

УДК 621.039.633

## КОРРЕКЦИЯ ТРАЕКТОРИИ КРИОГЕННОЙ ТОПЛИВНОЙ МИШЕНИ ПРИ ЕЁ ИНЖЕКЦИИ В ЛАЗЕРНЫЙ ФОКУС УСТАНОВКИ ИТС

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

*Изучался вопрос о разработке методов коррекции траектории криогенной топливной мишени (КТМ) при её инжекционной доставке в лазерный фокус установки ИТС. Одно из направлений связано с использованием различных электростатических полей. В нашем случае источник поля – это электрод в виде заряженной иглы (напряжение  $U = 500$  В). Была проведена успешная серия экспериментов в тестовой вакуумной камере (давление  $P = 10^{-5}$  Торр, температура  $T = 300$  К) с использованием в качестве суррогатных мишеней микросфер из стекла и полистирола (диаметр  $\varnothing = 0.7 - 2.0$  мм, толщина стенки  $\Delta = 10 - 15$  мкм). Осуществлена доставка инжектированных микросфер ( $\varnothing = 2.0$  мм,  $\Delta = 20$  мкм) на специальный держатель, расположенный в заданной точке внутри тестовой камеры. Устойчивость позиционирования микросфер на держателе была достигнута с помощью заряженной иглы в сборе с держателем. Полученные результаты найдут практическое применение при разработке и оптимизации перспективных систем высокоточной инжекционной доставки КТМ в лазерный фокус действующих установок ИТС.*

**Ключевые слова:** инерциальный термоядерный синтез (ИТС), криогенные топливные мишени (КТМ), инжекционная доставка КТМ, коррекция траектории КТМ.

*Введение.* При планировании и реализации экспериментов в области инерциального термоядерного синтеза (ИТС) создание системы частотной доставки бесподвесных

криогенных топливных мишеней (КТМ) в зону термоядерного горения мощной лазерной установки или будущего реактора ИТС является одной из ключевых задач в области разработки реакторных технологий [1]. Особенность процесса доставки заключается в требованиях на частотность, точность и температурный режим доставки. Требования к частоте инъекции КТМ для различных концепций реактора ИТС варьируется от 0.1 до 20 Гц [2]. При этом КТМ должна быть позиционирована в мишенной камере с точностью  $\pm 5$  мкм, а точность совмещения лазерных лучей составляет менее 20 мкм.

Процесс доставки КТМ в фокус мощной лазерной установки включает в себя стадию ускорения в инжекторе и стадию полета КТМ внутри мишенной камеры после её инъекции. Важным моментом в процессе доставки является коррекция траектории инжектированной КТМ. Это особо отмечается в документах Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ). В резюме совещания МАГАТЭ по проблемам управляемого ИТС в 2008 г. отмечалось: “Характерная особенность текущего этапа в развитии ИТС – это разработка научной и технологической базы для высокочастотной инъекции топлива в фокус мощной лазерной установки или реактора” [3]. Данное направление исследований остается ключевым и сейчас [4, 5].

Для того чтобы инжектор доставлял КТМ с требуемой точностью, ключевой проблемой является коррекция её траектории при полёте в мишенной камере. После инъекции КТМ движется только под действием силы тяжести, независимо от того, какой тип инжектора используется. Это дает основание применять одни и те же методы коррекции как для гравитационных, так и для электромагнитных инжекторов. Среди перспектив в этой области – возможность использования различных электростатических полей. В данной статье мы рассмотрим простейший случай электрода в виде заряженной иглы.

*Влияние поля иглы на траекторию объекта.* На рис. 1 схематически показано, как движутся объекты, например, сферические полимерные гранулы (рис. 1(а)), когда они вылетают из трубки либо свободно (под действием собственного веса), либо принудительно, под влиянием некоторого фактора (вибрация трубки, поток газа или иное).

В отсутствие электрического поля в пространстве, где летят гранулы, их рассеяние будет соответствовать законам баллистики. Тогда, распределение координат гранул в плоскости  $Z$  будет соответствовать двумерному распределению Гаусса (рис. 1(б)), дисперсия которого увеличивается с расстоянием от плоскости вылета ( $Z_0$ ).

Что же изменит наличие электрического поля? Гранула, вылетая из трубки, приобретает некоторый электрический заряд. Его величина может зависеть от множества причин – от трения, от особенностей химического состава гранулы и/или трубки, от

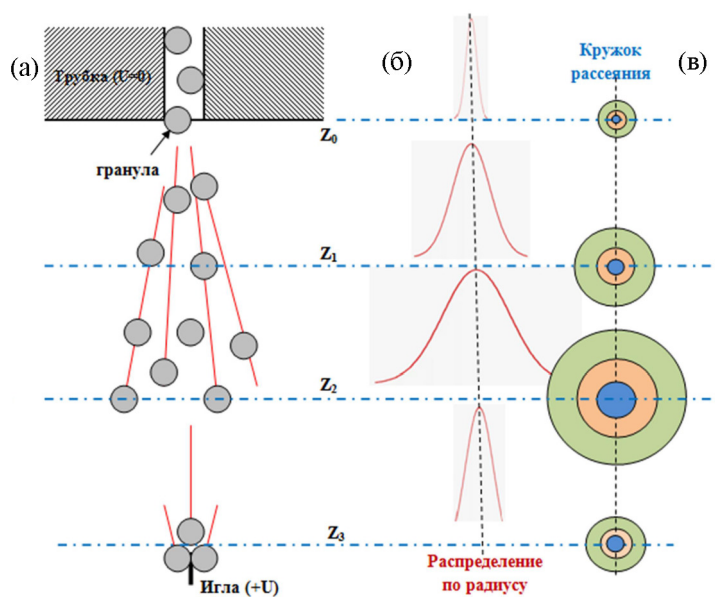


Рис. 1: Движение гранул из трубки под действием собственного веса: (а) движение на заряженную иглу; (б) распределение гранул по радиусу; (в) кружок рассеяния.

диэлектрической проницаемости материала гранулы, от приложенного напряжения, от влажности воздуха и от других факторов.

Получив некий заряд на выходе из трубки, заряженные гранулы движутся в электрическом поле заряженной иглы. На начальном этапе движения напряженность поля невелика, и гранулы будут двигаться практически также как и в отсутствие электрического поля – до плоскости  $Z_2$  на рис. 1. Ближе к игле напряженность поля ( $E_n$ ) растет как  $1/r^2$ :

$$E_n = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{\epsilon r^2}, \tag{1}$$

где  $r$  – расстояние до центра острия иглы,  $Q$  – заряд,  $k = \epsilon \cdot \epsilon_0$  – диэлектрическая постоянная среды.

Однако напряженность растет согласно (1) в целом, но вблизи самого острия эта зависимость становится сложнее из-за геометрии острия иглы, создавая эффект “концентрации” силовых линий: напряженность будет пропорциональна поверхностной плотности заряда, т.е.  $E_n = \sigma/(\epsilon \cdot \epsilon_0)$ . Так как заряд концентрируется на участках с минимальным радиусом кривизны, то по мере приближения к острию, напряженность электростатического поля растет очень резко, практически экспоненциально. Максимальное значение реализуется непосредственно на острие иглы, и может достигать значений, достаточных для пробоя воздуха (коронный разряд). В воздухе при нормальных

условиях этот режим реализуется при напряженности поля, приблизительно равной  $E_n = 30$  кВ/см.

Поскольку гранула, микросфера, или КТМ – это сферически-симметричные объекты, то если они обладают зарядом  $q$ , в электрическом поле их можно рассматривать просто, как точечные заряды. Сила  $\vec{F}$ , действующая на заряд  $q$  в электрическом поле с напряженностью  $\vec{E}$ , равна:

$$\vec{F} = q\vec{E}. \quad (2)$$

Величина ускорения микрочастицы (гранула, микросфера, или КТМ) будет, соответственно, равна:

$$\frac{d^2r}{dt^2} = \frac{q}{m}E, \quad (3)$$

где  $r$  – текущий радиус-вектор частицы, а  $m$  – её масса. Вблизи острия иглы напряженность поля будет стремиться к величине  $E \cong E_n = \sigma/(\varepsilon \cdot \varepsilon_0)$ .

Из (3) становится очевидным, что движение заряженной частицы в заданном электрическом поле полностью определяется отношением её заряда к массе. Для рассматриваемых нами объектов это отношение может быть достаточно большим (масса КТМ – не более единиц мг [1, 6]). В сильных электрических полях такие объекты будут двигаться практически вдоль силовых линий поля. В итоге они долетают до иглы, где и останавливаются, фактически прилипая к ней (рис. 1(в)). Это обстоятельство можно использовать для управления движением КТМ.

Настоящая работа посвящена экспериментальной проверке возможности коррекции траектории в электростатическом поле заряженной иглы. Для этого была проведена серия макетных испытаний с использованием полых микросфер из полистирола и стекла. Чтобы исключить роль побочных факторов, эксперименты проводились с использованием тестовой вакуумной камеры с контролируемой температурой стенок. Параметры камеры даны в табл. 1. Для изготовления микросфер использовались материалы, применяемые для изготовления оболочек КТМ. Микросферы подавались в камеру с помощью криогенного гравитационного инжектора [7, 8]. Поскольку их инжекция осуществлялась в вакуумную камеру ( $P = 10^{-5}$  Торр), то явление стекания заряда с острия не рассматривалось.

*Постановка экспериментов и обсуждение полученных результатов.* Простейший вариант классической КТМ, применяемой в экспериментах по ИТС, представляет собой полую полимерную микросферу с расположенным внутри нее криогенным шаровым слоем топлива. Это твердый слой из изотопов водорода толщиной  $W = 50 - 200$  мкм.

В состав криогенного слоя могут входить как нерадиоактивные изотопы водорода (водород  $H_2$ , дейтерий  $D_2$ ), так и радиоактивные (например, дейтерий-тритиевая смесь D-T: 50% молекул DT, 25% дейтерия и 25% трития). Во втором случае надо иметь в виду влияние заряженных частиц, возникающих за счет распада трития, на электризацию полимерной микросферы, что непосредственно зависит от геометрических размеров КТМ и массы D-T топлива. Поэтому, на начальной стадии исследований мы будем рассматривать вариант нерадиоактивного топлива.

Т а б л и ц а 1

*Параметры тестовой вакуумной камеры*

Величина	Значение
Давление в камере	$10^{-5}$ Торр
Температура стенок	300 К
Текущее напряжение на игле	500 В
Источник высокого напряжения	до 3.5 кВ
Начальный зазор*	12 мм
Скорость записи	2100 к/с

**Примечание:** \* – начальное расстояние между центром микросферы и иглой.

Диаметр микросферы варьируется в пределах  $\varnothing = 0.5 - 4$  мм, толщина стенки  $\Delta = 10 - 15$  мкм. Масса реакторной КТМ ( $\varnothing = 4$  мм) составляет  $\sim 3.5$  мг для  $D_2$  топлива и  $\sim 4.4$  мг для D-T [9]. Максимальное значение силы тяжести для КТМ крайне мало ( $4.3 \cdot 10^{-5}$  Н), что позволяет надеяться на успешную реализацию предлагаемого метода для коррекции траектории инжектированной КТМ. Эксперименты проводились с использованием криогенного гравитационного инжектора, изготовленного в ФИАН [7, 8] и состыкованного с тестовой вакуумной камерой (рис. 2(а) и 2(б)).

Для сравнения в качестве инжектируемого объекта использовались микросферы из стекла и полистирола [10] со следующими параметрами:  $\varnothing = 0.7 - 2.0$  мкм, толщина стенки  $\Delta = 10 - 15$  мкм; плотность материала микросферы  $1.05$  г/см<sup>3</sup> (полистирол) и  $2.1$  г/см<sup>3</sup> (стекло); диэлектрическая проницаемость  $2.5$  (полистирол) и  $3.8$  (стекло). Как результат, можно констатировать, что эксперименты по коррекции траектории инжектированной микросферы с использованием электростатических полей успешно осуществлены для варианта заряженной иглы и оболочек из стекла и полистирола (рис. 2(а)–(д)).

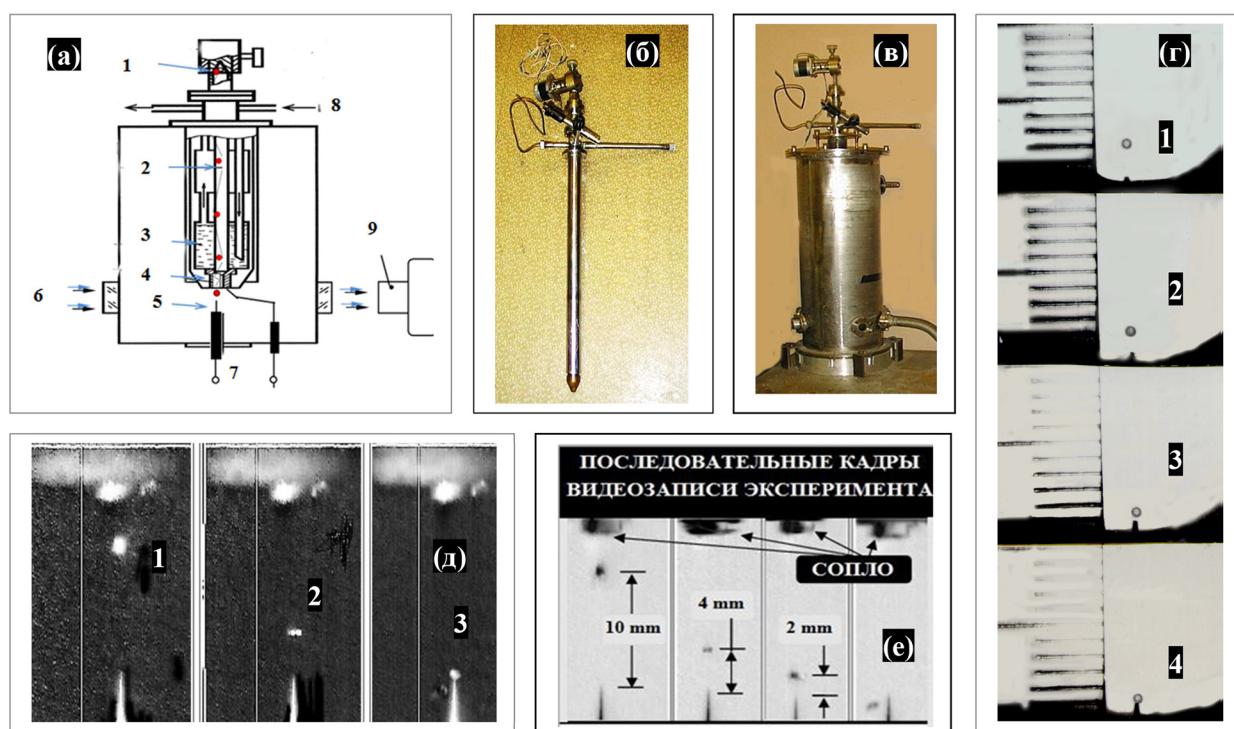


Рис. 2: Схема проведения эксперимента: (а) схема гравитационного инжектора, состыкованного с вакуумной камерой (1 – микросфера, 2 – транспортный канал, 3 – жидкий гелий, 4 – сопло инжектора, 5 – заряженная игла, 6 – зондирующее излучение, 7 – высоковольтное питание, 8 – узел подачи гелия, 9 – видеокамера); (б) общий вид криогенного гравитационного инжектора; (в) сборка инжектора с вакуумной тестовой камерой; (г) полет стеклянной микросферы ( $\varnothing = 720$  мкм,  $\Delta = 15$  мкм) в поле заряженной иглы (1, 2, 3 – полет микросферы, 4 – микросфера на острие иглы); (д) полет полистирольной микросферы ( $\varnothing = 1000$  мкм,  $\Delta = 10$  мкм) в поле заряженной иглы (1, 2 – полет микросферы, 3 – микросфера на острие иглы); (е) полёт инъецированной микросферы из полистирола в направлении незаряжённой иглы: наблюдается уход микросферы из фокальной области.

На рис. 2(е) показаны результаты контрольного эксперимента, выполненного в тех же условиях, но при отсутствии заряда на игле. Хорошо видно, что в случае незаряженной иглы наблюдается уход инъецированной микросферы из фокальной области, фиксируемой в эксперименте положением острия иглы.

Дальнейшее направление исследований связано с изучением влияния характеристик внешнего поля на формирование и динамику траектории инъецированной КТМ. Это

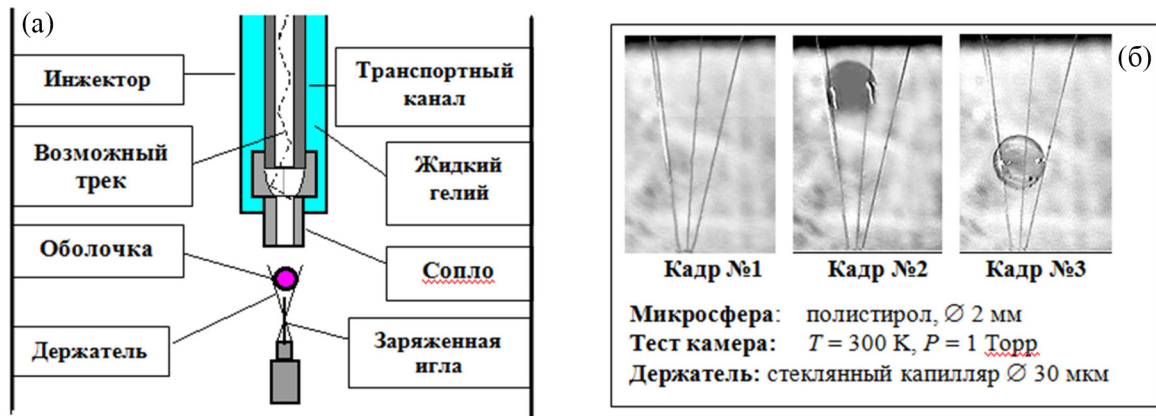


Рис. 3: Доставка инжектированной микросферы из полистирола ( $\varnothing = 2$  мм,  $\Delta = 20$  мкм) на специальный держатель, заранее расположенный в заданной точке мишенной камеры, локализованной ниже фокальной точки: (а) схема эксперимента; (б) результаты инъекции микросферы.

позволит определить положение КТМ вдоль траектории в любой момент времени и планировать размещение точки её прибытия (лазерный фокус) способом, удобным для реализации её равномерного облучения. Поэтому в программу ФИАН включено направление для исследования инъекционной доставки КТМ на специальный держатель. Этот держатель выполнен из 3-х скрещенных стеклянных капилляров (рис. 3(б)), укрепленных в заданной точке мишенной камеры, локализованной ниже фокальной точки.

Экспериментально, основная проблема связана здесь с тем, чтобы достичь требуемой устойчивости при позиционировании КТМ. Для решения этой задачи были проведены модельные эксперименты с микросферами из полистирола, параметры которых ( $\varnothing = 2$  мм,  $\Delta \sim 20$  мкм) соответствуют размеру КТМ ударного поджига (масса топлива  $\sim 300$  мкг), предназначенных для текущих исследований альтернативных схем зажигания топлива на лазерных установках ИТС среднего и мегаджоульного уровня [12]. Эксперименты показали, что устойчивость локализации микросферы на держателе обеспечивается за счет заряженной иглы, выполненной в сборе с держателем, как это показано на рис. 3(а).

Схема и результаты экспериментов представлены на рис. 3. В качестве держателя использовался трипод в виде трёх скрещенных капилляров (материал капилляров – стекло, диаметр каждого капилляра –  $\varnothing = 30$  мкм). Основной результат – надёжная фиксация микросферы на держателе. Это позволяет реализовать следующий подход к инъекционной доставке КТМ: траектория КТМ определяется заранее и предсказыва-

ется ее дальнейшее движение, в то время, как лазерные пучки динамически настраиваются на летящую КТМ.

Поскольку температура КТМ в момент облучения лазером должна быть  $\sim 18$  К [6], то в ближайшей перспективе планируются эксперименты с различной температурой инжектированных микросфер, что обеспечивается использованием криогенного гравитационного инжектора [7, 8].

*Заключение.* Реализация инъекции КТМ и методы коррекции её траектории при полёте в мишенной камере рассматриваются в качестве критических элементов исследовательских программ по ИТС, направленных на разработку энергии термоядерного синтеза в ведущих лабораториях мира. Важность данного направления определяется еще и тем, что доставка КТМ способом инъекции – это единственная возможность реализовать её равномерное облучение на установках ИТС.

В настоящей статье изучался вопрос о разработке методов коррекции траектории КТМ при её инжекционной доставке в фокус действующих лазерных установок. Представлены результаты первого этапа работы по коррекции траектории с использованием электростатических полей. В качестве инжектируемого объекта использовались микросферы из стекла и полистирола. Инъекция осуществлялась с помощью гравитационного инжектора, различные варианты которого успешно развиваются в ФИАН [7, 8]. Важным является тот факт, что гравитационный инжектор занимает довольно малый телесный угол внутри мишенной камеры (менее  $15^\circ$ ), что не превышает телесный угол любого диагностического средства. Кроме того, с точки зрения доставки топлива в будущий реактор ИТС, реакторная КТМ, безусловно, должна быть свободной, т.е. незакрепленной на каком-либо подвесе, и должна доставляться именно способом инъекции. Поэтому развитие реакторных технологий [1, 13, 14], является принципиальным условием, позволяющим осуществить частотную доставку КТМ в зону термоядерного горения.

Работа выполнена в рамках государственного задания Физического института им. П. Н. Лебедева РАН.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] I. V. Aleksandrova, E. R. Koresheva, E. L. Koshelev. Nuclear Fusion **61**(12), 126009 (2021). <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ac2c4c>.

- [2] National Research Council. *An Assessment of the Prospects for Inertial Fusion Energy* (Washington D.C.: National Academies Press, 2013). <https://nap.nationalacademies.org/catalog/18289/an-assessment-of-the-prospects-for-inertial-fusion-energy>.
- [3] K. A. Tanaka, *Nuclear Fusion* **49**(10), 104004 (2009). <https://doi.org/10.1088/0029-5515/49/10/104004>.
- [4] D. Batani, A. Colaïtis, F. Consoli, et al., *High Power Laser Sci. Engin.* **11**, e83 (2023). <https://doi.org/10.1017/hpl.2023.80>.
- [5] K. Agatsuma, K. Suzuki, T. Sugimoto, et al., *Nuclear Fusion* **64**, 096035 (2024). <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ad64e8>.
- [6] 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>.
- [7] I. V. Aleksandrova, E. R. Koresheva, *High Power Laser Sci. Engin.* **7**, e38 (2019). <https://doi.org/10.1017/hpl.2019.23>.
- [8] Ю. А. Меркульев, А. А. Акунец, Н. Г. Борисенко и др., Новые технологии в инерциальном термоядерном синтезе. Препринт ФИАН № 25, 2005, 44 с.
- [9] A. L. Kritcher, D. J. Schlossberg, C. R. Weber, et al., *Phys. Plasmas* **31**, 070502 (2024). <https://doi.org/10.1063/5.0210904>.
- [10] V. Brandon, B. Canaud, M. Temporal, R. Ramis, *Nuclear Fusion* **54**(8), 083016 (2014). <https://doi.org/10.1088/0029-5515/54/8/083016>.
- [11] E. R. Koresheva, I. V. Aleksandrova, I. E. Osipov, et al., *Fusion Sci. Technol.* **43**(3), 290 (2003). <https://doi.org/10.13182/FST03-A269>.
- [12] I. V. Aleksandrova, A. A. Belolipetskiy, E. R. Koresheva, S. M. Tolokonnikov, *Laser and Particle Beams* **26**(4), 643 (2008). <https://doi.org/10.1017/S0263034608000621>.
- [13] I. V. Aleksandrova, E. R. Koresheva, *High Power Laser Sci. Engin.* **5**, e11 (2017). <https://doi.org/10.1017/hpl.2019.23>.
- [14] E. R. Koresheva, I. V. Aleksandrova, M. N. Agapov, et al., *High Power Laser Sci. Eng.* **14**, e6 (2026). <http://dx.doi.org/10.1017/hpl.2025.10094>.

Поступила в редакцию 7 апреля 2026 г.

После доработки 14 апреля 2026 г.

Принята к публикации 15 апреля 2026 г.