводов, а также компактный и облегченный криостат с системой позиционирования и крепления ВТСП катушки. Важной особенностью сверхпроводникового модуля является то, что он разработан для установки и испытаний на действующем макете статической левитации, где предусмотрена система крепления криостатов.

Технология изготовления сверхпроводящей (ВТСП-2) катушки

Сверхпроводящая катушка представляет собой сборку из двух одинаковых галет рейтрековой формы, намотанных из двух типов лент. Первая лента производства фирмы American Superconductor, ширина которой равна 4,8 мм, толщина равна 200 мкм, в статическом поле имеет критический ток 100 А при температуре 77 К. Вторая лента производства отечественной фирмы SuperOx, ширина которой равна 4 мм, толщина равна 100 мкм, в статическом поле имеет критический ток 100 А при температуре 77 К. Изготовлению галет предшествовала предварительная изоляция провода поли-

амидной лентой толщиной 20 мкм вполнахлеста на специальном изолирующем станке. Процесс нанесения витковой изоляции на ленту представлен на рис. 1. Внешний вид изолированной галеты представлен на рис. 2.

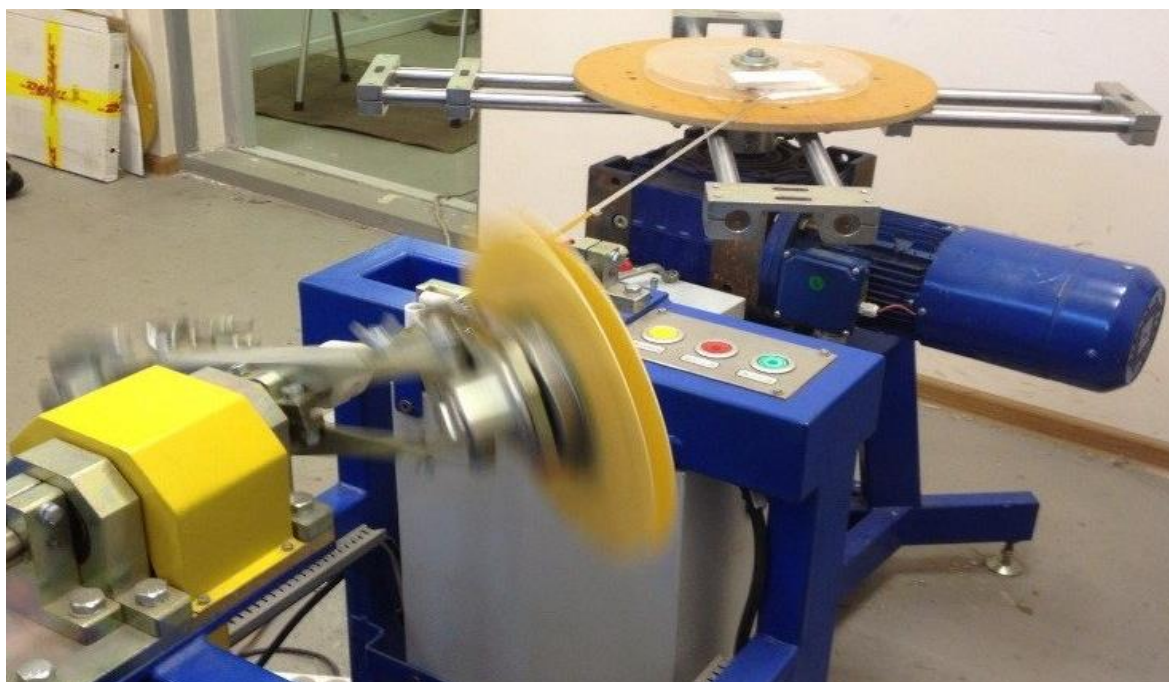


Рис. 1. Процесс нанесения витковой изоляции на ленту



Рис. 2. Внешний вид изолированной ленты

Намотка галеты представлена на рис. 3. Изолированная сверхпроводящая лента наматывается на станке на дюралюминиевые каркасы с предварительным размещением на планшайбе стеклоткани толщиной 20 мкм для бандажа готовой галеты. Внутренний конец ленты до окончания намотки предварительно закреплен на собственном каркасе.

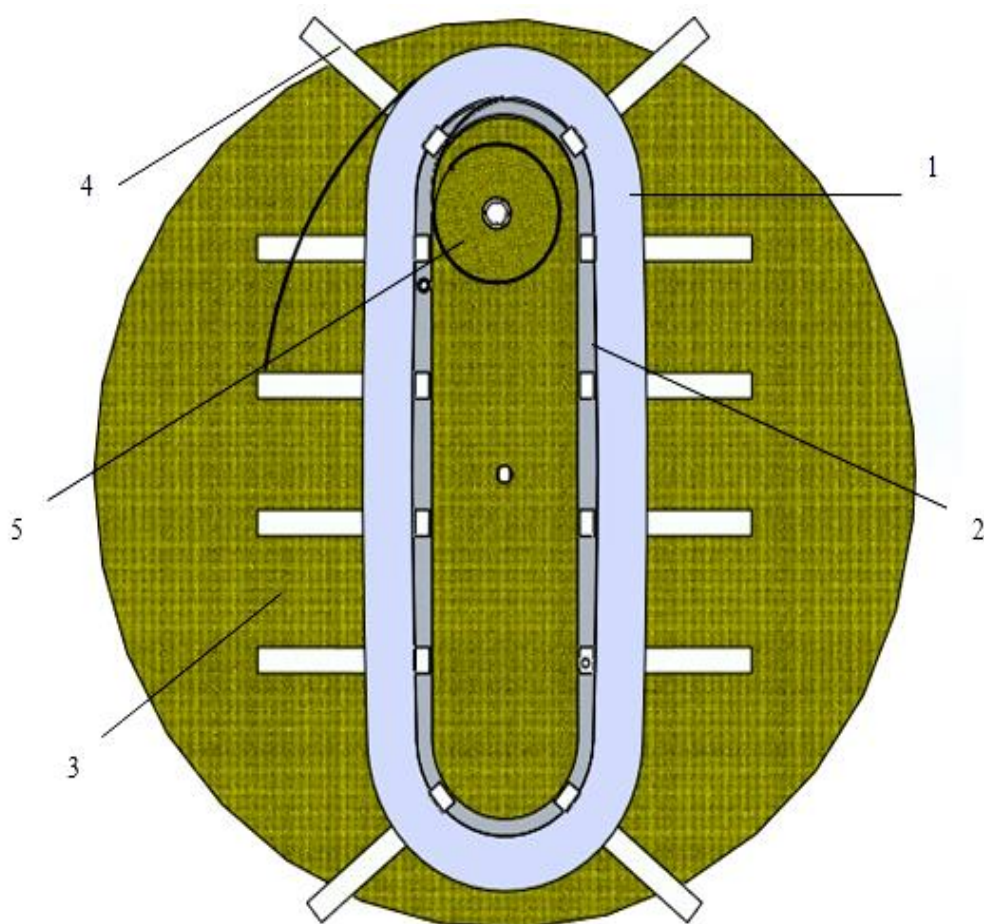


Рис. 3. Намотка галеты:

поз. 1 – сверхпроводящая лента; *поз. 2* – дюралюминиевый каркас;
поз. 3 – планшайба; *поз. 4* – стеклоткань;
поз. 5 – каркас для выводного конца ленты

По окончании намотки двух галет осуществлялась сборка катушки с предварительной прокладкой межслоевой изоляции между ними, а также обеспечением соосности и равенства габаритных размеров нижней и верхней галет. Модель сборки галет представлена на рис. 4.

На завершающих этапах производилась разработка и сборка токовых вводов, представленных на рис. 5. Токовый ввод состоит из гнутой по профилю катушки медной перемычки; гибкой средней части, выполненной в виде провода типа ПШЦ; медной пластины и медного стержня. Гибкая средняя часть обеспечивает точное позиционирование относительно крышки криостата, в котором размещается катушка.

На следующем и завершающем этапе сборки осуществлялась пайка токовых вводов, а также замоноличивание полученной катушки с помощью стеклотенты шириной 10 мм и толщиной 100 мкм с промазкой эпоксидным компаундом. Внешний вид готовой катушки представлен на рис. 6.

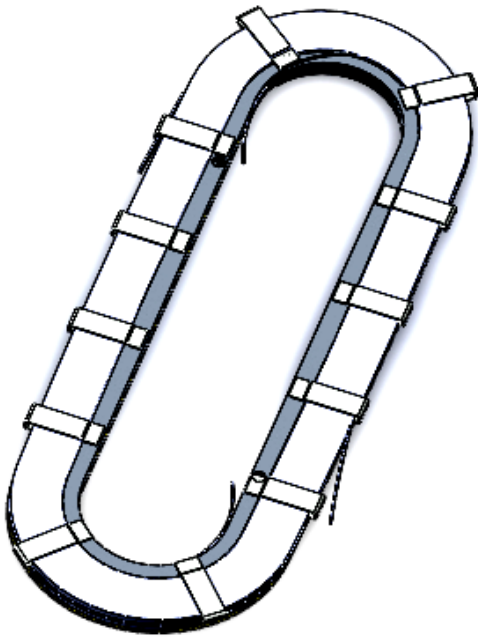


Рис. 4. Модель сборки галет

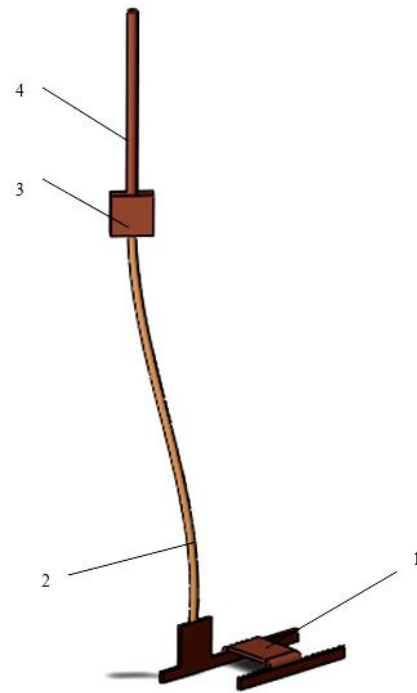


Рис. 5. Внешний вид токового ввода:
 поз. 1 – медная перемычка; поз. 2 – провод типа
 ПЩ; поз. 3 – медная пластина;
 поз. 4 – медный стержень

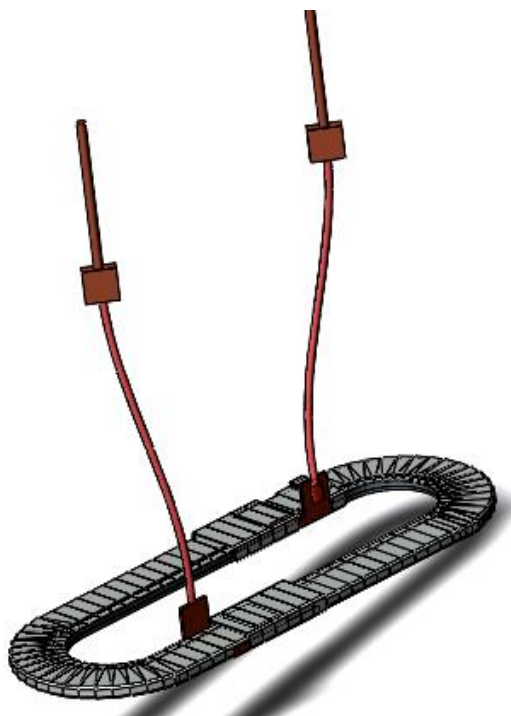


Рис. 6. Внешний вид сверхпроводящей катушки

Разработка, изготовление и испытание криостата

Для испытания макета ВТСП модуля для системы магнитной левитации транспортного средства было изготовлено два азотных криостата с вакуумной изоляцией. Внешний вид одного из них представлен на рис. 7.



Рис. 7. Внешний вид азотного криостата

При проектировании данного криостата требовалось выполнить ряд условий. Масса криостата должна быть минимальной; должны строго соблюдаться геометрические размеры, а также должно быть обеспечено минимальное расстояние от сверхпроводящей катушки до «рельса».

Криостат изготовлен из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т толщиной 1 мм. При откачке вакуумного кожуха криостата возможен прогиб стенок. Во избежание этого на внутренней поверхности вакуумного объема установлены дистанционные ограничители, которые изготовлены из текстолита. Внешний вид ограничителей представлен на рис. 8.

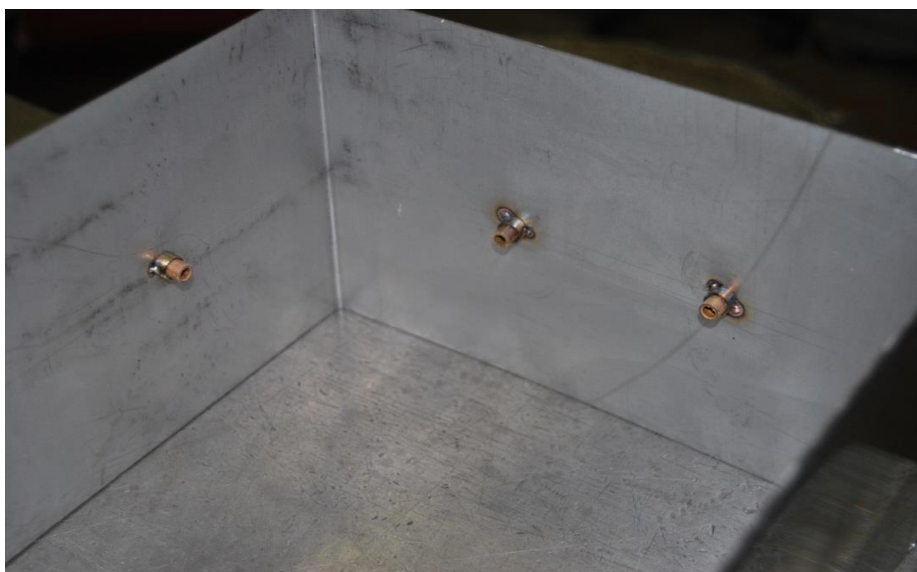


Рис. 8. Текстолитовые дистанционные ограничители

Для расчета распределения температуры между стенками вакуумного кожуха, одна из которых имеет температуру 80 К, а другая 300 К, и текстолитовыми дистанционными ограничителями была разработана конечная элементная модель в программе femm. В результате расчета получено, что при расстоянии между стенками 10 мм, температура наружной поверхности будет около 290 К, что требует установки текстолитового дистанера длиной 10 мм. На рис. 9 представлена расчетная модель для определения распределения температуры в криостате.

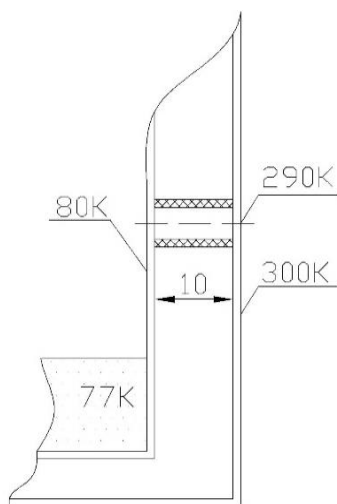


Рис. 9. Расчетная модель для определения распределения температуры в криостате

Также в местах контакта дистанционного ограничителя с наружной стенкой криостата установлена изоляция и предусмотрена дополнительная клейка металлизированной пленки. Такая же изоляция установлена и на крышке криостата, для меньшего обмерзания крышки и препятствия выхода паров газообразного азота. Внешний вид изоляции на крышке криостата представлен на рис. 10.

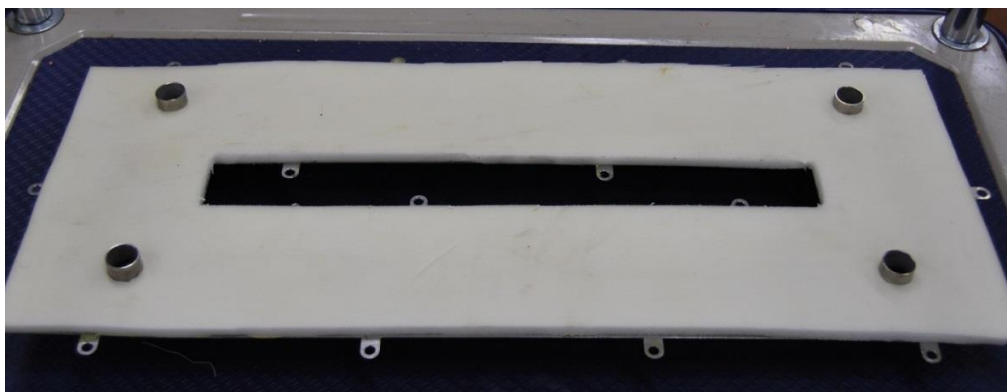


Рис. 10. Внешний вид изоляции на крышке криостата

После изготовления криостата были проведены испытания на герметичность при помощи гелиевого течеискателя методом обдува. Фотография испытаний приведена на рис. 11. Натекание гелия составило $5.7 \cdot 10^{-10}$ Па·м³/с, что соответствует нормам герметичности для данного типа изделий.



Рис. 11. Испытание на герметичность

Помимо испытаний на герметичность, проведены «холодные» испытания жидким азотом, а затем повторные испытания на герметичность. Фотография «холодных» испытаний приведена на рис. 12.



Рис. 12. «Холодные» испытания жидким азотом

Для уменьшения теплопритока давление в вакуумном кожухе криостата – не более 10^{-5} торр.

Предварительные испытания

Макет сверхпроводникового модуля успешно прошел предварительные испытания в жидком азоте.

График, представленный на рис. 13, описывает заведение тока в систему. Подъем тока первоначально осуществлялся на 5 А, далее на 2 А. Для затухания индуктивной составляющей напряжения выдерживалась «полочка», равная 1 минуте. Подъем тока осуществлялся до возникновения активной составляющей напряжения, которая, как видно из графика, появилась на 4000 с при токе 50 А.

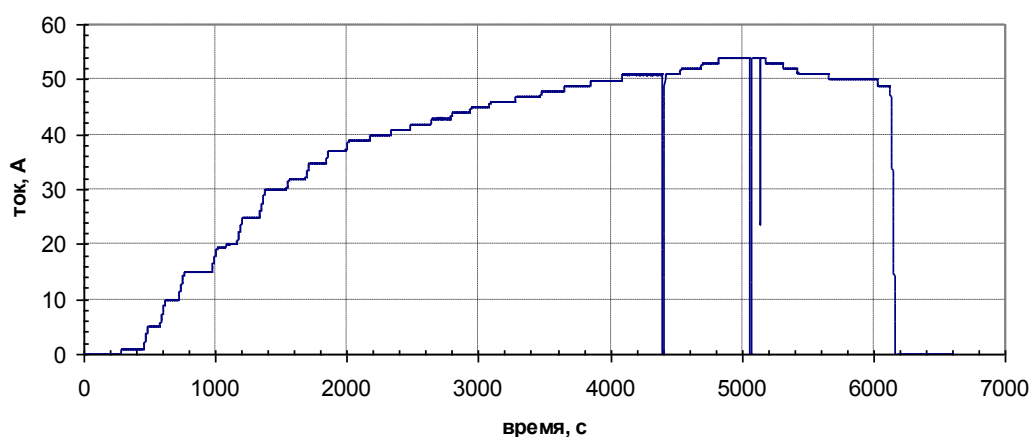


Рис. 13. График заведения тока

График, представленный на рис. 14, описывает изменение напряжения во времени. Пики — это индуктивная составляющая напряжения во время подъема тока, которая затухает при выходе на «полочки». Активная составляющая напряжения появляется после 50 А. Максимально заводимый в систему ток составил 55 А.

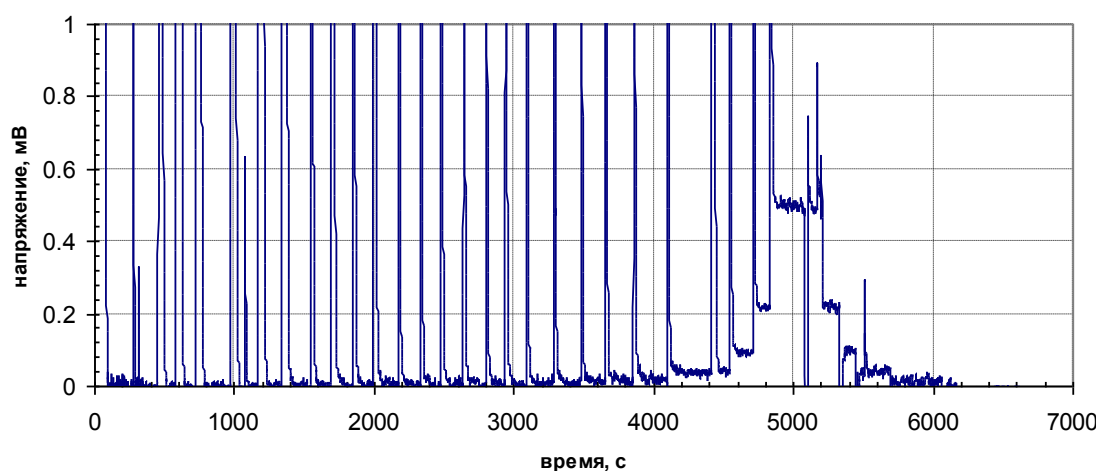


Рис. 14. Изменение напряжения во времени

Испытания подтвердили, что токонесущая способность данной модели соответствует расчетам [4], [7].

Изготовленный макет сверхпроводникового модуля подготовлен для испытаний на действующем демонстрационно-испытательном стенде, где левитация осуществляется за счет взаимодействия магнитного поля сборки постоянных магнитов, установленных на платформе, с полем аналогичных сборок, расположенных в путевой структуре. Компактный ВТСП модуль замещает две сборки постоянных магнитов, установленных на платформе. Модель демонстрационно-испытательного стенда статической левитации представлена на рис. 15.

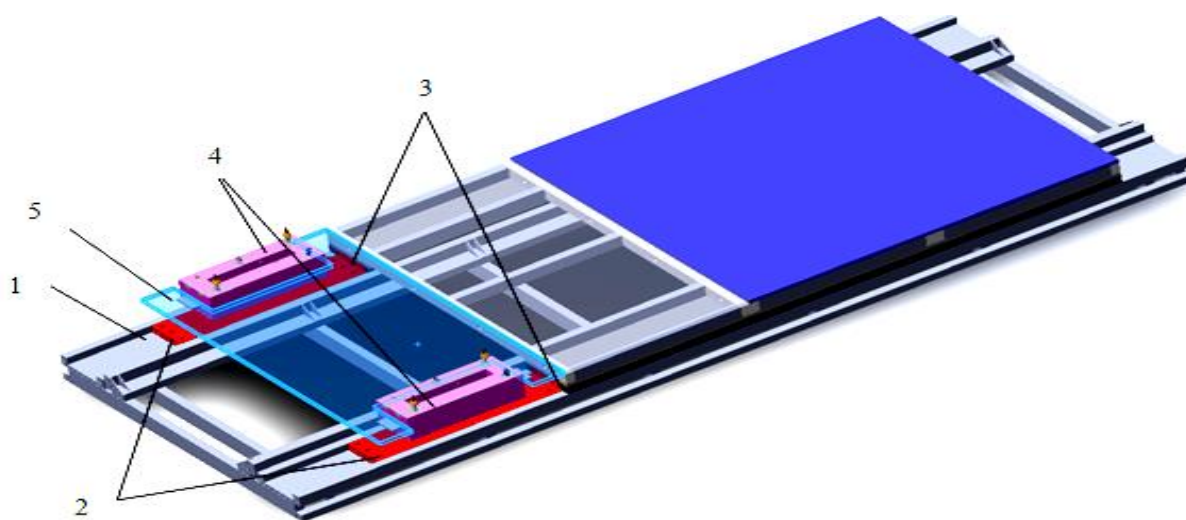


Рис. 15. Модель демонстрационно-испытательного стенда статической левитации:

поз. 1 – платформа; поз. 2 – постоянные магниты, расположенные на путевой структуре; поз. 3 – постоянные магниты, расположенные на платформе; поз. 4 – компактный ВТСП модуль; поз. 5 – груз

Работа была выполнена в рамках гранта РФФИ. В ходе проведенной работы была разработана технология и изготовлена пилотная сверхпроводящая ВТСП катушка; разработан, изготовлен и испытан криостат, а также собран и испытан макет сверхпроводникового модуля системы левитации и стабилизации, выполненный на основе высокотемпературных сверхпроводящих лент второго поколения (ВТСП-2), работающий при температуре жидкого азота.

Полученные результаты подтверждают возможность создания крупномасштабных прототипов магнитолевитационных систем, использующих сверхпроводниковые модули. Проведенные предварительные испытания подтвердили адекватность используемого для модельного проектирования кода.

Следующим шагом планируется испытание сверхпроводникового модуля на действующем демонстрационно-испытательном стенде статической левитации.

Библиографический список

1. Tsuchiya, M. Ohsaki, H. (September 2000). «Characteristics of electromagnetic force of EMS-type maglev vehicle using bulk superconductors» (PDF). *Magnetics*, IEEE.
2. H. Kamijo, K. Nemoto, and H. Fujimoto, *Advances in Superconductivity IX* (Tokyo: Springer-Verlag, 1997). – P. 1473.
3. M. Ogata, K. Nagashima, M. Iwamatsu, A. Inoue, Y. Miyazaki, Basic study of HTS magnet using 2G wires for maglev train, Dresden, Germany, 2006. – Pp. 275–280.
4. Zhukovsky, A, Schultz, J., Smith, B. et al. (2001). Magnet for the Floating coil of LDX // *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*. Vol. 11, 1873–1876.
5. В. М. Амосков, Д. Н. Арсланова, А. М. Базаров, Г. А. Баранов, А. В. Белов, В. А. Беляков, Т. Ф. Белякова, В. Н. Васильев, Е. И. Гапионов, А. А. Зайцев, М. В. Капаркова, В. П. Кухтин, А. Н. Лабусов, Е. А. Ламзин, М. С. Ларионов, Н. А. Максименкова, В. М. Михайлов, А. Н. Неженцев, И. Ю. Родин, С. Е. Сычевский, А. А. Фирсов, М. В. Хохлов, Н. А. Шатиль. Адаптация вычислительной технологии моделирования установок термоядерного синтеза для анализа и оптимизации магнитных подвесов левитационных транспортных систем // *Вопросы атомной науки и техники, сер. Термоядерный синтез*, М. : НИЦ «Курчатовский институт», 2014. – Т. 37, вып. 4. – С. 84–95.
6. Сверхпроводниковые технологии для создания модуля транспортной системы магнитной левитации / М. С. Астров, Е. Р. Запретилина, О. А. Ковальчук, И. Ю. Родин, С. Б. Федотова // *Известия ПГУПС*, 2014. – № 3. – С. 40–55.
7. Д. Н. Арсланова, Г. А. Баранов, В. А. Беляков, В. Н. Васильев, А. А. Зайцев, Е. А. Ламзин, М. В. Михайлов, И. Ю. Родин, С. Е. Сычевский, А. А. Фирсов, Н. А. Шатиль, В. А. Глухих, Е. А. Ламзин, О. Г. Филатов, А. В. Мизинцев, С. Н. Васильев, Д. А. Овсянников, Детальное моделирование и анализ электродинамических подвесов левитационных грузовых транспортных систем // тезисы к 3-й Международной научной конференции «Магнито-левитационные транспортные системы и технологии», 2015. – С. 34.

References

1. Tsuchiya M., Ohsaki H., *IEEE Magnetics*, 2000, vol. 37, no. 2
2. Kamijo H., Nemoto K., Fujimoto H. *Advances in Superconductivity IX*. Tokyo, 1997. p. 1473.
3. Ogata M., Nagashima K., Iwamatsu M., Inoue A., Miyazaki Y. Basic study of HTS magnet using 2G wires for maglev train. Dresden, 2006, pp. 275–280.
4. Zhukovsky A., Schultz J., Smith B., *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, 2001, vol. 11, pp. 1873–1876.
5. Amoskov V. M., Arslanova D. N., Bazarov A. M., Baranov G. A., Belov A. V., Belyakov V. A., Belyakov T. F., Vasilyev V. N., Gapionok E. I., Zaitsev A. A.,

Kaparkova M. V., Kuhtin V. P., Labusov A. N., Lamzin E. A., Larionov M. S., Maksimenkova N. A., Mikhailov V. M., Nezhentsev A. N., Rodin I. Yu., Sychevsky S. E., Firsov A. A., Khokhlov M. A., Shatil N. A. *Voprosy atomnoj nauki i tekhniki, seriya Termoyadernyj sintez – Issues of atomic science and technology, a series of Fusion*, Moscow, 2014, vol. 37, no. 4, pp. 84–95.

6. Astroff M. S., Zapretilina E. R., Kovalchuk O. A., Rodin I. Y., Fedotov S. B. *Izvestiya PGUPS – News PGUPS*, St. Petersburg, 2014, no. 3 pp. 40–55.

7. Arslanova D. N., Baranov G. A., Belyakov V. A., Vasiliev V. N., Zaitsev A. A., Lamzin E. A., Mikhailov M. V., Rodin I. Yu., Sychevsky S. E., Firsov A. A., Shatil N. A., Gluhikh V. A., Lamzin E. A., Filatov O. G., Pinky A. V., Vasilyev S. N., Ovsyannikov D. A. Detal'noe modelirovanie i analiz ehlektrodinamicheskikh podvesov levitacionnykh gruzovykh transportnykh sistem [Detailed modeling and analysis of electrodynamic levitation suspensions freight transport system] *Tezisy 3-ej Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Magnitolevitacionnye transportnye sistemy i tekhnologii»* (Theses the 3rd Int. Conf. "Maglev transport systems and technologies"). St. Petersburg, 2015, p. 34.

Сведения об авторах:

ДЁМИНА Анна Андреевна, инженер – исследователь; АО НИИЭФА, E-mail: demina@sintez.niiefa.spb.su

САФОНОВ А. В., начальник стенда; АО НИИЭФА, E-mail: safonovav@sintez.niiefa.spb.su

АНДРЕЕВ Е. Н., начальник стенда; АО НИИЭФА, E-mail: andreev@sintez.niiefa.spb.su

ЗАПРЕТИЛИНА Е. Р., к. т. н., начальник лаборатории; АО НИИЭФА, E-mail: zapretilina@sintez.niiefa.spb.su

КОВАЛЬЧУК О. А., начальник лаборатории; АО НИИЭФА, E-mail: kovalchuk@sintez.niiefa.spb.su

РОДИН И. Ю., к. т. н., начальник отдела; АО НИИЭФА, E-mail: rodin@sintez.niiefa.spb.su

Information about authors:

DEMINA Anna, an engineer – the researcher, E-mail: demina@sintez.niiefa.spb.su

SAFONOV A. V., head of the stand; JSC Efremov, E-mail: safonovav@sintez.niiefa.spb.su

ANDREEV E. N., Head of the stand; JSC Efremov, E-mail: andreev@sintez.niiefa.spb.su

ZAPRETILINA E. R., Ph.D., chief of the laboratory; JSC Efremov, E-mail: zapretilina@sintez.niiefa.spb.su

KOVALCHUK O. A., chief of the laboratory; JSC Efremov, E-mail: kovalchuk@sintez.niiefa.spb.su

RODIN I. Yu., Ph.D., head of the department; JSC Efremov, E-mail: rodin@sintez.niiefa.spb.su