

04

К вопросу об ускорении термоядерных мишеней быстрого зажигания с двумя конусами

© М.Л. Шматов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: M.Shmatov@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 30 апреля 2021 г.
В окончательной редакции 31 декабря 2022 г.
Принято к публикации 30 января 2022 г.

Рассмотрены проблемы ускорения термоядерных мишеней быстрого зажигания с двумя конусами для их высокоточной инжекции в область вблизи центра реакторной камеры и показана возможность решения этих проблем. Представлен краткий обзор обсуждаемых вариантов таких мишеней и их основных достоинств, связанных с инициированием микровзрыва и простотой обеспечения сохранения работоспособности при полете в реакторной камере. Предложены быстрое зажигание микровзрывом двусторонней конической мишени и методика оценки допустимой скорости стабилизирующего вращения термоядерной мишени.

Ключевые слова: управляемый термоядерный синтез, инерциальное удержание, быстрое зажигание, двусторонние конические мишени, вращательная стабилизация полета.

DOI: 10.21883/JTF.2022.05.52372.137-21

Введение

В большинстве проектов использования термоядерного синтеза с инерциальным удержанием для производства электроэнергии рассматриваются электростанции с одной реакторной камерой, в которой с частотой $f_m \approx 0.1 - 30$ Hz инициируются микровзрывы с энерговыделением $Y_m \approx 40$ MJ-20 GJ (см., например, [1-9]). На электростанциях с f_m в несколько герц и выше термоядерные мишени будут доставляться в реакторную камеру и облучаться лазерным излучением или/и пучками ионов в состоянии свободного полета [1-3,9-21]. При этом потребуется ускорение мишеней до скорости $v_i \approx 50 - 1000$ m/s с обеспечением сохранения их работоспособности и попадания в область облучения вблизи центра реакторной камеры [1,2,9-21]. В настоящей работе рассмотрены проблемы, связанные с таким ускорением мишеней быстрого зажигания с двумя конусами, и возможные пути решения данных проблем.

1. Концепция быстрого зажигания и некоторые варианты мишеней быстрого зажигания с двумя конусами

В настоящее время термин „fast ignition“, переводимый как „быстрое зажигание“ или „быстрый поджиг“, обычно применяется для описания всех сценариев, включающих в себя две основные стадии: сжатие горючего до высокой плотности без сильного нагрева и нагрев достаточно большой области высокоплотного горючего до температуры зажигания T_{ig} при помощи любого дополнительного источника энергии, но без использо-

вания сфокусированной ударной волны (первоначально он был введен для описания одного из сценариев такого типа [22]). Сценарии с нагревом сфокусированной ударной волной [23-26] в настоящее время называются на русском языке „зажигание сходящейся ударной волной“ или „зажигание сфокусированной ударной волной“ [25,26]; в англоязычной литературе используется термин „shock ignition“ [24]. Рассматривалось быстрое зажигание с сильным дополнительным сжатием некоторых областей горючего вследствие нагрева других областей [27-31]. Такие сценарии с нагревом сжимаемых областей до T_{ig} [30] могут рассматриваться как комбинация быстрого зажигания с зажиганием сходящейся ударной волной. Быстрое зажигание интересно тем, что оно накладывает сравнительно низкие требования на энергию, доставляемую к мишени для инициирования микровзрыва, и симметрию сжатия горючего, необходимые для инициирования микровзрыва с фиксированным Y_m (см., например, [3,22,28,32-34]).

Нагрев сжатого горючего через конус был предложен в работе [32]. Некоторые ожидаемые преимущества мишеней с конусом над мишенями без конуса с точки зрения эффективности инициирования микровзрыва в ситуациях, когда приблизительно одинаковые сценарии могут быть реализованы и с конусом, и без него, рассмотрены в работах [28,29,34-37] и далее. Мишень с двумя конусами была предложена в работе [38]. Ранее в работе [33] была предложена мишень с двумя коническими отверстиями. Функции конусов одной мишени могут совпадать или различаться.

Возможен вариант, когда одинаковые конусы используются для нагрева разных областей одного сгустка сжатого горючего [31,38-40]. Зажигание в любой из них должно быть возможно вне зависимости от факта

его достижения в другой (иными словами, успешное формирование „горячего пятна“ в любой из нагреваемых областей должно быть возможно вне зависимости от успеха его формирования в другой). Этот вариант интересен как средство достижения высокой средней эффективности выгорания горючего и обеспечения надежности электростанции [31,39,40].

Обсуждалось создание двух „горячих пятен“ в одном сгустке сжатого горючего как с использованием одинаковых конусов [31,38–40], так и без их использования [41–44]. Одно из преимуществ мишеней с конусами связано с возможностью создания кольцеобразных „горячих пятен“ при нагреве горючего ионами, ускоренными лазерным излучением [37], что интересно, в первую очередь, как способ минимизации энергии, необходимой для формирования „горячего пятна“ [27]. Кроме того, создание двух кольцеобразных „горячих пятен“ может привести к генерации сходящейся ударной волны, создающей третье „горячее пятно“, что, в свою очередь, приведет к высокой эффективности выгорания горючего [31]. Подвод энергии к одному сгустку сжатого горючего с двух противоположных сторон без использования или с использованием конусов может служить и для создания одного „горячего пятна“ [34,43,44].

На рис. 1 показаны основные части мишени быстрого зажигания, прямого сжатия для сценария с формированием „горячего пятна“ в сгустке основного сжатого горючего микровзрывом двусторонней конической мишени. Этот сценарий является аналогом предложенного в работе [36] сценария с формированием „горячего пятна“ в сгустке основного сжатого горючего микровзрывом конической мишени (см. также [34,45–48]). Обжатие области вблизи вершины конической мишени [34,36] или середины двусторонней конической мишени основным сжатым горючим будет способствовать эффективному инициированию микровзрывов этих мишеней. Вероятно,

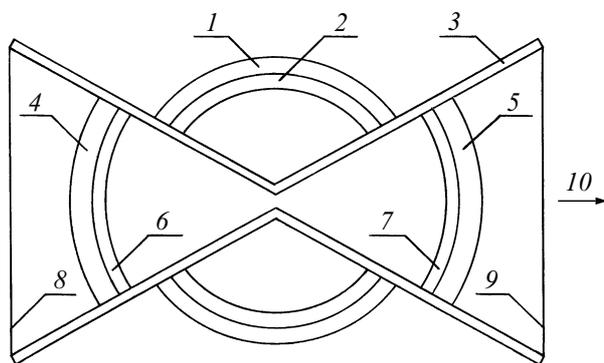


Рис. 1. Мишень быстрого зажигания, прямого сжатия для сценария с формированием „горячего пятна“ в сгустке основного сжатого горючего микровзрывом двусторонней конической мишени: 1 — аблятор основного горючего, 2 — основное горючее, 3 — стенка двусторонней конической мишени, 4, 5 — абляторы двусторонней конической мишени, 6, 7 — горючее двусторонней конической мишени, 8, 9 — защитные мембраны, 10 — направление полета мишени.

это позволит сформировать „горячие пятна“ лазерными импульсами с длительностью, близкой к длительности импульсов, сжимающих основное горючее [34,36].

Мишень с двумя конусами с принципиально различающимися функциями была предложена в работе [29]. Один из конусов служит непосредственно для формирования „горячего пятна“, а второй — для выхода газа и/или малоплотной плазмы из центральной области капсулы с горючим в процессе его сжатия и тем самым для улучшения сжатия [29]. Подобный процесс также может быть реализован при помощи „конуса с двойной стенкой“ („double-walled cone“), основная функция которого заключается в формировании „горячего пятна“ (газ и/или плазма будут выходить через зазор между стенками) [16], двух таких конусов и без использования специальных мер [28,32,41].

2. Линейное ускорение и вращательная стабилизация мишеней быстрого зажигания с двумя конусами

2.1. Мишени без оболочки

В большинстве работ по использованию термоядерных микровзрывов для производства электроэнергии рассматриваются мишени с горючим в виде дейтерий-тритиевого льда. Полет мишени в реакторной камере должен происходить без его перегрева [2,4,6,10,11,14–16,40,49–52]. Капсула с горючим мишени непрямого инициирования и быстрого зажигания, непрямого сжатия будет изолирована от внешних воздействий оболочкой, удерживающей рентгеновское излучение [10,11], и другими конструкционными элементами мишени; подобная изоляция также осуществится в мишенях типа „лазерный парник“ [3,34,53] и мишенях быстрого зажигания с таким сжатием горючего. Поэтому для таких мишеней вышеупомянутое требование будет выполнено либо автоматически, т.е. без использования каких-либо специальных мер, либо при помощи сравнительно простых мер, в частности, нанесения покрытия из замороженного ксенона на внешнюю поверхность мишени (см., например, [14]). Здесь рассматривается ситуация, когда защита внутренней поверхности реакторной камеры осуществляется при помощи ксенона [6,7,14–16].

Возможно, что обеспечение сохранности мишеней быстрого зажигания, прямого сжатия с одним или двумя конусами при их полете в реакторных камерах некоторых электростанций будет выполнено почти автоматически, при помощи внешнего покрытия аблятора, отражающего инфракрасное и видимое излучение [50,52], и при необходимости оптимизации геометрических параметров конусов [14]. При совпадении продольной оси такой мишени с направлением ее полета передний конус мишени с двумя конусами (рис. 1 и 2, *b*) или конус мишени с одним конусом, расположенным впереди

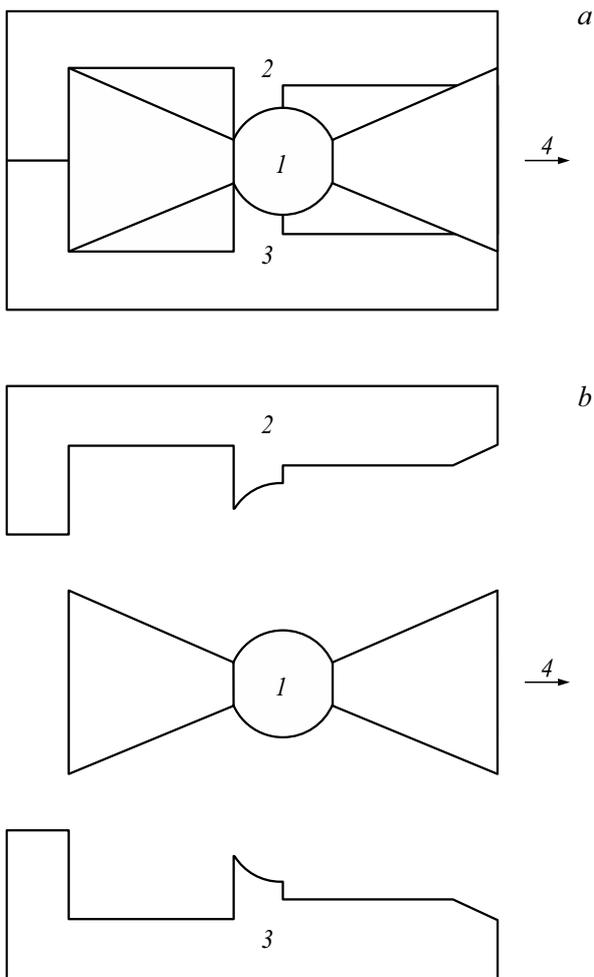


Рис. 2. Вариант поддона для ускорения мишени быстрого зажигания, прямого сжатия, состоящей только из капсулы с горючим и конусов. Поддон и мишень вращаются относительно продольной оси. Стадии до (a) и после (b) отделения частей поддона от мишени под действием центробежной силы: 1 — мишень, 2, 3 — части поддона, 4 — направление полета мишени.

капсулы с горючим, будет служить как „щит спутного следа“ („wake shield“), существенно уменьшающий нагрев капсулы с горючим атомами ксенона (основание этого конуса должно быть закрыто) [14]. Некоторый вклад в уменьшение нагрева капсулы с горючим мишени с двумя конусами будет внесен и задним конусом. При необходимости может использоваться покрытие из замороженного ксенона, наносимое на капсулу с горючим и/или конус(а) [14]. Здесь и далее для упрощения терминологии термин „капсула с горючим“ используется и для описания капсулы с основным горючим мишени, показанной на рис. 1, и ее аналогов с одной или двумя коническими мишенями.

Вариант поддона для ускорения мишени быстрого зажигания, прямого сжатия, состоящей только из капсулы с горючим и конусов, показан на рис. 2. Воздействие контактных поверхностей частей поддона на капсулу с

горючим и оба конуса при линейном ускорении такой мишени, т.е. при ее ускорении до скорости v_i , приведет к тому, что напряжения, возникающие в дейтерий-трибиевом льде при этом процессе, будут близки к напряжениям, возникающим при линейном ускорении мишени прямого инициирования, прямого сжатия без конуса и быстрого зажигания, прямого сжатия без конуса или с одним конусом, ускоряемым в соответствующих поддонах с такой же величиной a_l линейного ускорения (см., например, [10,11,14,16,20,21]). Обсуждалось отделение частей поддона от мишени под действием пружин или давления газа, используемого также для его линейного ускорения, или центробежной силы, связанной с его вращением относительно продольной оси [10]. Возможны и другие сценарии, например использование пружин и центробежной силы. На рис. 2 для простоты показан поддон из двух отделяющихся под действием центробежной силы частей. Возможно, что поддоны такого типа должны состоять из трех или более частей [10].

Обсуждаемая точность доставки мишеней в область облучения составляет величину от нескольких десятых долей миллиметра до 1 см [1,6,10–12]. Предполагается, что при доставке сравнительно тяжелых мишеней, имеющих в своем составе оболочку для удержания рентгеновского излучения, или/и конус(а), или/и некоторые другие конструкционные элементы, она может быть достигнута за счет придания мишени вращения [10,11,13,16,19]. Вращение также способно обеспечить необходимую ориентацию мишени с конусами (см., например, [10,11,13], где подобная проблема рассматривается применительно к мишеням непрямого инициирования).

Выбор варианта придания мишени стабилизирующего вращения будет определяться конструкцией мишени, в первую очередь материалом аблятора. В работах [10,13] говорится о линейном ускорении мишеней в нарезных стволах, что соответствует основной традиционной методике точной стрельбы [54,55]. Возможно, что для всех мишеней с пластиковыми и другими сравнительно прочными абляторами использование ствола с нарезами или витым каналом является оптимальным. Некоторые мишени непрямого инициирования и быстрого зажигания, непрямого инициирования могут ускоряться в нарезном стволе как без поддона [6], так и в поддоне, вращающемся вместе с мишенью. Варианты с поддоном представляются оптимальными, в частности, в связи с возможностью обеспечить малое загрязнение и износ ствола за счет выбора материала и конструкции поддона; из экономических соображений желательнее обеспечить многократное использование поддона.

Витой канал ствола представляет собой либо цилиндр с эллиптическим или овальным основанием, скрученный вокруг оси, либо призму, также скрученную вокруг оси [54,55]. Возможно, что использование таких стволов обеспечит малый износ каналов стволов и поддонов, а также очень высокую точность доставки мишеней [54], что упростит их облучение (см., например, [10,18]). Малый износ каналов стволов и поддонов будет достигнут

и при использовании более дешевых нарезных стволов и поддонов с выступами, входящими в нарезы. Такой поддон будет аналогом использовавшихся в XIX веке пуль с „ушками“ [55].

В работе [50] предложен аблятор для мишеней прямого инициирования, состоящий из пластиковой пены, заполненной дейтерий-тритиевым льдом, и покрытый тонкими слоями пластика и золота (в приведенном примере толщины этих слоев составляют $1\ \mu\text{m}$ и $300\ \text{\AA}$ соответственно). Такие абляторы могут использоваться и в мишенях быстрого зажигания, прямого сжатия с одним или двумя конусами. Целесообразность вращательной стабилизации таких мишеней при помощи ствола с нарезами или витым каналом пока неясна по причине неизвестности максимальной допустимой величины ε_{max} углового ускорения ε . Строго говоря, ε_{max} зависит от конструкции и температуры мишени (см. ниже) и пока неизвестна для любого аблятора в любых условиях, но можно ожидать, что аблятор, предложенный в работе [50], обладает наименьшей механической прочностью и, как следствие, ε_{max} .

При движении поддона с мишенью в стволе с нарезами или витым каналом ε однозначно определяется параметрами ствола и a_l . В принципе может возникнуть ситуация, когда ограничение на ε_{max} приведет к ограничению на a_l и тем самым на минимальную величину длины такого ствола L , необходимую для достижения выбранных v_t и скорости вращения поддона и мишени Ω . Большие значения L , например порядка 10 м, будут приемлемы [14,51], однако с экономической точки зрения желательна минимизация L . Поэтому может оказаться целесообразным использование поддона, состоящего из двух частей, одна из которых раскручивается вместе с мишенью при допустимом ε до линейного ускорения поддона и мишени, а вторая служит для обеспечения линейного ускорения. При выборе Ω , достигаемой при начальном раскручивании, может потребоваться учет уменьшения Ω по ходу линейного ускорения. Примеры высокоскоростного метания с предварительным раскручиванием ускоряемого объекта представлены в работе [56].

2.2. Мишени с защитной оболочкой

Высокоэффективная защита любой мишени будет обеспечена при ее доставке в область вблизи центра реакторной камеры в защитном контейнере [14,40] или поддоне, используемом и для ускорения мишени [2]. Рассматривались контейнеры двух типов. Облучение капсулы с горючим через стенки контейнера первого типа и поддона невозможно [2,14]. Непосредственно перед облучением мишени такой контейнер или поддон раскрывается [2,14] или удаляется (в последнем случае контейнер открыт со стороны, противоположной направлению полета) [14]. В состав контейнера второго типа входит тонкая защитная пластиковая оболочка, через которую производится облучение капсулы с горючим

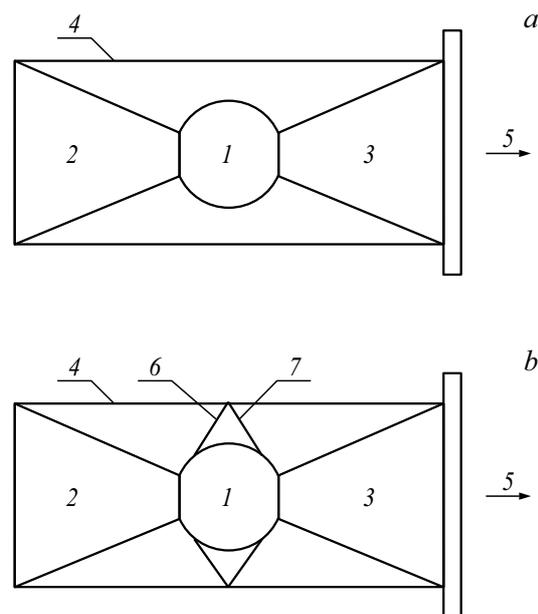


Рис. 3. Мишени быстрого зажигания, прямого сжатия с двумя конусами, защитной оболочкой и фиксации капсулы с горючим конусами (а) или конусами и мембранами (b): 1 — капсула с горючим, 2, 3 — конусы, 4 — защитная оболочка, 5 — направление полета мишени, 6, 7 — фиксирующие мембраны.

(при этом вся оболочка или ее облучаемые участки превращаются в плазму) [14,40]. При необходимости на оболочку может быть нанесено покрытие из замороженного газа, испаряющееся к моменту облучения капсулы с горючим [14]. Так как контейнер второго типа механически скреплен с капсулой с горючим или/и другими конструктивными элементами мишени, его конструктивные элементы, в частности оболочка, могут рассматриваться как конструктивные элементы мишени; этот вариант терминологии используется далее.

Конуса мишени быстрого зажигания прямого сжатия могут служить в качестве опорных конструктивных элементов для крепления оболочки (см. [40] и рис. 3). Выступающие ободки передних по отношению к направлению полета конусов (рис. 3) передают воздействие поддона на передний конус в процессе линейного и углового ускорения. Ранее подобный ободок был предложен для мишени с одним конусом [16].

Капсула с горючим мишени, показанной на рис. 3, а, находится в контакте только с конусами. Оценим среднее давление p_r , возникающее при линейном ускорении такой мишени на границе заднего конуса с твердым горючим в виде дейтерий-тритиевого льда и аблятора, предложенном в работе [50]. Полагаем, что сила, действующая на капсулу в продольном направлении со стороны переднего конуса, равна нулю; конуса, во всяком случае, в областях контакта с аблятором и горючим, внешне одинаковы и их образующие направлены к центру капсулы (рис. 4). Отметим, что обсуждалась и

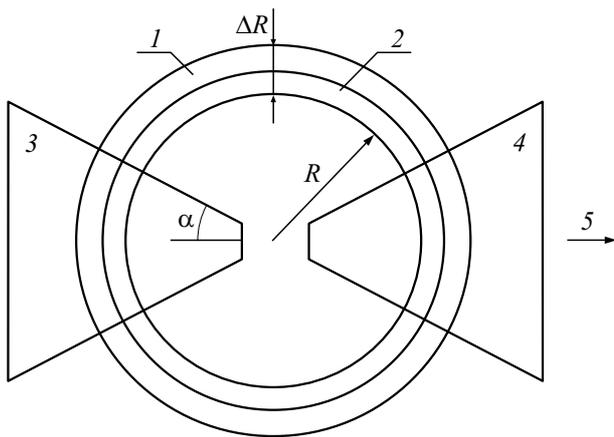


Рис. 4. Иллюстрация для расчета среднего давления на границе заднего конуса с горючим и аблятором: 1 — горючее, 2 — аблятор, 3 — часть заднего конуса, 4 — часть переднего конуса, 5 — направление полета мишени.

другая геометрия границ конуса с горючим и аблятором, см., например, [16].

Суммарная масса m_s твердого горючего и аблятора приблизительно равна

$$(4/3)\pi \cos \alpha \rho_a \Delta R (3R^2 + 3R\Delta R + \Delta R^2),$$

где α — угол между образующей конуса и его осью, $\rho_a \approx 0.25775 \text{ g/cm}^3$ — плотность аблятора [50], R — внутренний радиус твердого горючего (рис. 4). Здесь учтено, что плотность твердого горючего $\rho_f \approx 0.25 \text{ g/cm}^3$ [50] близка к ρ_a . Площадь S_c поверхности контакта заднего конуса с твердым горючим и аблятором равна $\pi \sin \alpha \Delta R (2R + \Delta R)$ (рис. 4). Проекция силы $p_r S_c$, действующей на этой поверхности по нормали к ней, на направление ускорения равна $p_r S_c \sin \alpha$ (рис. 4). Приравнявая ее к $m_s a_l$ и учитывая, что $a_l = v_l^2 / (2L)$ (здесь полагается, что a_l постоянно, см. также [11]) и $R \gg \Delta R$, мы получаем

$$p_r \approx \frac{\cos \alpha \rho_a R}{\sin^2 \alpha} \frac{v_l^2}{L}. \quad (1)$$

Диапазон p_r , соответствующий существующим предположениям о возможных значениях параметров, входящих в формулу (1), довольно широк. Например,

$$p_r(\alpha = 30^\circ, R = 2 \text{ mm}, v_l = 100 \text{ m/s}, L = 10 \text{ m})$$

$$\approx 1.8 \cdot 10^3 \text{ Pa},$$

$$p_r(\alpha = 30^\circ, R = 2 \text{ mm}, v_l = 400 \text{ m/s}, L = 30 \text{ m})$$

$$\approx 9.5 \cdot 10^3 \text{ Pa},$$

$$p_r(\alpha = 25^\circ, R = 2.5 \text{ mm}, v_l = 500 \text{ m/s}, L = 10 \text{ m})$$

$$\approx 8.2 \cdot 10^4 \text{ Pa},$$

$$p_r(\alpha = 15^\circ, R = 3 \text{ mm}, v_l = 700 \text{ m/s}, L = 7 \text{ m})$$

$$\approx 7.8 \cdot 10^5 \text{ Pa}.$$

Часть этого диапазона совместима с ожидаемыми механическими свойствами горючего мишеней быстрого зажигания даже при учете неоднородности распределения напряжений в дейтерий-тритиевом льде и абляторе. Например, предполагается, что предел текучести эквимолярного дейтерий-тритиевого льда приблизительно равен $5 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ при температуре 17.4 К, что приблизительно в 280 раз превышает первое приведенное значение p_r , и возрастает при уменьшении температуры [11]. Охлаждение горючего мишени быстрого зажигания, во всяком случае до некоторой температуры $0 < T_{\min}^f < 17.4 \text{ K}$, будет также способствовать улучшению его сжатия при инициировании микровзрыва [29] (см. также [10,11,49]). Факт существования ограничения на охлаждение обсуждаемого горючего пока не установлен. Если оно не существует или $T_{\min}^f < 4 \text{ K}$, горючее любых мишеней быстрого зажигания целесообразно охлаждать до температуры, близкой к 4 К [49].

Основные ожидаемые технические трудности использования показанных на рис. 3, а мишеней для производства электроэнергии связаны с передачей вращательного момента капсуле с горючим. По-видимому, для капсул с аблятором, предложенным в работе [50], это невозможно вследствие того, что практически при любом ϵ конуса будут прокручиваться в капсуле с горючим, что приведет к ее неприемлемому повреждению. Прокручивание конусов в капсуле с горючим представляется нежелательным и для мишеней с другими абляторами. Возможно, что абляторы из пластика и ряда других материалов могут быть приклеены к конусам, однако проблема допустимости влияния такого приклеивания на симметрию сжатия и загрязнение горючего пока не решена. Еще одно потенциально возможное решение для мишеней с любым аблятором заключается в замене конусов на пирамиды (усеченные или неусеченные) или „комбинированные“ конструкционные элементы. В одном варианте такой конструкционный элемент будет представлять собой усеченную пирамиду, переходящую по мере сужения в конус, в другом пирамидальная часть будет окружена двумя коническими. Область контакта с аблятором и твердым горючим должна соответствовать пирамидальной части.

Поддерживающие мембраны мишени, показанной на рис. 3, b, подобны мембранам, фиксирующим капсулы с горючим мишеней непрямого инициирования (см., например, [10,11,57–59]). Очевидно, что переход от фиксации капсулы с горючим одними конусами к ее фиксации конусами и мембранами при прочих равных условиях существенно уменьшит напряжения, возникающие в материалах капсулы в результате линейного и вращательного ускорения, вследствие увеличения суммарной площади контактных поверхностей. При этом конуса предотвратят рассмотренные в работе [10] колебания капсулы с горючим, возникающие в результате линейного ускорения мишени с фиксацией капсулы одними мембранами. Сильное отрицательное влияние

мембран на Y_f , наблюдавшееся в некоторых экспериментах на NIF [57–59], для мишеней быстрого зажигания представляется маловероятным в связи с отсутствием необходимости очень высокой симметрии сжатия, обеспечивающей формирование горячей, сравнительно малоплотной плазмы в центральной области сжатого горючего (см., например, [28,29]).

Технические проблемы, связанные с сохранностью капсулы с горючим при линейном ускорении и раскручивании мишени быстрого зажигания, непрямого сжатия с двумя конусами, близки к таковым для мишени, показанной на рис. 3, *b*. Основное отличие состоит в том, что сравнительно малопрочный аблятор, предложенный в работе [50], в мишенях непрямого сжатия применяться не будет.

3. Начальный выбор Ω

Ожидаемые массы, диаметры и скорости некоторых мишеней термоядерных электростанций близки с соответствующим характерным параметрам пуль нарезного оружия, в частности, пневматических или малокалиберных винтовок. С учетом того что точность стрельбы высокоточных винтовок послужила ориентиром для установления реалистичных требований к точности доставки термоядерных мишеней в область вблизи центра реакторной камеры [1,10,11], выберем в качестве первого варианта Ω величину

$$\Omega_1 = \min(\Omega_{b0}, 0.9\Omega_d, \Omega_n), \quad (2)$$

где Ω_{b0} — начальная скорость вращения пули с близкими массой и диаметром, Ω_d — скорость вращения мишени, приводящая к ее повреждению под действием центробежной силы, Ω_n — скорость вращения мишени, при которой начинается заметное негативное влияние ее вращения на сжатие горючего, компенсация которого невозможна или нецелесообразна.

Отметим, что в работах [10,11] высказано предположением о том, что точность инжекторов мишеней может совпасть с точностью винтовок или превзойти ее, так как инжекторы „стреляют в вакуум“ (см. также [6,7,14,15]), при этом в [10] упоминается, что инжекторы мишеней не требуют удержания стрелком. Высокой точности доставки мишеней будет способствовать высокая точность изготовления мишеней [6,60] и поддонов, а также постоянный контроль параметров инжектора и качества поддонов при их многократном использовании.

Приведем пример использования формулы (2).

В работе [16] рассмотрена мишень быстрого зажигания, прямого сжатия с конусом с максимальным внешним диаметром 5 mm, массой приблизительно 0.3 g и капсулой с горючим диаметром $d_c = 3.46$ mm и массой $m_c \approx 4$ mg (при этом капсула с горючим описывается термином „мишень“ („target“)). При добавлении к этой мишени второго такого же конуса с сохранением

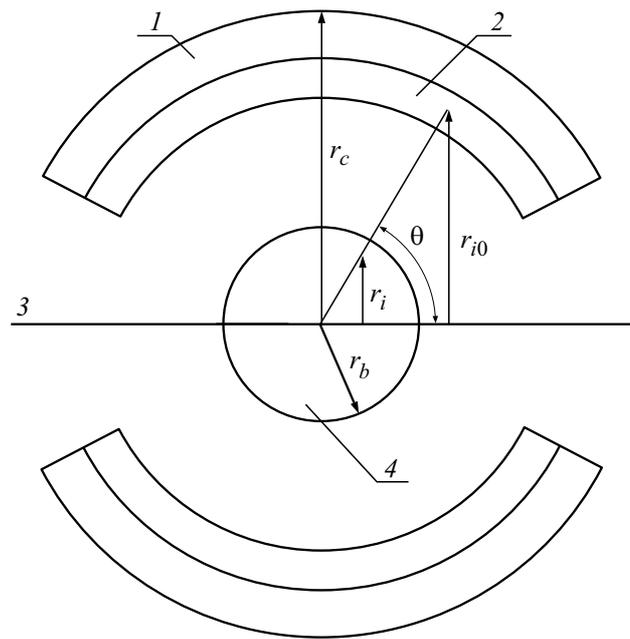


Рис. 5. Иллюстрация для расчета v_i : 1 — аблятор, 2 — несжатое твердое горючее, 3 — ось вращения (продольная ось мишени), 4 — сжатое горючее.

массы капсулы с горючим масса новой мишени будет приблизительно равна 0.6 g. Пневматическая винтовка ИЖ-22 калибром 4.5 mm с шагом нарезов $s = 0.35$ m стреляет пулями массой 0.45 или 0.56 g, начальные скорости этих пуль v_{b0} равны 130 и 125 m/s соответственно (шаг нарезов — расстояние, на котором нарезы делают полный оборот) [61]. Так как при постоянстве s $\Omega_{b0}[\text{rot/s}] = v_{b0}[\text{m/s}]/s[\text{m}]$ [61], в рассматриваемой ситуации $\Omega_{b0} \approx 360\text{--}370$ rot/s. При $\Omega = 370$ rot/s и радиусе капсулы с горючим $r_c = d_c/2 = 1.73$ mm центробежное ускорение на ее внешней поверхности будет приблизительно равно 9350 m/s². Согласно работе [11], при температуре менее 17 K дейтерий-тритиевый лед способен выдержать $a \geq 10^4$ m/s².

Оценим влияние обсуждаемого вращения на сжатие горючего. Предположим, что на стадии максимального сжатия горючее имеет вид приблизительно однородного шара с плотностью ρ_f^{max} в диапазоне $300\text{--}500$ g/cm³ [28,29], центр этого шара находится на оси вращения (рис. 5) и момент импульса i -й частицы горючего M_i определяется вращением мишени перед началом сжатия. Последнее означает, что $M_i = \omega m_i r_{i0}^2$, где $\omega[\text{s}^{-1}] = 2\pi\Omega[\text{rot/s}]$ — угловая скорость вращения мишени, m_i — масса i -й частицы, r_{i0} — начальное значение расстояния r_i между ней и осью вращения, т.е. продольной осью мишени, а влияние вращения на движение этой частицы в направлении, перпендикулярном оси вращения, определяется центробежной энергией $U_{ci} = M_i^2/(2m_i r_i^2)$ (см. [62] и рис. 5). Можно показать, что U_{ci} равна кинетической энергии i -й частицы при ее движении со скоростью $v_i = \omega r_{i0}^2/r_i$.

Обозначим через $v_i^{\max}(r_i)$ наибольшее значение v_i при фиксированном r_i . Оно соответствует углу $\theta = \pi/2$ (рис. 5). Вследствие того что толщины слоя твердого горючего и аблятора малы по сравнению с r_c (см., например, [16,20,21,34]), применимо приближение $r_{i0} \approx r_c \sin \theta$ (рис. 5).

Обозначим радиус горючего при его максимальном сжатии через r_b (рис. 5). Предположим, что масса горючего равна $0.345m_c \approx 1.38 \text{ mg}$ (коэффициент 0.345 выбран на основании примера из [50]), что соответствует

$$r_b(\rho_f^{\max} = 300 \text{ g/cm}^3) \approx 1.03 \cdot 10^{-2} \text{ cm},$$

$$r_b(\rho_f^{\max} = 500 \text{ g/cm}^3) \approx 8.70 \cdot 10^{-3} \text{ cm}.$$

Используя эти r_b , мы получаем, например, что

$$v_i^{\max}(\rho_f^{\max} = 300 \text{ g/cm}^3, r_i \geq 0.1r_b) \leq 680 \text{ m/s},$$

$$v_i^{\max}(\rho_f^{\max} = 500 \text{ g/cm}^3, r_i \geq 0.1r_b) \leq 800 \text{ m/s}.$$

Так как рассматриваемое возмущение однородности сжатия является крупномасштабным, а максимальная скорость сжатия горючего $v_{\text{implosion}}^{\max}$ будет порядка 100 km/s и допустимая относительная крупномасштабная неоднородность сжатия составит несколько процентов (см., например, [3,29,34]), представленные примеры v_i^{\max} позволяют сделать вывод, что это возмущение допустимо. Таким образом, если устойчивость дейтерий-тритиевого льда к центробежному и линейному ускорению близки и центр сжатого горючего попадает или почти попадает на ось вращения, Ω рассматриваемой мишени может быть близка к Ω_{b0} пуль пневматической винтовки ИЖ-22 при любом материале аблятора. При этом небольшое, например на несколько процентов, уменьшение Ω по сравнению с 370 rot/s может потребоваться только для выполнения требования обеспечения запаса прочности мишени, описываемого в формуле (2) множителем 0.9 перед Ω_d .

Для рассматриваемого варианта сжатия горючего воздействие центробежной силы на газ в центральной области капсулы с горючим несущественно (необходимость рассмотрения возможной роли этого воздействия была отмечена рецензентом). Для других вариантов сжатия, в том числе в конических и двусторонних конических мишенях, это воздействие может, вероятно, привести к заметной пространственной модуляции изотопного состава рассматриваемого газа, т.е. к зависимости концентраций D_2 , T_2 и DT от r_{i0} при малых r_{i0} , соответствующих газу. Для инициирования микровзрыва с формированием „горячего пятна“ в сравнительно малоплотном горючем, изначально полностью или частично находящемся в газовой фазе, такая модуляция представляется нежелательной и может оказаться эффектом, ограничивающим Ω . Обсуждаемая здесь мишень описывается параметром $\alpha = 24.5^\circ$ (см. рис. 4 и [16]). Подстановка этого параметра и $R \approx r_c = 1.73 \text{ mm}$ в формулу (1) дает, например, что $p_r(v_t = 400 \text{ m/s}, L = 7 \text{ m}) \approx 5.4 \cdot 10^4 \text{ Pa}$,

$p_r(v_t = 600 \text{ m/s}, L = 15 \text{ m}) \approx 5.7 \cdot 10^4 \text{ Pa}$. Оба результата приблизительно в девять раз меньше предела текучести рассматриваемого горючего при температуре 17.4 K [11].

Мишень быстрого зажигания, непрямого сжатия с двумя конусами можно изготовить и ускорить таким образом, что часть ее оболочки будет вращаться относительно конусов и капсулы с горючим, что позволит отделить, по крайней мере частично, проблемы вращательной стабилизации полета мишени от проблем устойчивости дейтерий-тритиевого льда к центробежному ускорению и влияния вращения на сжатие. Целесообразность данного усложнения мишеней для производства электроэнергии и сценария их ускорения в настоящее время не ясна. В любом случае, мишени такого типа могут использоваться в научных целях. Похожий подход используется для улучшения бронепробиваемости кумулятивных снарядов нарезных орудий [63].

Заключение

Проблемы ускорения мишеней с двумя конусами и обеспечения сохранения их работоспособности при полете в реакторной камере вполне разрешимы. В ряде случаев они проще аналогичных проблем для мишеней без конусов и с одним конусом.

Рассмотренные методы доставки мишеней быстрого зажигания с двумя конусами в область вблизи центра реакторной камеры являются, по мнению автора настоящей работы, наиболее эффективными. В принципе возможна коррекция полета мишени перед ее входом в реакторную камеру [10,11,17] и/или в самой реакторной камере (последнее может быть достигнуто при помощи абляционного давления, см. также [14]), однако подробное исследование проблем, связанных с коррекцией, будет целесообразно только в случае экспериментального подтверждения недостаточной точности доставки рассмотренными методами, что представляется маловероятным.

Благодарности

Автор благодарит А.Г. Забродского за полезное обсуждение статьи, д-ра Дж. Пэйсли (Dr. J. Pasley) за информацию о нескольких работах, использованных при ее написании, анонимных рецензентов за полезные комментарии на ее начальные версии и Международное Агентство по Атомной Энергии за частичное финансирование работ по тематике статьи в рамках Исследовательского Контракта МАГАТЭ № 24088 (IAEA Research Contract No. 24088).

Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Дж. Дюдерштадт, Г. Мозес. *Инерциальный термоядерный синтез* (Энергоатомиздат, М., 1984) [J.J. Duderstadt, G.A. Moses. *Inertial Confinement Fusion* (John Wiley and Sons, N Y, 1982)]
- [2] W.R. Meier. *Fusion Eng. Des.*, **25** (1–3), 145 (1994). DOI: 10.1016/0920-3796(94)90060-4
- [3] М.М. Баско, С.Ю. Гуськов, А.Н. Диденко, А.В. Забродин, В.С. Имшенник, Д.Г. Кошкарёв, М.В. Масленников, С.А. Медин, С.Л. Недосеев, Ю.Н. Орлов, В.П. Смирнов, В.И. Субботин, Л.П. Феоктистов, В.В. Харитонов, М.Д. Чуразов, Б.Ю. Шарков. *Ядерный синтез с инерционным удержанием. Современное состояние и перспективы для энергетики*, под ред. Б.Ю. Шаркова (Физмаглит, М., 2005)
- [4] W.R. Meier, W.J. Hogan. *Fusion Sci. Technol.*, **49** (3), 532 (2006). DOI: 10.13182/FST06-A1165
- [5] T. Goto, Y. Someya, Y. Ogawa, R. Hiwatari, Y. Asaoka, K. Okano, A. Sunahara, T. Johzaki. *Nucl. Fusion*, **49** (7), 075006 (2009). DOI: 10.1088/0029-5515/49/075006
- [6] National Research Council. *An Assessment of the Prospects for Inertial Fusion Energy* (The National Academies Press, Washington, D.C., 2013), DOI: 10.17226/18289
- [7] W.R. Meier, A.M. Dunne, K.J. Kramer, S. Reyes, T.M. Anklam, the LIFE Team. *Fusion Eng. Des.*, **89**, 2489 (2014). DOI: 10.1016/j.fusengdes.2013.12.021
- [8] A.R. Páramo, F. Sordo, D.G. Gomez, B.J. Le Garrec, J.M. Perlado, A. Rivera. *Nucl. Fusion*, **54** (12), 123019 (2014). DOI: 10.1088/0029-5515/54/12/123019
- [9] Y. Mori, Y. Nishimura, K. Ishii, R. Hanayama, Y. Kitagawa, T. Sekine, Y. Takeuchi, N. Satoh, T. Kurita, Y. Kato, N. Rurita, T. Kawashima, O. Komeda, T. Hioki, T. Motohiro, A. Sunahara, Y. Sentoku, E. Miura, A. Iwamoto, H. Sakagami. *Fusion Sci. Technol.*, **75** (1), 36 (2019). DOI: 10.1080/15361055.2018.1499393
- [10] R.W. Petzoldt. *Inertial Fusion Energy. Target Injection, Tracking, and Beam Pointing (Ph.D. Thesis)*. UCRL-LR-120192 (Livermore, 1995)
- [11] R.W. Petzoldt, R.W. Moir. *Fusion Eng. Des.*, **32–33**, 113 (1996). DOI: 10.1016/S0920-3796(96)00458-9
- [12] D.T. Goodin, N.B. Alexander, C.R. Gibson, A. Nobile, R.W. Petzoldt, N.S. Siegel, L. Thompson. *Nucl. Fusion*, **41** (5), 527 (2001). DOI: 10.1088/0029-5515/41/5/306
- [13] K.R. Schultz, D.T. Goodin, A. Nobile, Jr. *Nucl. Instrum. Meth. A*, **464**, 109 (2001). DOI: 10.1016/S0168-9002(01)00016-X
- [14] M.L. Shmatov, R.W. Petzoldt, E.I. Valmianski. *Fusion Sci. Technol.*, **43** (3), 312 (2003). DOI: 10.13182/FST03-A272
- [15] E.I. Valmianski, R.W. Petzoldt, N.B. Alexander. *Fusion Sci. Technol.*, **43** (3), 334 (2003). DOI: 10.13182/FST03-A275
- [16] T. Norimatsu, D. Harding, R. Stephens, A. Nikroo, R. Petzoldt, H. Yoshida, K. Nagai, Y. Izawa. *Fusion Sci. Technol.*, **49** (3), 483 (2006). DOI: 10.13182/FST06-A1162
- [17] T. Kassai, R. Tsui. *J. Phys. Conf. Ser.*, **112**, 032047 (2008). DOI: 10.1088/1742-6596/112/032047
- [18] L. Carlson, M. Tillack, J. Stromsoe, N. Alexander, D. Goodin, R. Petzoldt. *Fusion Sci. Technol.*, **56** (1), 409 (2009). DOI: 10.13182/FST09-A8936
- [19] National Research Council. *Assesment of Inertial Confinement Fusion Targets* (The National Academ. Press, Washington, D.C., 2013)
- [20] E.R. Koresheva, I.V. Aleksandrova, O.M. Ivanenko, V.A. Kalabukhov, E.L. Koshelev, A.I. Kupriashin, K.V. Mitsen, M. Klenov, I.E. Osipov, L.V. Panina. *J. Russ. Laser Res.*, **35** (2), 151 (2014). DOI: 10.007/s10946-018-9700-x
- [21] I. Aleksandrova, E. Koshelev, E. Koresheva. *Appl. Sci.*, **10**, 686 (2020). DOI: 10.3390/app10020686
- [22] M. Tabak, J. Hammer, M.E. Glinsky, W.L. Kruer, S.C. Wilks, J. Woodworth, E.M. Campbell, M.D. Perry, R.J. Mason. *Phys. Plasmas*, **1**, 1626 (1994). DOI: 10.1063/1.870664
- [23] В.А. Щербаков. *Физика плазмы*, **9**, 409 (1983). [V.A. Shcherbakov. *Sov. J. Plasma Phys.*, **9**, 240 (1983).]
- [24] L.J. Pekins, R. Betti, K.N. LaFortune, W.H. Williams. *Phys. Rev. Lett.*, **103**, 045004 (2009). DOI: 10.1103/PhysRevLett.103.045004
- [25] С.Ю. Гуськов, Н.Н. Демченко, Н.В. Змитренко, П.А. Кучугов, Р.А. Яхин. *ЖЭТФ*, **157** (5), 889 (2020). [S.Yu. Gus'kov, N.N. Demchenko, N.V. Zmitrenko, P.A. Kuchugov, R.A. Yakhin. *ЖЭТФ*, **130**, 748 (2020). DOI: 10.1134/S1063776120030140]
- [26] С.А. Бельков, С.В. Бондаренко, С.Г. Гаранин, С.Ю. Гуськов, Н.Н. Демченко, Н.В. Змитренко, П.А. Кучугов, Р.В. Степанов, В.А. Щербаков, Р.А. Яхин. *ЖЭТФ*, **158** (4(10)), 728 (2020). DOI: 10.31857/S0044451020100156 [S.A. Bel'kov, S.V. Bondarenko, S.G. Garanin, S.Yu. Gus'kov, N.N. Demchenko, N.V. Zmitrenko, P.A. Kuchugov, R.V. Stepanov, V.A. Shcherbakov, R.A. Yakhin. *ЖЭТФ*, **131**, 636 (2020). DOI: 10.1134/S1063776120090149]
- [27] S. Atzeni, M. Tabak. *Plasma Phys. Contr. Fusion*, **47**, B769 (2005). DOI: 10.1088/0741-3335/47/12B/S58
- [28] M. Tabak, D. Hinkel, S. Atzeni, E.M. Campbell, K. Tanaka. *Fusion Sci. Technol.*, **49** (3), 254 (2006). DOI: 10.13182/FST49-3-254
- [29] S.P. Hatchett, D. Clark, M. Tabak, R.E. Turner, C. Stoeckl, R.B. Stephens, H. Shiraga, K. Tanaka. *Fusion Sci. Technol.*, **49** (3), 327 (2006). DOI: 10.13182/FST06-A1152
- [30] M. Temporal, R. Ramis, J.J. Honrubia, S. Atzeni. *Plasma Phys. Contr. Fusion*, **51**, 035010 (2009). DOI: 10.1088/0741-3335/51/3/035010
- [31] M.L. Shmatov. *JBIS*, **62** (6), 219 (2009).
- [32] Л.П. Феоктистов. В сб.: *Будущее науки* (Знание, М., 1985), вып. 18, с. 168–198.
- [33] С.Ю. Гуськов. *Квант. электроника*, **31** (10), 885 (2001). [S.Yu. Gus'kov. *Quantum Electronics*, **31** (10), 885 (2001).]
- [34] С.Ю. Гуськов. *Физика плазмы*, **39** (1), 3 (2013). [S.Yu. Gus'kov. *Plasma Phys. Rep.*, **39**, 1 (2013). DOI: 10.1134/S1063780X13010017]
- [35] S. Atzeni, M. Temporal, J.J. Honrubia. *Nucl. Fusion*, **42** (3), L1 (2002). DOI: 10.1088/0029-5515/42/3/L01
- [36] M.L. Shmatov. *Fusion Sci. Technol.*, **43** (3), 456 (2003). DOI: 10.13182/FST03-A291
- [37] M.L. Shmatov. *Laser Part. Beams*, **29**, 339 (2011). DOI: 10.1017/S0263034611000425
- [38] G. Velarde, O. Cabellos, M.J. Caturla, R. Florido, J.M. Gil, P.T. Leon, R. Mancini, J. Marian, P. Martel, J.M. Martinez-Val, E. Minguez, F. Mota, F. Ogando, J.M. Perlado, M. Píera, S. Reyes, R. Rodriguez, J.G. Rubiano, M. Salvador, J. Sanz, P. Sauvan, M. Velarde, P. Velarde. Report UCRL-CONF-208155 (LLNL, Livermore, 2004)
- [39] M.L. Shmatov, M. Kalal. *Fusion Sci. Technol.*, **61** (3), 248 (2012). DOI: 10.13182/FST12-A13538

- [40] M.L. Shmatov. In: *Pathways to Energy from Inertial Fusion: An Integrated Approach*. IAEA-TECDOC-1704 (IAEA, Vienna, 2013), p. 127.
- [41] S. Hain, P. Mulser. *Phys. Rev. Lett.*, **86** (6), 1015 (2001). DOI: 10.1103/PhysRevLett.86.1015
- [42] J.M. Martinez-Val, S. Eliezer, M. Píera, P.M. Velarde. *AIP Conf. Proc.*, **406**, 208 (1997). DOI: 10.1063/1.53520
- [43] B.J. Albright, M.J. Schmitt, J.C. Fernández, G.E. Cragg, I. Tregillis, L. Yin, B.M. Hegelich. *J. Phys. Conf. Ser.*, **112**, 022029 (2008). DOI: 10.1088/1742-6596/112/2/022029
- [44] J.C. Fernández, B.A. Albright, K.A. Flippo, B.M. Hegelich, T.J. Kwan, M.J. Schmitt, L. Yin. *J. Phys. Conf. Ser.*, **112**, 022051 (2008). DOI: 10.1088/1742-6596/112/2/022051
- [45] Н.Г. Басов, И.Г. Лебо, В.Б. Розанов, В.Ф. Тишкин, Л.П. Феоктистов. *Квант. электроника*, **25** (4), 327 (1998). [N.G. Basov, I.G. Lebo, V.B. Rozanov, V.F. Tishkin, L.P. Feoktistov. *Quant. Electron.*, **28** (4), 316 (1998). DOI: 10.1070/QE1998v028n04ABEH001219]
- [46] И.Г. Лебо, Е.А. Исаев, А.И. Лебо. *Квант. электроника*, **47** (2), 106 (2017). [I.G. Lebo, E.A. Isaev, A.I. Lebo. *Quant. Electron.*, **47** (2), 106 (2017). DOI: 10.1070/QEL16277]
- [47] Г.В. Долголева, И.Г. Лебо. *Квант. электроника*, **49** (8), 796 (2019). [G.V. Dolgoleva, I.G. Lebo. *Quant. Electron.*, **49** (8), 796 (2019). DOI: 10.1070/QEL16953]
- [48] J. Zhang, W.M. Wang, X.H. Yang, D. Wu, Y.Y. Ma, J.L. Jiao, Z. Zhang, F.Y. Wu, X.H. Yuan, Y.T. Li, J.Q. Zhu. *Phil. Trans. R. Soc. A*, **378**, 20200015 (2020). DOI: 10.1098/rsta.2020.0015
- [49] R.B. Stephens, M. Key, W. Meier, R. Moir, M. Tabak. Report UCRL-JC-135800 (LLNL, Livermore, 1999)
- [50] S.E. Bodner, D.G. Colombant, A.J. Schmitt, M. Klapish. *Phys. Plasmas*, **7** (6), 2298 (2000). DOI: 10.1063/1.874063
- [51] T. Norimatsu, K. Nagai, T. Takeda, T. Yamanaka. *Proc. 2nd Inertial Fusion Sciences and Applications 2001* (Kyoto, Japan, 2001). Eds. K.A. Tanaka, D.D. Meyerhofer, J. Meyer-ter-Vehn (Elsevier, Paris, 2002), p. 752.
- [52] E.H. Stephens, A. Nikroo, D.T. Goodin, R.W. Petzoldt. *Fusion Sci. Technol.*, **43** (3), 346 (2003). DOI: 10.13182/FST43-346
- [53] И.Г. Лебо, И.В. Попов, В.Б. Розанов, В.Ф. Тишкин. *Квант. электроника*, **22** (12), 1220 (1995). [I.G. Lebo, I.V. Popov, V.B. Rozanov, V.F. Tishkin. *Quant. Electron.*, **25** (12), 1220 (1995). DOI: 10.1070/QE1995v025n12ABEH000570]
- [54] *Text Book on the Theory of the Motion of Projectiles; the History, Manufacture, and Explosive Force of Gunpowder; the History of Small Arms; the Method of Conducting Experiments; and on Ranges* (H.M. Stationery Office, London, 1863)
- [55] В. Федоров. *Эволюция стрелкового оружия* (Воениздат, М., 1938), ч. I.
- [56] P.V. Kryukov. *Int. J. Impact Eng.*, **23**, 501 (1999). DOI: 10.1016/S0734-743X(99)00099-8
- [57] S.R. Nagel, S.W. Haan, J.R. Rygg, M. Barrios, L.R. Benedetti, D.K. Bradley, J.E. Field, B.A. Hammel, N. Izumi, O.S. Jones, S.F. Khan, T. Ma, A.E. Pak, R. Tommasini, R.P. Town. *Phys. Plasmas*, **22** (2), 022704 (2015). DOI: 10.1063/1.4907179
- [58] D.S. Clark, C.R. Weber, D.C. Eder, S.W. Haan, B.A. Hammel, D.E. Hinkel, O.S. Jones, A.L. Kritcher, M.M. Marinak, J.L. Milovich, P.K. Patel, H.F. Robey, J.D. Salmonson, S.P. Sepke. *J. Phys. Conf. Ser.*, **717**, 012011 (2016). DOI: 10.1088/1742-6596/717/1/012011
- [59] J.E. Ralph, T. Döppner, D.E. Hinkel, O. Hurricane, O. Landen, V. Smalyuk, C.R. Weber, J. Bigelow, B. Bachmann, D.T. Casey, D. Clark, S. Diaz, S. Felker, B.A. Hammel, S.F. Khan, A. Nikroo, A. Pak, P.K. Patel, D.A. Callahan, J. Sater, P. Springer, M. Stadermann, C. Walters, M. Havre, P.L. Volegov. *Phys. Plasmas*, **27** (10), 102708 (2020). DOI: 10.1063/5.0017931
- [60] S.W. Haan, D.A. Callahan, M.J. Edwards, B.A. Hammel, D.D. Ho, O.S. Jones, J.D. Lindl, B.J. MacGowan, M.M. Marinak, D.H. Munro, S.M. Pollaine, J.D. Salmonson, B.K. Spears, L.J. Sutter. *Fusion Sci. Technol.*, **55** (3), 227 (2009). DOI: 10.13182/FST08-3501
- [61] П.А. Гусак, А.М. Рогачев. *Начальная военная подготовка (справочное пособие военрука)* (Народная Асвета, Минск, 1975), 2-е изд., доп. и перераб.
- [62] Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. *Механика (Теоретическая физика. Т. I)* (Наука, М., 1973), 3-е изд., перераб. и доп.
- [63] *Кумулятивный снаряд. Советская военная энциклопедия* (Воениздат, М., 1977), т. 4, с. 525.