

# Термоядерные мишени непрямого инициирования со свободно летящими капсулами с горючим

М.Л.Шматов

*Предложены термоядерные мишени непрямого инициирования с капсулами с горючим, находящимися на стадии облучения рентгеновским излучением в состоянии свободного полета. Отсутствие конструктивных элементов, фиксирующих капсулу с горючим в начале этой стадии, сделает невозможным зарождение связанных с ними неустойчивостей и тем самым улучшит сжатие горючего.*

**Ключевые слова:** лазерный термоядерный синтез, не прямое инициирование, неустойчивости.

## 1. Введение

В экспериментах с лазерными термоядерными мишенями непрямого инициирования на NIF (National Ignition Facility) наличие в составе мишеней конструктивных элементов, фиксирующих капсулы с горючим, в ряде случаев приводило к зарождению неустойчивостей, оказывающих существенное отрицательное влияние на симметрию сжатия горючего и, как следствие, на число реакций синтеза, происходящих в результате сжатия [1–5]. Количественные параметры, описывающие этот эффект, сильно зависят от режима сжатия, метода фиксации капсулы с горючим, материала и толщины аблятора [1–5]. Наиболее чувствительны к обсуждаемым неустойчивостям пластиковые абляторы [4, 5].

В большинстве экспериментов на NIF капсула с горючим фиксировалась так называемым тентом, состоящим из двух тонких пластиковых мембран [1–5]. Использовались тенты двух типов, получившие названия «номинальный тент» и «полярный тент» [1–5] (рис.1). В экспериментах с пластиковыми абляторами и высокоэнтропийным сжатием дейтерий-тритиевого горючего замена номинального тента (эксперимент N150211, рис.1,а) на полярный (эксперимент N171001, рис.1,б) существенно улучшила симметрию и, как следствие, другие параметры сжатия (остальные параметры мишеней и условия их облучения приблизительно совпадали) [5]. Выход нейтронов  $Y_{DT}$  возрос от  $(8.73 \pm 0.18) \times 10^{15}$  до  $(10.69 \pm 0.30) \times 10^{15}$  [5]. В качестве основной причины улучшения симметрии сжатия рассматривается уменьшение площадей  $A_{tent}$  областей роста неустойчивостей вблизи границ областей контакта мембран и аблятора [5]. При оценке зависимости  $A_{tent}$  от типа тента полагается, что ширина областей развития неустойчивостей мала по сравнению с периметрами этих границ и не зависит от типа тента [5]. Согласно данному приближению, замена номинального тента по-

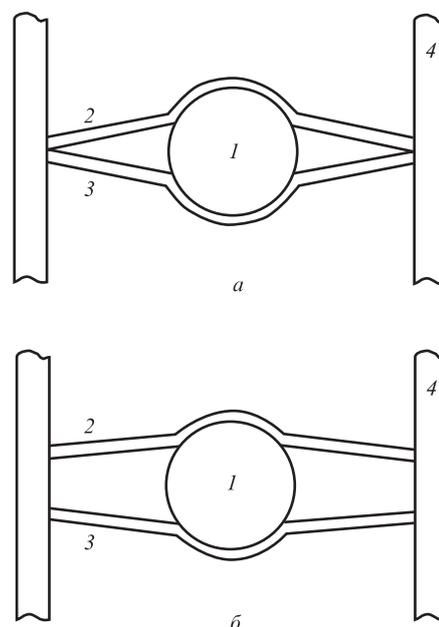


Рис.1. Упрощенные схемы фиксации капсулы с горючим мишени непрямого инициирования номинальным (а) и полярным (б) тентами: 1 – капсула с горючим; 2, 3 – пластиковые мембраны; 4 – часть хольраума (оболочки, удерживающей излучение).

лярным уменьшила  $A_{tent}$  приблизительно в 4.3 раза [5]. Дальнейшее уменьшение  $A_{tent}$  в настоящее время невозможно по причине ограничений, накладываемых параметрами используемых материалов [5].

Пока не ясно, произойдет ли существенное, сопровождающееся заметным ростом  $Y_{DT}$ , улучшение симметрии высокоэнтропийного сжатия дейтерий-тритиевого горючего в капсуле с пластиковым аблятором при дальнейшем уменьшении  $A_{tent}$ , если оно окажется возможным, или при использовании других методов фиксации капсулы с горючим [5]. Данная проблема представляет самостоятельный научный интерес. В любом случае предотвращение зарождения или заметного развития неустойчивостей, связанных с фиксацией капсулы с горючим, необходимо для выяснения принципиальной возможности эффективного низкоэнтропийного сжатия (см., напр., [4]).

М.Л.Шматов. Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, Россия, 194021 С.-Петербург, Политехническая ул., 26; e-mail: M.Shmatov@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 4 ноября 2020 г., после доработки – 31 декабря 2020 г.

Подчеркнем, что пластиковые абляторы обладают определенными преимуществами [4, 6–12]. В частности, они позволяют создавать высококачественные капсулы с горючим при использовании диффузионного заполнения [7–12]. Производительность и другие параметры этого метода удовлетворяют требованиям производства мишеней для термоядерных электростанций [7–12]. Отсутствие в абляторе отверстия для заполнения горючим позволит избежать зарождения связанных с ним неустойчивостей (см., напр., [4, 5]).

Зарождение неустойчивостей, связанных с фиксацией капсулы с горючим на начальной стадии ее облучения рентгеновским излучением, будет предотвращено при отказе от такой фиксации, или, другими словами, при облучении капсулы в состоянии свободного полета. Этот полет, некоторые варианты реализации которого рассмотрены ниже, будет маломасштабным аналогом полета мишени прямого инициирования в реакторной камере термоядерной электростанции (см., напр., [7, 9–15]). Предложенный подход предназначен, в первую очередь, для экспериментов по инициированию одиночных микровзрывов лазерным излучением. Целесообразность его реализации на термоядерных и гибридных электростанциях, а также при инициировании одиночных микровзрывов другими способами, требует специального исследования и в настоящей статье не затрагивается.

## 2. Варианты реализации свободного полета капсулы с горючим

### 2.1. Основные элементы наиболее простых мишеней

Свободный полет капсулы с горючим наиболее просто реализовать при ее инъекции в оболочку, удерживающую рентгеновское излучение (эта оболочка обычно называется хольраумом (hohlraum)), при прямом воздействии поршня инжектора на капсулу (рис.2) или при фиксации капсулы внутри такой оболочки в начальном положении, отличающемся от положения при облучении (рис.3). В последнем случае полет капсулы с горючим может происходить под действием как исключительно силы тяжести, так и силы тяжести и импульса, целенаправленно сообщаемого капсуле. Фиксация капсулы с горючим при установке такой мишени и других предварительных действиях с ней может производиться, например, держа-

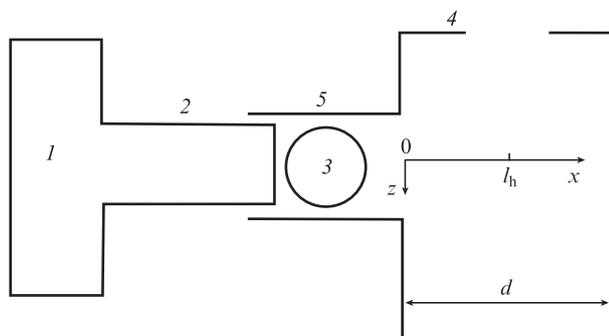


Рис.2. Вариант мишени с инъекцией капсулы с горючим в вертикально расположенный цилиндрический хольраум при прямом воздействии поршня инжектора на капсулу: 1 – толкатель поршня инжектора; 2 – поршень инжектора; 3 – капсула с горючим в начальном положении; 4 – хольраум; 5 – ствол инжектора.

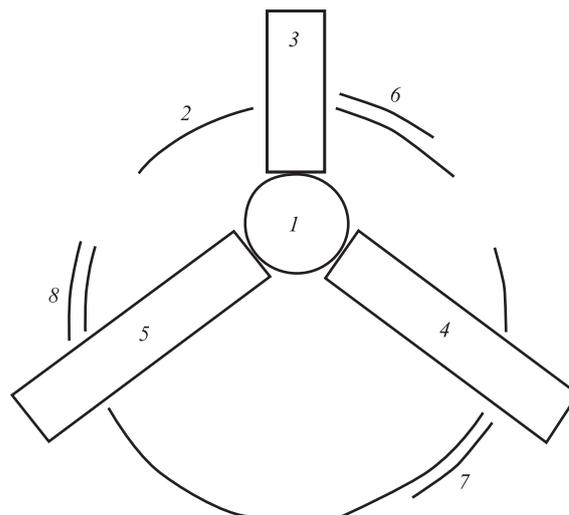


Рис.3. Вариант мишени со свободным падением капсулы с горючим в хольрауме без придания ей начального импульса:

1 – капсула с горючим в начальном положении; 2 – хольраум; 3–5 – держатели; 6–8 – шторки (конструкционные элементы, обеспечивающие движение держателей и шторок, не показаны).

телями – конструкционными элементами, быстро вытаскиваемыми из хольраума перед облучением мишени (см. рис.3). Для их перемещения, а также для инъекции капсулы с горючим в ряде случаев могут использоваться электромагниты. Вертикальное расположение цилиндрического хольраума на рис.2 соответствует экспериментам на NIF [1–5, 16].

Конструкционные элементы мишени, предотвращающие или компенсирующие утечку заполняющего хольраум газа (см., напр., [1–5]), на рис.2 и 3 не показаны. Начальное давление этого газа в мишени, показанной на рис.2, должно учитывать его последующее сжатие в процессе инъекции капсулы с горючим.

Движение поршня инжектора мишени должно быть организовано так, чтобы его поверхность, непосредственно воздействующая на капсулу, в дальнейшем служила элементом внутренней поверхности хольраума. Одно из условий реализации этого сценария состоит в том, что данная поверхность должна обладать покрытием, в составе которого есть достаточно толстый слой из тяжелого элемента, например золота, или материала, состоящего из нескольких тяжелых элементов (см., напр., [1–5, 16, 17]; в варианте с золотом минимальная толщина такого слоя – 8 мкм [17]). Для предотвращения загрязнения аблятора одним или несколькими тяжелыми элементами (пример возможного отрицательного проявления подобного загрязнения приведен в [5]) может потребоваться нанесение поверх этого слоя тонкого слоя из материала, не содержащего тяжелых элементов, например пластика. Отметим, что в работе [16] описаны хольраумы с тонким (0.4 – 0.6 мкм) внутренним слоем из золота и бора (содержание бора – 40% по числу атомов), нанесенным на слой урана большей толщины.

В варианте, показанном на рис.3, после освобождения капсулы с горючим держатели полностью убираются из хольраума через отверстия, которые в дальнейшем закрываются шторками для предотвращения или уменьшения утечки теплового излучения. Возможны и другие варианты. В частности контактные поверхности держателей могут служить в качестве элементов внутренней по-

верхности хольраума. В таком случае они должны иметь вышеупомянутые покрытия.

Точность фиксации капсулы с горючим при помощи тента в цилиндрическом хольрауме составляет приблизительно 10 мкм [5]. По-видимому, основные технические трудности эффективной реализации подхода, предложенного в нашей статье, определяются необходимостью задания положения капсулы с горючим в момент облучения мишени лазерным излучением с приблизительно такой же точностью. Данная задача представляется сложной, но разрешимой, т. к. как длина траектории капсулы с горючим в хольрауме будет мала (~1 мм).

## 2.2. Точность доставки капсулы с горючим при ее инъекции в цилиндрический, вертикально расположенный хольраум

Вначале рассмотрим возможность достижения точности 10 мкм при реализации метода, показанного на рис.2, для координат в плоскости, перпендикулярной начальному направлению полета капсулы с горючим. Обозначим отклонение центра капсулы с горючим в этой плоскости от центра хольраума через  $\Delta_{\perp}$  и воспользуемся данными по точности стрельбы (далее термин «точность» используется для описания и линейных и угловых величин). Ранее практически такой же подход был использован в работах [13, 14] – проблемы пневматической инъекции мишени прямого инициирования в камеру термоядерной электростанции анализировались с использованием данных о точности пневматического оружия. В разд.10.3.2 книги [13] сообщается следующее: «Точность попадания из современных прецизионных воздушных пневматических ружей достигает 1 мм на расстоянии 12 м по горизонтальной траектории». Статья [14] содержит подобное утверждение: «Пневматические винтовки достигли точности  $\pm 0.1$  мрад». Данная величина сравнивается с точностью  $\pm 0.3$  мрад, соответствующей доставке термоядерной мишени в центр камеры термоядерной электростанции на расстояние 17 м с точностью  $\pm 5$  мм [14]. При этом отмечается, что пули пневматической винтовки имеют большую плотность, а условия в ее стволе могут быть неприемлемы для хрупкой мишени [14].

В экспериментах N150211 и N171001 внутренний диаметр хольраумов  $d$  был равен 5.75 мм [5]. Очевидно, что планируемое горизонтальное перемещение центра капсулы с горючим в хольрауме  $l_h$  (см. рис.2) равно  $d/2$ . Параметры  $l_h \approx 3$  мм и  $\Delta_{\perp} \approx 10$  мкм соответствуют отношению  $\Delta_{\perp}/l_h \approx 3.3 \times 10^{-3} \ll 10^{-4}$ . Подчеркнем, однако, что в работе [14] говорится о точности винтовки. В [13] тип ствола не указан, но естественно предположить, что когда речь идет о прецизионном ружье, имеется в виду нарезной ствол (см. также [18, 19]). В экспериментах с мишенями, близкими по конструкции к показанной на рис.2, капсуле с горючим может быть сообщено стабилизирующее вращение. Для этого капсула должна размещаться в поддоне, соединенном с поршнем подшипником и раскручиваемом перед приданием ему ускорения в линейном направлении. Похожий сценарий, а именно метание предварительно раскрученного диска продуктами горения смеси водорода и кислорода, описан в [20]. Поскольку поршень и поддон соединены, поддон может рассматриваться и как часть поршня. Здесь учтено, что оптимальная скорость капсулы с горючим в рассматриваемых ситуациях мала (см. ниже), поэтому вращение поддона при по-

мощи нарезов в стволе инжектора и выступов на поддоне (см., напр., [18]) было бы неэффективным. Подчеркнем, что вращение стабилизирует полет пуль разной формы, в том числе близкой к сферической [18]. Вращение капсулы с горючим может представить интерес для отдельных экспериментов с предельной точностью доставки капсулы с горючим в центр хольраума, но приведет к дополнительному усложнению мишени и эксперимента в целом, поэтому во многих экспериментах будет желательно обойтись без него. Данные по рассеиванию круглых пуль гладкоствольных ружей [19] позволяют предположить, что это возможно.

При стрельбе круглой пулей из гладкоствольного ружья на расстоянии 50 м можно добиться попадания всех пуль в круг диаметром 20–25 см [19]. Отношение радиуса этого круга к дальности стрельбы приблизительно равно  $(2 - 2.5) \times 10^{-3}$ , что меньше приведенного выше значения  $\Delta_{\perp}/l_h \approx 3.3 \times 10^{-3}$ .

Большие требования к точности изготовления капсул с горючим, связанные с необходимостью обеспечения сильного сжатия горючего, представляются фактором, способствующим высокой точности инъекции. Отметим, что в работе [6] сообщается об изготовлении сферических пластиковых оболочек, предназначенных для использования в качестве абляторов, со сферичностью лучше 0.5 мкм.

При использовании мишени, показанной на рис.2, капсула с горючим будет скользить в стволе инжектора. Проблема допустимости этого скольжения требует специального экспериментального исследования (см. также [12], где говорится о недопустимости скольжения мишени прямого инициирования по одному из элементов оборудования, применяемого при их производстве для формирования слоя дейтерий-тритиевого льда). Используемое в нашей статье предположение о его допустимости, т. е. о возможности избежать повреждения поверхности аблятора и неприемлемого нагрева горючего в результате скольжения, основано на том, что скорость капсулы с горючим  $v_0$  на момент входа ее центра в полость, заполняемую впоследствии рентгеновским излучением, будет довольно мала. Для мишени, показанной на рис.2, достаточно скорости  $v_0$  порядка 0.1–1 м/с. Это связано с тем, что минимальное значение  $v_0$  в основном определяется требованием малости абсолютной величины  $\Delta z$  вертикального перемещения капсулы с горючим за время ее полета в хольрауме (оно компенсируется превышением начального положения центра капсулы с горючим над центром хольраума).

Для начальной оценки возможных значений  $v_0$  воспользуемся приближением, не учитывающим влияния заполняющего хольраум газа [1–5] на движение капсулы с горючим. Согласно этому приближению, которое будет использовано и далее,

$$\Delta z = \frac{g}{2} \left( \frac{l_h}{v_0} \right)^2, \quad (1)$$

где  $g \approx 9.81$  м/с<sup>2</sup> – ускорение свободного падения. Из формулы (1) следует, например, что при  $l_h = 3$  мм,  $v_0 = 1$  м/с  $\Delta z \approx 4.4 \times 10^{-3}$  см. С учетом характерных длин хольраумов, составляющих несколько миллиметров [1–5, 16], это вполне допустимо. Переписав формулу (1) в виде  $v_0 = l_h \sqrt{g/(2\Delta z)}$  и подставив в это выражение величину  $\Delta z = 1$  мм, которая также представляется допустимой, и  $l_h = 3$  мм, получим  $v_0 \approx 0.21$  м/с.

Малость  $v_0$  приводит к малости характерных значений ускорения  $a$  капсулы с горючим в стволе инжектора длиной  $l_b$  порядка 0.1–1 см. Для примера рассмотрим ситуацию, когда  $a$  постоянно. Обозначим путь, на котором изначально неподвижная капсула с горючим приобретает скорость  $v_0$ , через  $l_a$ . Эта величина меньше  $l_b$  (причины приведены ниже), однако мишень может быть сконструирована так, что  $l_a$  и  $l_b$  будут сопоставимы. Очевидно, что в обсуждаемой ситуации  $a = v_0^2/(2l_a)$ . Из этой формулы следует, например, что

$$a = 100 \text{ м/с}^2 \approx 10.2g \text{ при } v_0 = 1 \text{ м/с}, l_0 = 0.5 \text{ см},$$

$$a = 50 \text{ м/с}^2 \approx 5.1g \text{ при } v_0 = 1 \text{ м/с}, l_0 = 1 \text{ см}.$$

Капсулы с дейтерий-тритиевым льдом, эксперименты с которыми представляют наибольший интерес, выдержат, при достижимом качестве льда, ускорение до 500g или даже 1000g [12].

Превышение  $l_b$  над  $l_a$  обусловлено следующим. В случае мишени, показанной на рис.2, после достижения капсулой с горючим скорости  $v_0$  (здесь полагается, что торможение капсулы с горючим в стволе после прекращения ускорения пренебрежимо мало) движение поршня должно замедлиться так, чтобы к моменту попадания капсулы в центр хольраума контактная поверхность поршня сформировала соответствующий участок его внутренней поверхности. Кроме того, возможно, что минимальное значение  $l_b$  будет определяться требованиями точности попадания капсулы с горючим в центр хольраума – увеличение длины ствола повышает точность стрельбы. В случае использования вращающегося поддона минимальное значение  $l_b - l_a$  будет определяться торможением поддона и необходимостью закрытия соответствующего отверстия в хольрауме шторкой или диафрагмой после попадания в него капсулы с горючим (здесь, для упрощения, устройство для закрытия отверстия считается частью ствола инжектора). Подобное требование к  $l_b - l_a$  возникает и в случае недопустимости скольжения капсулы с горючим в стволе, которого можно избежать при наличии в поршне выемки для размещения капсулы с горючим. Капсула должна находиться в выемке в процессе ускорения и по инерции выходить из нее при торможении поршня. Обращенная к хольрауму часть поршня с выемкой подобна некоторым вариантам поддонов для инъекции мишеней прямого инициирования (см., напр., [9, 12, 14]). Выбор оптимальных параметров выемки, в частности решение вопроса о допустимости использования глубокой выемки с участком, эквивалентным короткому стволу [9, 12], требует специального исследования, проведение которого до выяснения вопроса о допустимости использования варианта, показанного на рис.2, представляется нецелесообразным. Отметим, что при использовании вращающихся поддонов или поршней с выемками протяженность траектории свободного полета капсулы с горючим в горизонтальном направлении будет превышать радиус хольраума.

Для координаты  $x$ , направленной вдоль оси ствола инжектора (см. рис.2), точность нахождения капсулы с горючим при облучении мишени будет определяться синхронизацией облучения с полетом капсулы. Далее параметр  $x$  описывает положение центра капсулы с горючим,  $x = 0$  соответствует точке его вхождения в полость, заполняемую впоследствии рентгеновским излучением. Изме-

нение  $x$  за время облучения мишени пренебрежимо мало (см., напр., [1–5]). Обозначим абсолютную величину отклонения  $x$  от  $d/2$  в момент начала облучения мишени через  $\Delta_{||}$ , временной интервал между моментом, когда  $x = 0$ , и началом облучения мишени – через  $t_i$ , запланированное значение  $t_i$  – через  $t_{ip}$ . Опишем рассинхронизацию начала облучения мишени с полетом капсулы с горючим параметрами  $\Delta v_0$  и  $\Delta t_i$  – абсолютной величиной отклонения  $v_0$  от запланированного значения и абсолютной величиной отклонения  $t_i$  от  $t_{ip}$  соответственно. Оценим требования к  $\Delta v_0$  и  $\Delta t_i$  из условия

$$\Delta v_0 t_{ip} + v_0 \Delta t_i \leq \Delta_{||} = 10 \text{ мкм}. \quad (2)$$

Это условие не учитывает возможность частичной взаимной компенсации погрешностей, связанных со скоростью и временем. Полагая, что каждое слагаемое в левой части (2) не должно превышать  $\Delta_{||}/2$  и учитывая, что  $t_{ip} \approx d/(2v_0)$ , мы получаем условия  $d\Delta v_0/v_0 \leq 10 \text{ мкм}$  и  $v_0 \Delta t_i \leq 5 \text{ мкм}$ . В частности, при  $d \approx 6 \text{ мм}$  и  $v_0 \approx 1 \text{ м/с}$  они приобретают следующий вид:  $\Delta v_0/v_0 \leq 1.7 \times 10^{-3}$  и  $\Delta t_i \leq 5 \times 10^{-6} \text{ с}$ .

По-видимому, наибольшие сложности с выполнением приведенных условий возникнут при попытках реализации сценариев инициирования микровзрывов с использованием сильных магнитных полей, создаваемых электрическими импульсами (см., напр., [4, 17]). Это предположение основано на том, что при таких попытках инжектор может подвергнуться воздействию импульсных магнитных полей, затрудняющих или даже предотвращающих достижение высокой точности его действия.

### 2.3. Точность доставки капсулы с горючим при ее падении в хольрауме

Обеспечение высокой точности доставки капсулы с горючим в центр хольраума при ее падении в хольрауме без придания ей начального импульса представляется наиболее простой задачей. Для примера предположим, что за время до начала облучения мишени падение приводит к перемещению капсулы с горючим на 1 мм. Такое перемещение совместимо с параметрами хольраумов нескольких типов, в частности сферических (см., напр., рис.3 и [21–23]). Легко показать, что скорость капсулы с горючим при облучении будет приблизительно равна 0.14 м/с. Таким образом, обсуждаемая 10-микронная точность положения капсулы с горючим по вертикальной координате будет обеспечена при синхронизации начала облучения мишени с началом падения капсулы с точностью  $7.1 \times 10^{-5} \text{ с}$ . Следует, однако, отметить, что проблема точности положения капсулы с горючим в горизонтальной плоскости, проходящей через центр хольраума, требует специального исследования. Эта проблема пересекается с проблемой точности инъекции капсулы с горючим в вертикальном направлении, в частности при свободном падении капсулы без придания ей начального импульса (см. также рис.10.14 в [13] и работу [15]).

В рассмотренной ситуации время падения капсулы с горючим составит приблизительно  $1.4 \times 10^{-2} \text{ с}$ . Таким образом, держатели и шторки, перемещающиеся на расстоянии от 1 мм до 3 см (выход характерных перемещений за границы этого диапазона представляется маловероятным) должны двигаться со средними скоростями 0.07–2.1 м/с.

### 3. Заключение

Реализация предложенного подхода приведет к значительному усложнению и, как следствие, удорожанию мишеней. Дополнительное усложнение и удорожание эксперимента в целом будет связано с необходимостью предотвращения повреждения оборудования высокоскоростными твердыми осколками и каплями, возникающими из инжекторов, держателей и других конструктивных элементов (см., напр., [24–26]). Тем не менее в современных условиях эта реализация представляется вполне оправданной. В частности она позволит, в сочетании с другими методами улучшения сжатия горючего, установить предельно достижимые параметры мишеней непрямого инициирования с пластиковыми абляторами и низкоэнтропийным сжатием горючего.

Автор благодарит рецензентов за полезные комментарии к исходному варианту статьи.

- Nagel S.R., Haan S.W., Rygg J.R., et al. *Phys. Plasmas*, **22**, 022704 (2015).
- Tommasini R., Field J.E., Hammel B.A., et al. *Phys. Plasmas*, **22**, 056315 (2015).
- Smalyuk V.A., Robey H.F., Alday C.L., et al. *Phys. Plasmas*, **25**, 072707 (2018).
- Laser Indirect Drive input to NNSA 2020 Report LLNL-TR-810573 (May 20, 2020).
- Ralph J.E., Döppner T., Hinkel D.E., et al. *Phys. Plasmas*, **27**, 102708 (2020).
- Letts S.A., Fearon E.M., Buckley S.R., Saculla M.D., Allison L.M., Cook R. *Fusion Technol.*, **28**, 1797 (1995).
- Petzoldt R.W., Goodin D.T., Nikroo A., et al. *Nucl. Fusion*, **42**, 1351 (2002).
- Александрова И.В., Белолипецкий А.А., Корешева Е.Р., Кошелев Е.Л., Осипов И.Е., Сафронов А.И., Тимашева Т.П., Щербаков В.И. *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, вып. 4, 22 (2011).
- Koresheva E.R., Aleksandrova I.V., Ivanenko O.M., et al. *J. Russ. Laser Res.*, **35** (2), 151 (2014).
- Александрова И.В., Корешева Е.Р., Крохин О.Н., Осипов И.Е. *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, **38** (1), 57 (2015).
- Александрова И.В., Корешева Е.Р., Кошелев И.Е., Крохин О.Н., Никитенко А.И., Осипов И.Е. *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, **39** (1), 30 (2016).
- Aleksandrova I., Koshelev E., Koresheva E. *Appl. Sci.*, **10**, 686 (2020).
- Дюдерштадт Дж., Мозес Г. *Инерциальный термоядерный синтез* (М.: Энергоатомиздат, 1984).
- Goodin D.T., Alexander N.B., Gibson C.R., Nobile A., Petzoldt R.W., Siegel N.P., Thompson L. *Nucl. Fusion*, **41**, 527 (2001).
- Mori Y., Nishimura Y., Ishii K., et al. *Fusion Sci. Technol.*, **75**, 36 (2019).
- Haan S.W., Callahan D.A., Edwards M.T., et al. *Fusion Sci. Technol.*, **55**, 227 (2009).
- Moody J.D., Johnson A., Javedani J., et al. *Phys. Plasmas*, **27**, 112711 (2020).
- Федоров В. *Эволюция стрелкового оружия. Ч. I* (М.: Воениздат, 1938).
- Трофимов В.Н. *Охотничьи боеприпасы. Справочник* (М.: Изд-во Рученькина; Минск: Современное слово, 1997).
- Kryukov P.V. *Intern. J. Impact. Eng.*, **23**, 501 (1999).
- Phillion D.W., Pollaine S.M. *Phys. Plasmas*, **1**, 2963 (1994).
- Farmer W.A., Tabak M., Hammer J.H., Amendt P.A., Hinkel D.E. *Phys. Plasmas*, **26**, 032701 (2019).
- Yan J., Chen Y., Jiang Sh., et al. *Phys. Plasmas*, **27**, 032702 (2020).
- Tobin M., Eder D., Braun D., MacGowan B. *Fusion Eng. Des.*, **60**, 85 (2002).
- Eder D., Koniges A.E., Landen O.L., Masters N.D., Fisher A.C., Jones O.S., Suratwala T.J., Suter L.J. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **112**, 032023 (2008).
- Martinkova M., Kalal M., Shmatov M.L. *EPJ Web Conf.*, **59**, 08011 (2013).