

УДК 621.039.633

## ОБ УСКОРЕНИИ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО НОСИТЕЛЯ КРИОГЕННОЙ ТОПЛИВНОЙ МИШЕНИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬЮ СОЛЕНОИДОВ С ТОКОМ

И. В. Александрова, М. Н. Агапов, А. А. Акунец, Е. Р. Корешева

*В Физическом институте им. П. Н. Лебедева (ФИАН) интенсивно развиваются инновационные технологии по созданию ВТСП-МАГЛЕВ ускорителя, предназначенного для доставки криогенной топливной мишени с помощью левитирующего ВТСП-носителя в камеру ИТС для взаимодействия с лазерным излучением. В основе подхода ФИАН лежит явление квантовой левитации ВТСП в градиентном магнитном поле. Ускорение обеспечивается последовательностью соленоидов с током, а левитация ВТСП-носителя происходит за счет использования магнитного рельса, вдоль которого размещены соленоиды. В работе создан прототип элементарного блока ускорения ВТСП-носителя и исследованы процессы управления его движением. С этой целью разработана и протестирована система оперативного контроля и управления работой прототипа. Продемонстрировано ускорение ВТСП-носителя до 1 м/с на длине разгона  $L_a = 20$  см при использовании одной пары согласованно работающих соленоидов. Полученные результаты имеют большое практическое значение в области разработки систем бесконтактной доставки КТМ при построении линейного магнитного трека за счет соединения одного элементарного блока ускорения со многими другими для достижения требуемой скорости инжекции мишени от 20 до 200 м/с и более.*

**Ключевые слова:** инерциальный термоядерный синтез (ИТС), криогенная топливная мишень (КТМ), высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП), доставка КТМ с помощью левитации.

ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: koreshevaer@lebedev.ru.

*Введение.* Классическая КТМ прямого сжатия, применяемая в экспериментах по ИТС, представляет собой систему вложенных шаровых слоев, простейший вариант которой – тонкая полимерная оболочка и криогенное топливо ( $D_2$  или DT), сформированное в виде сферически-симметричного твердого слоя на её внутренней поверхности [1, 2]. Масса КТМ  $< 4.5$  мг.

Непрерывное производство бесподвесных КТМ и их доставка в лазерный фокус с частотой 5–10 Гц является необходимым условием работы реактора ИТС [3]. В Физическом институте им. П. Н. Лебедева (ФИАН) успешно развивается оригинальное направление по разработке бесконтактного способа доставки КТМ в зону лазерного облучения мощной установки ИТС или реактора [4–8]. Это принцип магнитолевитационного (МАГЛЕВ) ускорения носителя КТМ, изготовленного из ВТСП с высоким пиннингом вихрей (ВТСП-МАГЛЕВ технологии).

Важнейшим элементом устройства доставки является специальный носитель КТМ, который выполняет двойную функцию в процессе её ускорения в инжекторе: передаёт импульс движения на КТМ и предохраняет КТМ от механических и тепловых перегрузок. Однако при этом нельзя исключить тепло, которое выделяется вследствие трения носителя о стенку направляющей трубки инжектора. Поэтому в ФИАН было предложено изготавливать носители КТМ из высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) для транспорта КТМ с помощью левитации. Цель – исключить из рассмотрения проблемы трения, износа и смазки, поскольку при столь низких температурах  $\sim 18$  К они стоят очень остро, а их решение далеко от практического результата. Подчеркнем, что перегрев КТМ сверх допустимого значения на  $\sim 100$  мК неизбежно приведёт к потере качества топливного слоя [6]. В ФИАН также была предложена принципиальная схема построения линейного ускорителя для реализации бесконтактной доставки КТМ [8], которая первоначально была испытана с одним ускоряющим соленоидом (рис. 1).

Температура проведения экспериментов составляла  $T \sim 80$  К и удерживалась за счет использования пенополимерного наполнителя с жидким азотом (температура кипения 77 К) внутри ВТСП-носителя, чтобы его температура была ниже критической для ВТСП-ленты  $T < T_c = 91$  К [9]. Были сконструированы системы линейных направляющих треков из постоянных магнитов (в зарубежной терминологии – permanent magnet guideway (PMG) системы), причём именно магнитное поле PMG-системы обеспечивает требуемые силы левитации, а также контроль и управление движением ВТСП-носителя. Поперечная устойчивость ВТСП-носителя гарантируется созданием доста-

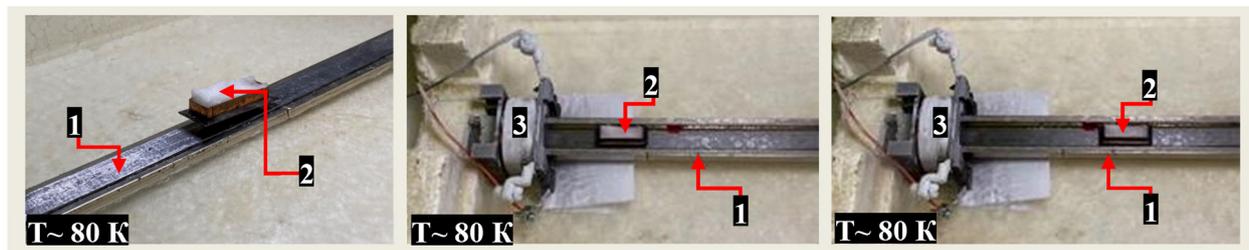


Рис. 1: Основные элементы линейного ускорителя: 1 – линейная магнитная система (линейный магнитный рельс или трек); 2 – ВТСП-носитель (масса 1.25 г) выполнен из ВТСП-лент 2-го поколения (производство ЗАО СуперОкс [9]); 3 – соленоид, укрепленный вдоль магнитного рельса.

точно сильного градиента в поперечном сечении PMG, что предотвращает его смещение в этом направлении за счет пиннинга силовых линий в материале ВТСП [10].

Инжекция КТМ в камеру реактора ИТС должна осуществляться со скоростью в диапазоне 200–400 м/с [5]. В то же время требования на скорость инжекции КТМ в камеру взаимодействия действующей установки ИТС могут быть на порядок меньше, поскольку температура стенок такой камеры (300 К) в  $\sim 3$ –6 раз меньше температуры стенок камеры реактора (840–1758 К), а ее радиус в  $\sim 1.5$ –2 раза меньше [11–13].

В работе [14] (см. также ссылки к данной работе) выполнено моделирование движения левитирующего ВТСП-носителя в линейной системе ускорения. Расчеты показали, что, в зависимости от геометрии и динамических параметров системы, достичь требуемых скоростей инжекции возможно, если использовать многоступенчатый электромагнитный ускоритель (рис. 2), представляющий собой магнитный рельс и линейку соленоидов, число которых зависит от требуемой величины скорости инжекции КТМ.

Цель настоящей работы – это переход к созданию системы, состоящей из последовательности ускоряющих соленоидов, расположенных вдоль линейного магнитного рельса. Начальный этап работы связан с построением прототипа элементарного блока ускорения (ЭБУ), который включает систему из трех соленоидов, установленных вдоль небольшого магнитного рельса. Два из них предназначены для ускорения ВТСП-носителя, а третий – для его торможения. Работа соленоидов согласуется с движением ВТСП-носителя с помощью созданной системы оперативного контроля и управления работой прототипа ЭБУ (рис. 2 (б), (в)).

*Принцип управления ЭБУ.* Движущийся в неоднородном магнитном поле ВТСП-носитель представляет собой магнитный диполь благодаря возникновению в сверхпро-

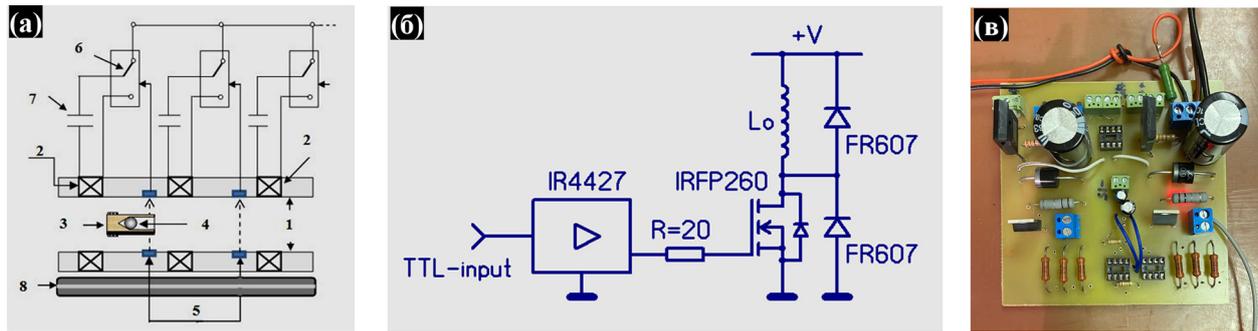


Рис. 2: Многоступенчатый электромагнитный ускоритель левитирующего ВТСП-носителя: (а) принципиальная схема ускорения [8] (1 – транспортный канал, 2 – соленоид, 3 – ВТСП-носитель, 4 – КТМ, 5 – оптопара, 6 – коммутатор, 7 – конденсатор, 8 – магнитный рельс); (б) схема коммутации тока ускоряющих соленоидов; (в) общий вид устройства коммутации.

воднике незатухающих поверхностных токов. С точки зрения взаимного расположения ускоряющего бегущего импульса и магнитного диполя, устойчивым является только тот случай, когда импульс толкает магнитный диполь впереди себя [15]. Поскольку для сверхпроводников восприимчивость  $\chi < 0$ , то действующая сила  $F \sim \chi \cdot \partial B^2 / \partial x$  [16] направлена против градиента поля, и, следовательно, сверхпроводники выталкиваются из области более сильного магнитного поля. Именно это свойство сверхпроводников лежит в основе построения системы управления работой ЭБУ.

Согласно схеме на рис. 2(а), в транспортном канале (1) с системой соленоидов (2) и магнитным рельсом (8) формируется импульсное магнитное поле, ускоряющее ВТСП-носитель (3), левитирующий в поле магнитного рельса (8). При этом как только ВТСП-носитель (3) на выходе одного из соленоидов (2) пересекает плоскость, в которой установлена оптопара (5), исчезновение сигнала из-за такого пересечения вызывает переключение в электронном коммутаторе (6). В результате обкладка конденсатора (7), подключенная через нормально разомкнутый вывод электронного коммутатора (6) к источнику питания (на схеме не показан) и заряженная до требуемого напряжения, замыкается на соленоиды (2). Происходит быстрый разряд конденсатора (7), приводящий к формированию импульсного магнитного поля, выталкивающего ВТСП-носитель (3) в направлении следующих соленоидов (2). После пролёта ВТСП-носителя сигнал с выхода оптопары (5) вызывает замыкание нормально разомкнутого вывода в электронном коммутаторе (6), и конденсатор (7) снова заряжается от источника питания. При пересечении ВТСП-носителем плоскости каждой следующей оптопа-

ры (5) этот процесс повторяется. После достижения требуемой скорости инжекции КТМ (4), ВТСП-носитель (3) тормозится магнитным полем последнего соленоида, а КТМ (4) по инерции инжектируется в камеру взаимодействия с лазерным излучением.

*Параметры установки и результаты эксперимента.* В соответствии со схемой (рис. 2(а)), предложенной в [8], в настоящей работе была создана компактная установка (рис. 3) – прототип ЭБУ – и исследованы процессы управления движением ВТСП-носителя. В общем случае, запуск движения ВТСП-носителя может осуществляться как с помощью магнитного, так и механического воздействия на него. Для чистоты эксперимента, чтобы исключить влияние запускающего импульса магнитного типа на ускоряющие соленоиды, в данной работе использовалась система механического воздействия. С целью сообщения малой начальной скорости ВТСП-носителю его движение может запускаться любым малым воздействием, например, легким механическим толчком или небольшим наклоном системы ускорения (магнитный рельс + соленоиды) под углом  $\alpha \sim 2^\circ$  (или даже меньше) к горизонту.

В экспериментах использовалось 3 соленоида (внутренний размер  $25 \times 19$  мм<sup>2</sup>), укрепленные вдоль линейного магнитного рельса: 1-й и 2-й для ускорения, а 3-й – для торможения ВТСП-носителя. При этом работа системы ускорения осуществлялась при температуре  $T = 300$  К, а движущийся носитель находился при  $T \simeq 80$  К за счёт наличия пенополимерного наполнителя, пропитанного жидким азотом (рис. 3(в)). ВТСП-носитель был изготовлен из ВТСП-ленты (производство СуперОкс [9]) толщиной 0.1 мм, его размеры составили  $24.5 \times 4.5 \times 4.5$  мм<sup>3</sup>, общая масса (вместе с пенополимерным наполнителем) 0.97 г.

Для коммутации тока в соленоидах была разработана схема, показанная на рис. 2((б), (в)). Управляющие импульсы с уровнями ТТЛ-сигнала формировались платой Arduino-UNO, их длительность варьировалась в диапазоне 1–30 мс, причём короткие импульсы имели значение  $\tau_a \sim 1 - 8$  мс – для стадии ускорения, а длинные  $\tau_d \sim 25 - 30$  мс – для стадии торможения.

Запуск импульсов осуществлялся по срабатыванию оптического датчика, луч которого пересекал движущийся носитель. На плате коммутации (рис. 2(в)) из маломощного сигнала Arduino-UNO формировался управляющий сигнал затвора MOSFET полевого транзистора IRFP260 с помощью драйвера затвора IR4427. Ток затвора ограничивался резистором 20 Ом. На сток полевого транзистора подключена катушка  $L_o$ . Для защиты полевого транзистора от индуктивных выбросов установлены два диода типа FR607.

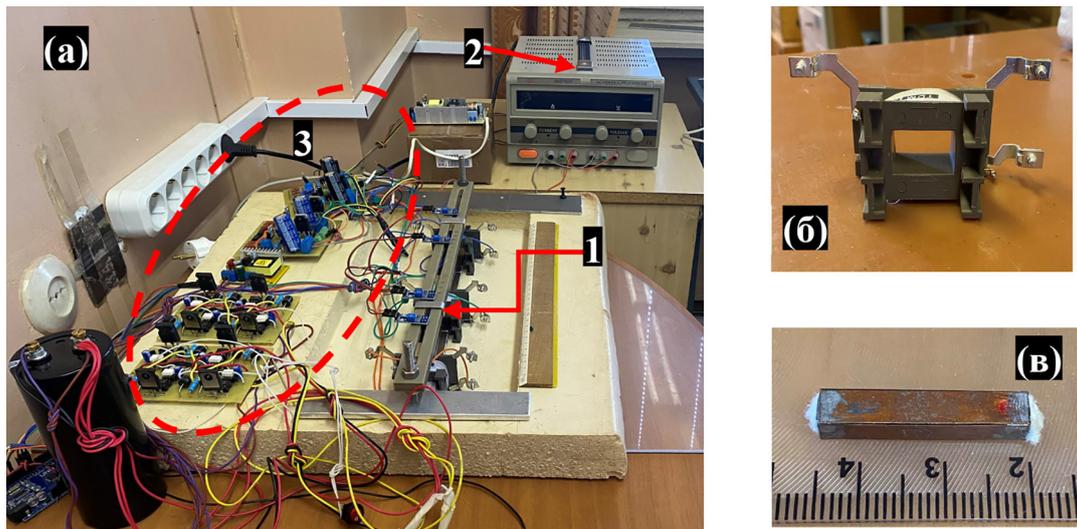


Рис. 3: Общий вид установки: линейка соленоидов с датчиками положения VTSP-носителя и элементами управляющей схемы: (а) 1 – линейка соленоидов на магнитном рельсе, 2 – источник питания типа НУ3030Е, 3 – электронные схемы коммутации тока в соленоидах; (б) поперечное сечение соленоида (внутренний размер  $25 \times 19$  мм<sup>2</sup>); (в) VTSP-носитель с пенополимерным наполнителем.

Быстродействие всех компонентов плат коммутации является достаточным для работы с частотой PWM до 50 кГц.

Проведена серия экспериментов по исследованию как процессов ускорения, так и торможения VTSP-носителя в созданной системе из 3-х соленоидов. Изучалось влияние длительности импульса тока через соленоид в процессе ускорения с целью достигнуть минимальной, но значимой величины скорости VTSP-носителя – 1 м/с на сравнительно небольшой длине разгона, чтобы иметь возможность мультиплицировать схему ускорения при построении большого магнитного трека для достижения больших скоростей КТМ.

Контрольные эксперименты показали, что при длительности импульса тока через 1-й и 2-й соленоиды  $\tau_a = 4$  мс поставленные цели были достигнуты: скорость VTSP-носителя на выходе после 1-го соленоида составила  $(20.0 \pm 0.4)$  см/с, а после 2-го соленоида  $(100.1 \pm 2.7)$  см/с, длина ускорения составляла  $L_a = 20$  см. Параметры запуска ускоряющих соленоидов имели следующие значения:  $U = 28$  В,  $R = 2.5$  Ом,  $I = 11.2$  А.

Также была исследована работа 3-го, тормозного, соленоида. Процесс полного торможения VTSP-носителя зафиксирован при следующих параметрах: скорость VTSP-

носителя в начале процесса торможения 1 м/с, тормозной путь 15 мм, длительность импульса тока  $\tau_d = 25$  мс.

Рис. 4 демонстрирует соответствующие кадры видеозаписи эксперимента по ускорению ВТСП-носителя одной согласованной парой соленоидов.

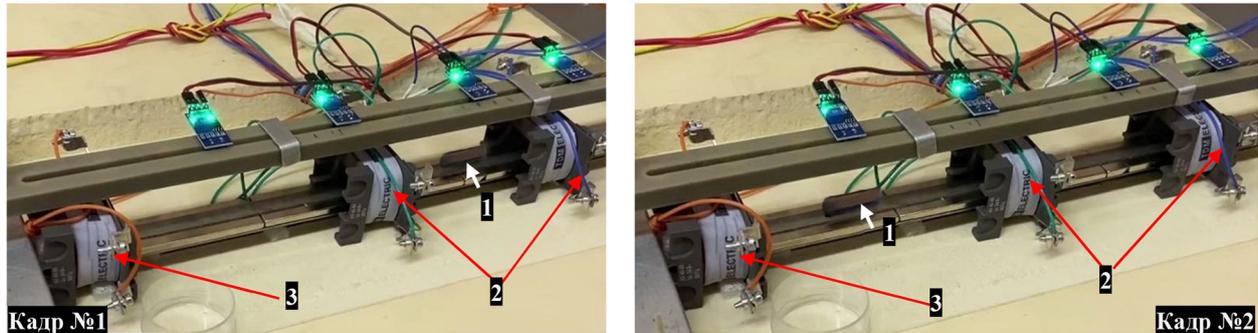


Рис. 4: Стоп-кадры движения ВТСП-носителя (1) в системе согласованно работающих соленоидов: соленоиды (2) – ускоряющие, соленоид (3) – для торможения ВТСП-носителя (1).

*Заключение.* В ФИАН предложено использовать эффект квантовой левитации ВТСП для бесконтактного транспорта КТМ, расположенной внутри ВТСП-носителя, а также управления движением этого носителя в криогенном электромагнитном ускорителе до скоростей от 20 до 200 м/с и более. В настоящей работе сделан важный шаг по реализации этого направления – построен прототип ЭБУ, включающий систему контроля и управления движением ВТСП-носителя. В серии экспериментов успешно продемонстрировано ускорение ВТСП-носителя до скоростей 1 м/с на длине разгона  $L_a = 20$  см с помощью одной согласованной пары соленоидов. Полученные результаты позволяют перейти к оптимизации работы прототипа ЭБУ с последующим его мультиплицированием для построения большого линейного трека за счет соединения одного элементарного блока со многими другими с целью достижения требуемой скорости инжекции мишени от 20 до 200 м/с и более.

Работа выполнена в рамках Государственного Задания ФИАН АААА-А19-119083090043-0, а также при финансовой поддержке МАГАТЭ в рамках научного проекта № 24154.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] I. V. Aleksandrova, E. R. Koresheva, Bull. Lebedev Phys. Inst. **46**(7), 228 (2019). DOI: 10.3103/S1068335619070054.

- [2] I. V. Aleksandrova, E. R. Koresheva, High Power Laser Sci. Engin. **7**, e38 (2019). DOI: <https://doi.org/10.1017/hpl.2019.23>.
- [3] D. T. Goodin, N. B. Alexander, L. C. Brown, et al., Nuclear Fusion **44**, S254 (2004). DOI: 10.1088/0029-5515/44/12/S17.
- [4] I. V. Aleksandrova, A. A. Akunets, P. I. Bezotosnyi, et al., Bull. Lebedev Phys. Inst. **42**, 309 (2015). DOI: 10.3103/S1068335615110019.
- [5] I. V. Aleksandrova, A. A. Akunets, P. I. Bezotosnyi, et al., Bull. Lebedev Phys. Inst. **43**, 160 (2016). DOI: 10.3103/s1068335616050031.
- [6] I. V. Aleksandrova, E. R. Koresheva, E. L. Koshelev, et al., Bull. Lebedev Phys. Inst. **50**(5), 195 (2023).
- [7] I. V. Aleksandrova, E. R. Koresheva, E. L. Koshelev, High Power Laser Sci. Engin. **10**, e11 (2022). DOI: 10.1017/hpl.2022.1.
- [8] И. В. Александрова, А. А. Акунец, Е. Р. Корешева, Е. Л. Кошелев, ПАТЕНТ РФ №2727925 от 27.07.2020 г.
- [9] S. Lee, V. Petrykin, A. Molodyk, et al., Supercond. Sci. Technol. **27**, 044022 (2014).
- [10] В. Л. Гинзбург, Е. А. Андрюшин, *Сверхпроводимость*. 2-е издание (М., Альфа-М, 2006, с. 110).
- [11] С. Г. Гаранин, С. В. Гарнов, А. М. Сергеев, Е. А. Хазанов, Вестник РАН **91**(5), 43 (2021).
- [12] G. L. Kulcinski, R. R. Peterson, L. J. Wittenberg, et al., IAEA Technical Committee Meeting on Physics and Technology of Inertial Fusion Energy Target and Chambers, Madrid, Spain, 7-9 June 2000.
- [13] R. W. Petzoldt, D. T. Goodin, A. Nikroo, et al., Nucl. Fusion **42**(12), 1351 (2002). DOI: 10.1088/0029-5515/42/12/301.
- [14] I. V. Aleksandrova, E. L. Koshelev, A. I. Nikitenko, et al., J. Russian Laser Research **39**(2), 140 (2018).
- [15] S. N. Dolya, Journal of technical physics **84**(11), 117 (2014).
- [16] Л. Д. Ландау, Е. М. Лившиц, *Электродинамика сплошных сред*. Т. 8 (М., Наука, 1982, с. 623).

Поступила в редакцию 7 июня 2023 г.

После доработки 27 июня 2023 г.

Принята к публикации 28 июня 2023 г.