

УДК 621.039.633

ИНТЕГРАЦИОННЫЙ ПОДХОД К МАССОВОЙ ПОСТАВКЕ КРИОГЕННЫХ ТОПЛИВНЫХ МИШЕНЕЙ ДЛЯ ЦИКЛИЧЕСКОГО ОБЛУЧЕНИЯ МОЩНЫМ ЛАЗЕРОМ

И. В. Александрова, Е. Р. Корешева, А. А. Акунец

Формирование и инжекция криогенных топливных мишеней (КТМ) с высокой частотой повторения является неременным условием обеспечения топливом реактора ИТС. В Физическом институте им. П. Н. Лебедева (ФИАН) начата разработка концептуальной схемы для интеграции всех функциональных процессов поточного производства и бесконтактной доставки КТМ в зону облучения мощным лазером. В основе лежит реализация разработанного в ФИАН уникального цикла FST (сокращение от free-standing target – свободная мишень), который включает: (1) быстрое формирование топливного слоя (< 30 с) в свободно движущихся незакрепленных оболочках, что обеспечивает массовое производство КТМ и снижение запасов трития в системе [1, 2]; (2) магнитолевитационные (МАГЛЕВ) технологии для ускорения сформированных КТМ без механического трения и их последующей инжекции в лазерный фокус установки ИТС [3]; (3) методы голографического распознавания образов для оперативного контроля траектории инжектированной КТМ [4]. В работе обсуждается созданная элементная база, позволяющая осуществить интеграцию нескольких FST-производственных линий в единую систему, обеспечивающую циклическое облучение КТМ с целью массовой поставки топлива для проведения экспериментов на действующих лазерных установках, а также для будущих реакторов ИТС.

Ключевые слова: инерциальный термоядерный синтез (ИТС), незакрепленная КТМ, FST-производственная линия, высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП), левитационная доставка КТМ, циклическое облучение КТМ.

Введение. Важнейшей целью исследований по ИТС является разработка прецизионных технологий для массового производства КТМ и их бесконтактной доставки в камеру взаимодействия с мощным лазерным излучением на установках ИТС или будущем реакторе ИТС [1–4]. Технологии должны оперировать со свободно движущимися КТМ и должны быть интегрированы в единую производственную линию (рис. 1), способную генерировать $\sim 5 \cdot 10^5$ КТМ в день.

Типичные КТМ для прямого облучения лазером представляют собой сферически симметричный однородный слой твердого дейтерий-тритиевого топлива (D-T) на внутренней поверхности полый сферической оболочки. Однородность по толщине слоя должна быть лучше 1%, а шероховатость его внутренней поверхности < 1 мкм [5]. Топливо должно быть изотропным, чтобы гарантировать успешное протекание реакций синтеза [1, 2].

Процесс доставки включает в себя стадию ускорения КТМ и стадию инжекции КТМ внутрь камеры взаимодействия. При этом необходимо учитывать ряд жестких требований, которые предъявляются к процессу подачи топлива в лазерный фокус (см. табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Условия доставки реакторной КТМ

Частота инжекц.	5–10 Гц	Кол-во КТМ	~ 500000 штук
Скорость инжекц. КТМ	200–400 м/с	Темпер. КТМ в фокусе лазера	~ 18 К
Допуст. ускорение КТМ	500–1000 g	Допуст. перегрев КТМ	~ 100 мК

Примечание: g – ускорение свободного падения.

КТМ должна иметь в момент облучения лазером температуру $T = 18.3$ К для обеспечения высокого коэффициента усиления по энергии. Перегрев КТМ сверх допустимого значения (~ 100 мК) неизбежно приведёт к деградации качества топливного слоя и существенному снижению энергетического выхода при её сжатии [6]. Поэтому рабочая температура инжектора должна составлять ~ 17 К для обеспечения выживаемости криогенных слоев при доставке КТМ.

На стадии ускорения в инжекторе перегрузки на КТМ могут составлять 500–1000 g [5]. Поэтому её транспорт осуществляется в специальном носителе, который передает импульс движения на КТМ при её ускорении до требуемых скоростей инжекции. При этом необходимо исключить теплопритоки вследствие механического трения носителя КТМ о ствол ускорителя. Традиционный подход к доставке КТМ, основанный на

применении пневматического, электромагнитного или электростатического типов инжекторов [7], не позволяет решить эту задачу. Чтобы исключить трение при ускорении КТМ, в ФИАН впервые предложено использовать ВТСП-МАГЛЕВ технологии, необходимым элементом которых является левитирующий носитель КТМ, изготовленный из высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП-носитель) [3].

Работа с незакрепленными (т. е. свободными от подвеса) движущимися КТМ позволяет интегрировать все этапы производства КТМ в одну FST-производственную линию (FST-ПЛ): начальный этап (диффузионное заполнение сферических оболочек топливом [8]) + FST цикл (формирование КТМ методом FST [1, 2], доставка готовых КТМ с помощью левитации [3], контроль траектории инжектированной КТМ [4]).

Циклическая схема доставки КТМ. Перспективным направлением ФИАН является интеграция нескольких FST-ПЛ в единую систему. Рис. 1 представляет один из вариантов построения такой системы на основе циклической подачи топлива в камеру взаимодействия с мощным лазером. Этот вариант включает всего лишь две FST-ПЛ, которые могут работать попеременно, что в 2 раза снижает нагрузку по частоте на каждую линию в отдельности. Число FST-ПЛ может быть увеличено в соответствии с требованиями эксперимента до 4, 6, 8, и т. д.

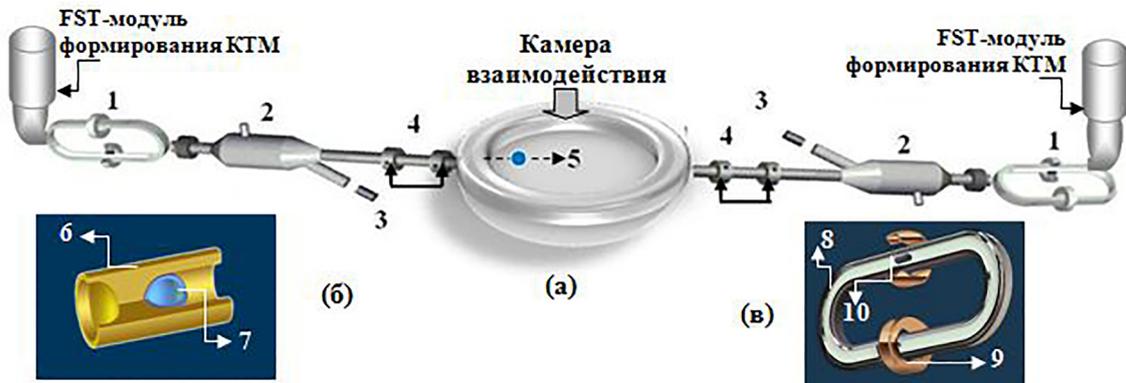


Рис. 1: Производство и доставка КТМ для циклического облучения лазером: (а) принципиальная схема: 1 – ВТСП-МАГЛЕВ ускоритель циклотронного типа, 2 – блок отделения КТМ от ВТСП-носителя, 3 – удаление отработанного носителя, 4 – система слежения и контроля за инжектированной КТМ на основе методов голографического распознавания образов, 5 – полет КТМ в камере взаимодействия в фокус лазерной установки ИТС; (б) ускоряемый элемент “ВТСП-носитель (6) + КТМ (7)”; (в) ВТСП-МАГЛЕВ ускоритель: 8 – магнитный трек замкнутого типа, 9 – ускоряющие катушки, 10 – “ВТСП-носитель + КТМ”.

Сделаем необходимые пояснения к рис. 1. Прежде всего, отметим, что инъекционная подача топлива в реактор может осуществляться только в случае использования свободных КТМ, незакрепленных на каком-либо подвесе. В ФИАН предложена и разработана технология на основе метода FST, которая позволяет производить и инжектировать незакрепленные КТМ в лазерный фокус с необходимой частотой [1–4] (схема показана на рис. 2).

Формирование твердого топливного слоя (изотопы водорода или их смеси) внутри массива движущихся оболочек по методу FST осуществляется при инъекционном транспорте незакрепленных оболочек между основными функциональными узлами FST-модуля (рис. 2(а), (б)): мишенный контейнер (МК) – канал формирования (КФ) – тестовая камера (ТК). Цикл формирования реализуется следующим образом. Находящиеся в МК оболочки с топливом (рис. 2(в), (г)) – стекший за счёт гравитации жидкий слой) инжектируются в КФ (рис. 2(б)), который представляет собой специальную вставку в криостат в виде спиральной вакуумированной трубки, охлаждаемой снаружи жидким гелием. Геометрия, материалы и режимы работы КФ детально описаны в работе [2]. При вращательно-поступательном движении оболочек внутри КФ происходит симметризация топливного слоя и его вымораживание на внутренней поверхности оболочек, т. е. собственно формирование КТМ. Механизм быстрого отбора тепла за счёт контактной теплопроводности (скорость $q = 1 - 50$ К/с) позволяет получить устойчивый изотропный криогенный слой [1, 2]. Кроме того, КТМ последовательно движутся в КФ одна за другой, что обеспечивает частотную инжекцию готовых КТМ в ТК (рис. 2(д), (е)). По существу, ТК – это интерфейсный узел между FST-модулем и МАГЛЕВ-ускорителем. После сборки ансамбля [2] “ВТСП-носитель + КТМ” (рис. 1(б)), он подается в систему доставки, где ускоряется без трения с помощью левитации (рис. 1(в)). Отметим, что время формирования методом FST даже для реакторной КТМ ($\varnothing \sim 4$ мм, масса ~ 4.5 мг [8]) не превышает 30 с [1, 2], а вот для традиционных – КТМ на подвесе – сутки и более [10]. Это позволяет значительно снизить запасы радиоактивного трития в системе и осуществить массовое производство дешевых КТМ с требуемой частотой повторения. Демонстрация работы основных узлов FST-модуля представлена на рис. 2.

Детальное обсуждение принципиальных основ работы FST-модуля и результаты по формированию криогенного слоя в движущихся КТМ, а также сравнение с традиционным подходом – использованием неподвижной КТМ, укрепленной на подвесе, можно найти в [1, 2].

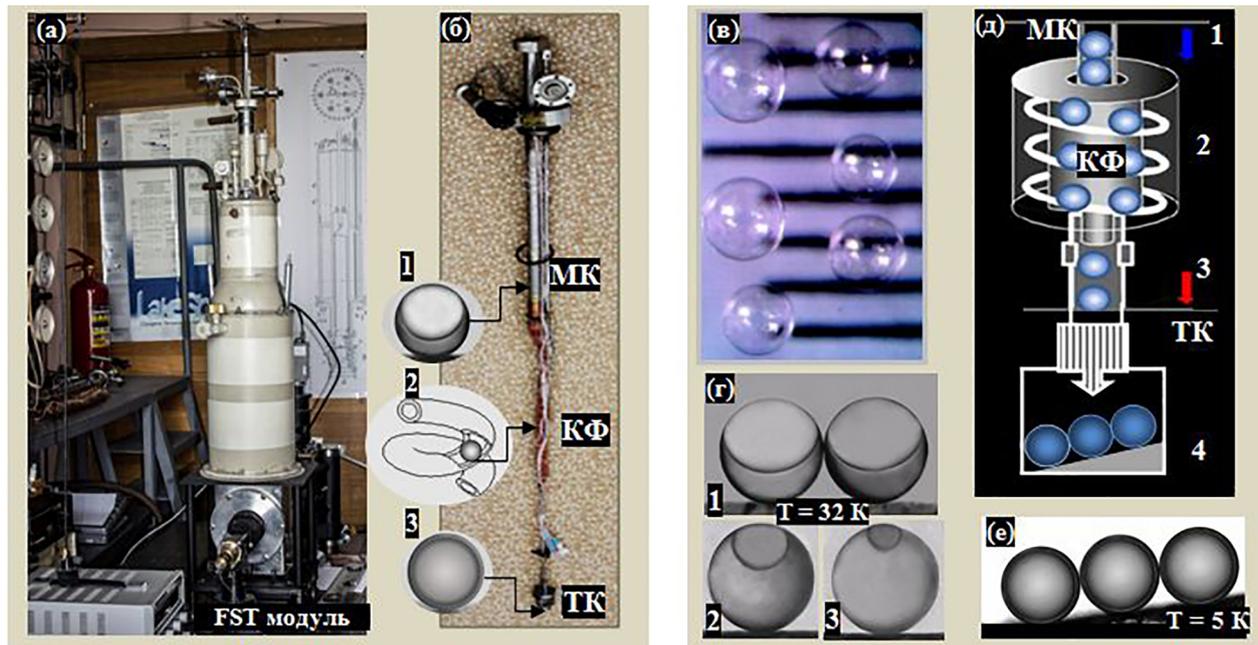


Рис. 2: FST-формирование КТМ в свободно движущихся оболочках: (а) общий вид FST-модуля (высота ~ 1.5 м); (б) общий вид спирального КФ с характерными точками локализации оболочки в процессе FST-формирования КТМ (1 – оболочка со стекшим жидким топливом перед инжекцией в КФ, 2 – качение оболочки вдоль КФ для симметризации жидкого топлива, 3 – готовая КТМ на выходе из КФ с твёрдым сферически-симметричным слоем топлива); (в) используемые полимерные оболочки (ФИАН, $\text{Ø} \leq 2$ мм [11]), (г) результаты экспериментов по диффузионному заполнению оболочек газообразным топливом до 100–1000 атм (кадры 1, 2, 3 – оболочки при $T = 32$ К, заполненные водородом до 445 атм (первые две), 765 атм и ~ 980 атм (последние две)); (д) схема работы 1-ой ступени FST-ПЛ (поточное формирование КТМ в процессе их движения между основными функциональными узлами): МК (1) – КФ (2) – ТК (3), 4 – вариант конструкции ТК с наклонным основанием; (е) результат инжекции в ТК готовых КТМ с частотой 0.1 Гц при $T = 5$ К.

ВТСП-МАГЛЕВ ускоритель. Важный аспект при производстве КТМ – это выживаемость криогенных топливных слоев в процессе их доставки в лазерный фокус установки ИТС. В ФИАН этот вопрос успешно решается в рамках программы по бесконтактному транспорту КТМ [3]. Принцип основан на явлении квантовой левитации ВТСП в магнитном поле [12], когда КТМ помещается внутрь левитирующего ВТСП-носителя (рис. 1(б)), который ускоряется в системе направляющих треков из постоянных магни-

тов (рис. 1(в)), т. н. permanent magnet guideways (PMG) система. В качестве материала для носителей КТМ применялись ВТСП II рода с высоким пиннингом вихрей, поскольку устойчивость левитационной системы обеспечивается в основном за счет захвата линий магнитного потока центрами пиннинга (или дефектами в строении решетки) [12]. Авторы использовали сверхпроводящие ленты СуперОкс второго поколения (2G-ВТСП) [13] с температурой сверхпроводящего перехода $T_C = 92$ К, которые раскрывают свой потенциал при чрезвычайно низких температурах, и особенно эффективны при $T < 40$ К. В работе [14] доказана в модельных экспериментах ($T \simeq 80$ К $< T_C$) возможность реализации ВТСП-МАГЛЕВ ускорения и сделаны оценки на перспективу (для рабочей температуры инжектора $T \sim 17$ К). Оценки показали перспективность этого направления как для мощных лазерных установок, так и будущего реактора ИТС.

В текущих экспериментах применялось несколько моделей ВТСП-носителей, изготовленных из 2G-ВТСП лент (см. рис. 3).



Рис. 3: Типичные модели ВТСП-носителя – левитация при $T \sim 80$ К: (а), (б) открытый параллелепипед (размеры подложки: 30×12 мм², толщина 0.2 мм; размеры желоба: длина 8 мм, ширина 5 мм, высота 4 мм, общая масса 1.25 г); (в) замкнутый параллелепипед (размеры $4 \times 4 \times 24$ мм³, толщина стенки 1 мм, общая масса 0.97 г); (г) левитация сборки из 2-х носителей (замкнутого параллелепипеда внутри открытого); (д) круглый цилиндр на подложке, внутри которого 7 сферических суррогатных мишеней (общая масса 0.24 г), что составляет 60% от массы сверхпроводника.

Отметим, что для поддержания температуры, близкой к $T \sim 80$ К $< T_C$ (условие левитации ВТСП-носителя), внутри корпуса ВТСП-носителя (замкнутый параллелепипед, рис. 3(в)) помещалась полимерная пена, пропитанная жидким азотом (температура кипения $T_N = 77$ К). Для открытого параллелепипеда (рис. 3(а)) и круглого цилиндра (рис. 3(д)) применялся жидкий азот, налитый непосредственно внутрь носителя, но вариант использования полимерной пены здесь также возможен (см. рис. 3(б)).

В работе [3] даны основы построения PMG-систем (линейных и кольцевых), а также представлены экспертные оценки, подтверждающие реальные перспективы доставки КТМ на принципах левитации. Линейный ускоритель может быть построен для

всего диапазона скоростей инъекции (200–400 м/с), причем для максимальной скорости $V = 400$ м/с длина ускорения составит $L_a = 20$ м при перегрузках $a < 500$ g. Если КТМ имеют достаточную механическую прочность, то может быть реализован и другой вариант: $V = 400$ м/с, $L_a = 10$ м, $a = 800$ g, что меньше максимально допустимых перегрузок ~ 1000 g. Однако в линейной РМГ-системе для реализации процесса ускорения с помощью бегущей магнитной волны потребуется значительное количество ускоряющих катушек с током – более 100 штук, – которые должны быть расположены вдоль всего магнитного трека. Поэтому в ФИАН, для снижения их числа, изучаются замкнутые РМГ – овалы и кольцевые, которые рассматриваются в качестве кандидатов для построения разгонных треков для циклотронного типа ускорителя (рис.1).



Рис. 4: Вертикальное положение ВТСП-носителя (1) над кольцевой системой РМГ-1 (2) с внешним диаметром $2R_{out} = 105$ мм и внутренним диаметром $2R_{inn} = 45$ мм, поле на поверхности магнита $B_{max} = 0.35$ Тл.

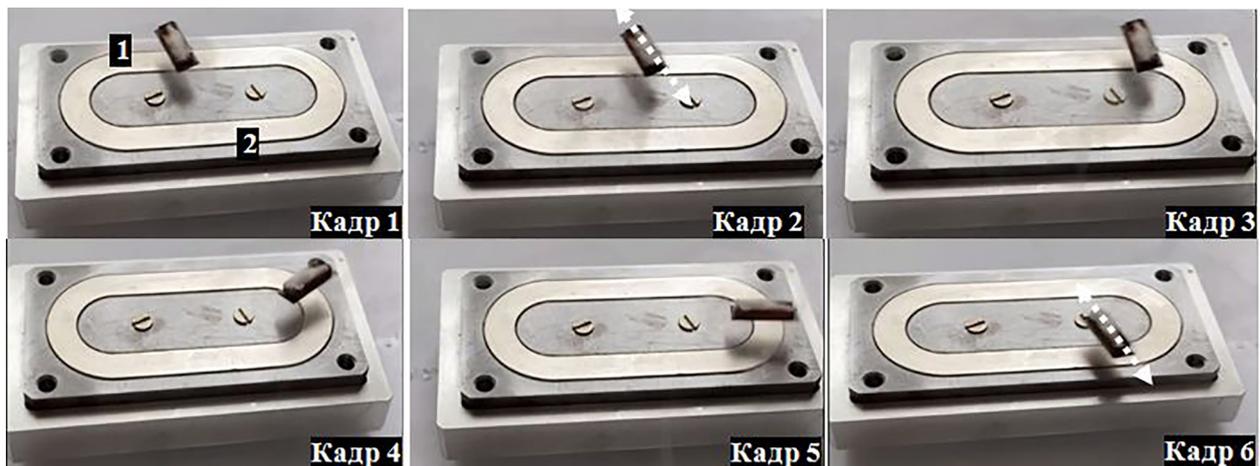


Рис. 5: Горизонтальное положение ВТСП-носителя (1) над овальной системой РМГ-2, (2) с магнитным треком 22×9.5 см², поле на поверхности магнита $B_{max} = 0.3$ Тл; ось носителя (белый пунтир) остается коллинеарной при его вращении.



Рис. 6: Вращение ВТСП-носителя (1) в исходном наклонном положении над кольцевой системой РМГ-1 (2) демонстрирует сохранение его пространственной ориентации в процессе движения (кадры 1 и 4 – начало и конец одного оборота).

Важным фактором при использовании замкнутых магнитных треков является сохранение пространственной ориентации ВТСП-носителя при его вращении. Поэтому была проведена специальная серия экспериментов (рис. 4–6, $T \sim 80$ К) с различным положением ВТСП-носителя относительно магнитного трека. Использовался механический запускающий импульс с целью избежать ориентирующего влияния внешнего магнитного поля на ВТСП-носитель.

Напомним, что 2G-ВТСП ленты, из которых изготовлен корпус ВТСП-носителя, относятся к материалам с высоким пиннингом вихрей. Это так называемые вихри Абрикосова [15], состояние которых выглядит как “вмороженное” в объёме сверхпроводящего материала, и любое пространственное перемещение сверхпроводника приведет к движению трубок магнитного потока, связанных с вихрем. Согласно правилу Ленца возникающий при этом индукционный ток всегда имеет такое направление, что он ослабляет действие причины, возбуждающей этот ток. Таким образом, эффект “вмороженного” потока (flux pinning effect or quantum locking phenomenon) позволяет зафиксировать образец ВТСП в пространстве, что приводит к его стабильности.

Результаты экспериментов подтвердили устойчивость ВТСП-носителя при его вращении над замкнутым магнитным треком как для кольцевой, так и для овальной геометрии.

Заключение. Частотная подача топлива является необходимым условием проведения современных экспериментов по ИТС и перехода к реакторным технологиям производства КТМ. Принцип работы ВТСП-МАГЛЕВ технологий заключается в ускорении ВТСП-носителя КТМ за счет эффекта квантовой левитации ВТСП в магнитном поле. При этом ВТСП-носитель изготавливается из материалов с большим количеством вихрей, которые раскрывают свой потенциал при низких температурах ($T < 90$ К), и особенно эффективны при $T < 40$ К. В работе доказана в модельных экспериментах

($T \simeq 80$ К) возможность реализации циклотронного способа ускорения ВТСП и сделаны оценки на перспективу (для рабочей температуры $T \simeq 17$ К) при развитии этого направления как для мощных лазерных установок, так и будущего реактора ИТС.

На данный момент, опираясь на результаты большого цикла экспериментальных и теоретических исследований (основные результаты суммированы в работах [1–4]), можно утверждать, что в России создана уникальная научная, инженерная и технологическая база для интеграции нескольких FST-производственных линий в единую циклическую систему и построения прототипа этой системы для демонстрации непрерывного формирования КТМ и их частотной бесконтактной доставки в фокус мощной лазерной установки или реактора ИТС.

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, High Power Laser Sci. Engin. **7**, e38 (2019). <https://doi.org/10.1017/hpl.2019.23>.
- [2] I. V. Aleksandrova, E. R. Koresheva, E. L. Koshelev, Nuclear Fusion **61**(12), 126009 (2021). <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ac2c4c>.
- [3] I. V. Aleksandrova, E. R. Koresheva, E. L. Koshelev, High Power Laser Sci. Engin. **10**, e11 (2022). <https://doi.org/10.1017/hpl.2022.1>.
- [4] I. V. Aleksandrova, E. R. Koresheva, E. L. Koshelev, et al., Phys. Atomic Nuclei **80** (7), 1227 (2017). <https://doi.org/10.1134/S1063778817070018>.
- [5] D. T. Goodin, N. B. Alexander, L. C. Brown, et al., Nuclear Fusion **44**(12), S254 (2004). <https://doi.org/10.1088/0029-5515/44/12/S17>.
- [6] R. Miles, M. Spaeth, K. Manes, et al., Fusion Sci. Technol. **60**, 61 (2011). <https://doi.org/10.13182/FST10-333>.
- [7] IAEA Coordinated Research Project F13020, Pathways to Energy from Inertial Fusion: Materials Research and Technology Development, 25 August 2020 – 31 December 2024. <https://www.iaea.org/projects/crp/f13020>.
- [8] И. В. Александрова, Е. Р. Корешева, Т. П. Тимашева и др., Вопросы Атомной Науки и Техники, Сер. Термоядерный синтез **42**(2), 66 (2019).

- [9] S. E. Bodner, D. G. Colombant, A. J. Schmitt, M. Klapisch, *Phys. Plasmas* **7**, 2298 (2000). <https://doi.org/10.1063/1.874063>.
- [10] E. Maeples, *Production of hydrogen ice layers for NIF targets*, Report, in: 7th Int. conf. on Inertial Fusion Science and Applications (September 12–16, 2011, Bordeaux, France).
- [11] N. G. Borisenko, V. S. Bushuev, A. I. Gromov, et al., *Sov. J. Quantum Electron.* **19** (9), 1221 (1989). <https://doi.org/10.1070/QE1989v019n09ABEH009124>.
- [12] V. L. Ginzburg, E. A. Andryushin, *Superconductivity* (New Jersey: World Sci., 2004).
- [13] И. В. Александрова, А. А. Акунец, П. И. Безотосный и др., *Краткие сообщения по физике ФИАН*, № 11, 3 (2015). <https://doi.org/10.3103/S1068335615110019>.
- [14] И. В. Александрова, А. А. Акунец, С. Ю. Гаврилкин и др., *Квантовая электроника* **53**(1), 34 (2023). DOI: 10.3103/S1068335623170025.
- [15] А. А. Абрикосов, *ЖЭТФ* **32**(6), 1442 (1957).

Поступила в редакцию 28 февраля 2025 г.

После доработки 22 апреля 2025 г.

Принята к публикации 22 апреля 2025 г.