

## Другой подход к решению термоядерной проблемы

Валерий М. Иоффе

Новогодняя 16-16, Новосибирск, Россия, site: www.v-ioffe.ru, E-mail: alkornsk@mail.ru

**Аннотация** – Идея инерционного термоядерного синтеза заключается в том, чтобы накопить энергию, а потом почти мгновенно преобразовать ее в тепло в небольшой миллиграммовой dt-капсуле (смеси дейтерия и трития в твердотельном (замороженном) состоянии). Можно поступить иначе, накапливая в виде кинетической энергии в самой dt капсуле, путем ее ускорения. Ускорять капсулу надо до скоростей порядка миллиона метров в секунду, что соответствует оптимальной температуре термоядерной реакции порядка 10-20 кэВ, если эту энергию преобразовать в тепло в результате удара о мишень, помещенную внутри реактора, или о другую ускоренную в dt капсулу, при встречном движении капсул. Изложенная идея ускорения твердотельных макрочастиц для решения термоядерной проблемы предложена почти пол века назад. Исследования различных способов ускорения макрочастиц показали, что для реализации идеи требуются ускорители макрочастиц огромных размеров, что делало проблематичной ее практическое использование. Однако уже сегодня технически возможно создание необходимых ускорителей макрочастиц длиной порядка 100 – 1000 м, если изготовить часть макрочастицы из очень тонких сверхпроводящих пленок или из ионного сверхпроводника.

**Ключевые слова** – термоядерный синтез, сверхпроводимость, тонкие пленки, ионный сверхпроводник.

### I. ВВЕДЕНИЕ

*Термоядерная крепость окружена со всех сторон одинаково высокой стеной. Если представителям нового направления кажется, что с их стороны стена пониже или же что в ней есть брешь, то это свидетельствует только о молодости данного направления.* И.Н. Головин (один из разработчиков токамака)

К настоящему времени проблема создания рентабельной термоядерной электростанции далека от своего решения. Более того, развиваемые сегодня пути решения этой задачи на основе инерционного термоядерного синтеза [1] выбраны не совсем удачно, причем не только с точки зрения сложности получения плазмы, отвечающей критерию Лоусона. Такие методы, как лазерный разогрев твердотельной dt мишени или разогрев ее пучком ионов или использование инерционного z-пинч эффекта, с планируемой заменой всей токопроводящей системы внутри реактора, после каждого микровзрыва, хотя и способны обеспечить одиночную термоядерную вспышку трудно использовать для создания промышленной электростанции. Очевидно, что частота повторения термоядерных микровзрывов в реакторе, пропорциональная выделяемой мощности, должна быть достаточно большой. К примеру для электростанции мощностью порядка одного ГВт частота повторения микровзрывов должна составлять десятки Герц. В таких условиях затруднительно обеспечить фокусировку лазерного или ионного излучения большого числа источников в заданную точку реактора и помещение в эту точку мишени с учетом того, что за сотые доли секунды до этого в реакторе произошел микровзрыв эквивалентный взрыву десятков кг тротила. В настоящее время нет ответа на вопрос за какое минимальное время технически можно обеспечить замену мишени в реакторе и совершенно не ясно часы это минуты или секунды. Например, в лазерном NIF проекте[2] сегодня замена мишени происходит за сутки. Ждет своего решения задача преодоления деградации оптических элементов под воздействием ионизирующего излучения. В свою очередь вызывает сомнение возможность обеспечения быстрой замены разрушенной микровзрывом токонесущей системы внутри реактора на новую при использовании инерционного z-пинч эффекта.

### II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Проблема инерционного термоядерного синтеза связана с необходимостью быстрого нагрева определенного объема плотного вещества за короткое время. Идея инерционного термоядерного синтеза заключается в том, чтобы накопить энергию, а потом почти мгновенно преобразовать ее в тепло в небольшой миллиграммовой dt-капсуле (смеси дейтерия и трития в твердотельном (замороженном) состоянии). Можно поступить иначе, накапливая в виде кинетической энергии в самой dt капсуле, путем ее ускорения. Ускорять капсулу надо до скоростей порядка  $10^6$  метров в секунду, что приблизительно соответствует оптимальной температуре термоядерной реакции порядка 10-20 кэВ, если эту энергию преобразовать в тепло в результате удара о мишень, помещенную внутри реактора, или о другую ускоренную в dt капсулу, при встречном движении капсул. При этом, что немаловажно, появляется возможность

доставки топлива в полностью не остывший от предыдущего микровзрыва реактор. Очевидно, что термоядерного поджига можно добиться также при бомбардировке  $dt$  мишени ускоренным твердым телом. Вопрос стоит только в том, каким образом осуществить необходимое ускорение макро частиц и выполнить необходимые для этого ускоряющие (относительно недорогие) устройства приемлемых для изготовления размеров?

Хотя идея ускорения твердотельных макрочастиц с целью решения термоядерной проблемы не нова и произведена оценка возможностей использования для этих целей различных механизмов ускорения [3], до сих пор не было найдено приемлемых с экономической точки зрения технических решений. Расчеты показывали, что необходимые размеры ускорителей макрочастиц огромны (как правило порядка  $10^5$  м и выше). Задачей данной работы является показать то, что технические решения термоядерной проблемы при относительно небольших размерах ускорителей в принципе существуют.

### III. ТЕОРИЯ

Для пояснения возможного механизма ускорения обратимся к рис. 1, на которой изображен источник тока величиной  $I$  замкнутый через полосу (скользящий контакт), расположенную на поверхности двух параллельных токонесущих шин, находящихся на расстоянии  $d$  друг от друга. Причем полоска выполнена перпендикулярно по отношению к шинам, а часть поверхности шин, контактирующая с полоской, лежит в одной для определенности горизонтальной плоскости. Магнитное поле  $\mathbf{B}$  направлено по вертикали нормально к плоскости поверхности полоски. На перемычку (полоску) действует сила  $F=IBd$ , которой если пренебречь силой трения и силой сопротивления воздуха, соответствует ускорение  $a=IBd/m$  и скорость  $V=(IBd/m)t$ , векторы которых направлены вдоль токонесущих шин, где  $t$  - время ускорения,  $m$  – масса полоски.

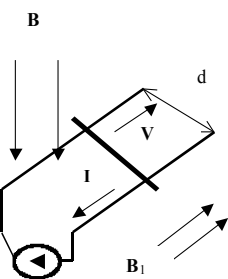


Рис. 1. Контактное ускорение

Длина токопроводящих полосок при этом равна

$$L=1/2 (mV^2)/\{IBd\} \quad (1)$$

Например, при  $B= 10$  Тл,  $V=10^6$  м/с,  $I=10^5$  А,  $m=10^{-6}$  кг,  $d=2.5 \cdot 10^{-3}$  м, получим  $L=200$  м,  $t=4 \cdot 10^{-4}$  с.

Как видно размеры ускорительной системы вполне приемлемы для практической реализации.

Создание импульсного источника тока в  $10^5$  А не относится к неразрешимым техническим проблемам. В различных физических экспериментах применяются импульсные источники токов, величина тока в которых на порядки больше. Создание магнитного поля 10 Тл также вполне реализуемо. Исключить трение скользящего контакта о воздух можно, поместив всю систему в вакуум, Исключить или уменьшить до необходимой величины трение скользящего контакта о рельсы можно путем введения дополнительного магнитного  $\mathbf{B}_1$  поля, направленного по направлению движения скользящего контакта (см фиг.1). В этом случае появляется сила действующая на полоску, направленная вертикально вверх, что позволяет компенсировать вес полоски и тем самым уменьшать силу трения, которая пропорциональна весу полоски.

Исключить трение скользящего контакта о рельсы можно также путем вертикального расположения шин - рельс, в этом случае для легкого прижима скользящего контакта к рельсам можно использовать дополнительное магнитное поле. Поскольку ток большой величины может сжечь крошечную перемычку, имеет смысл токоведущие шины-рельсы и перемычку изготавливать из сверхпроводящего материала. очевидно, что скользящий контакт-перемычку можно использовать, как контейнер для доставки термоядерного топлива в реактор.

Пологая, что  $I_s$  - критическая плотность тока материала сверхпроводниковой переемычки,  $\rho$  - плотность,  $S$ - площадь сечения,  $m=\rho Sd$ , а через шины и переемычку течет ток  $I=I_s S$  из (1), получим минимальные размеры ускоряющей системы:

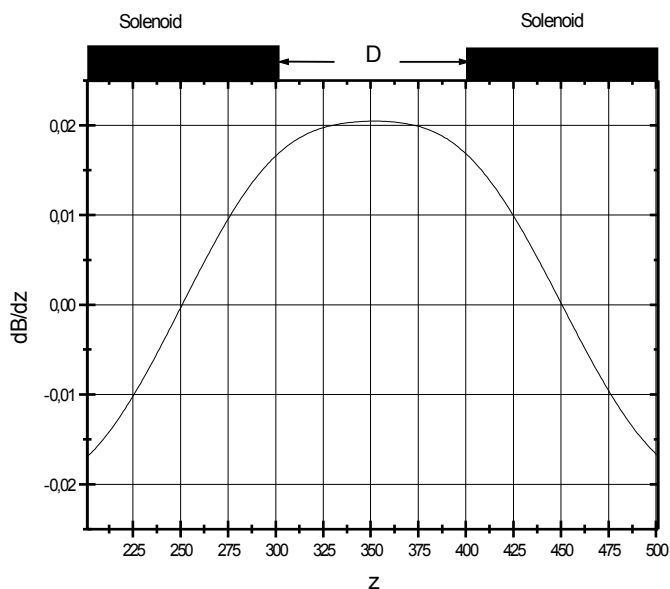
$$L=L_{\min} = \frac{1}{2} (\rho V^2)/(I_s B) \quad (2)$$

При температурах жидкого гелия ( $T=4.2$  К) для сплава Nb-Ti при  $\rho=6.5 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $V=10^6$  м/с,  $I_s=5 \cdot 10^5$  А/см<sup>2</sup>, при внешних полях 5Тл ( $B=5$ Тл) получим для  $L_{\min}=1.3 \cdot 10^5$ м. Примерно такой же минимальный размер ускорительной системы получается при  $B=6$ Тл для Nb<sub>3</sub>Sn. Данные о критических плотностях токов этих материалов в магнитных полях взяты из [4]. При размерах минимальных размерах ускоряющей системы ( $L \approx L_{\min}$ ) речь может идти только об использовании переемычки, в качестве бомбардирующего снаряда  $dt$  мишени, помещенной в реактор.

Поскольку скользящий контакт-переемычку можно использовать, как контейнер для доставки термоядерного топлива в реактор при  $L > L_{\min}$ , если не заботится о высоком КПД преобразования энергии источника тока в энергию движения  $dt$  мишени, нет нужды значительно увеличивать  $L$  по отношению к  $L_{\min}$ . С практической точки зрения, поскольку средства необходимые для постройки ускорителя пропорциональны его длине, вполне достаточно увеличение в 1,5 – 2 раза.

Поскольку контактный метод ускорения макрочастиц имеет очевидные недостатки, имеет смысл использовать другой простой способ ускорения макрочастиц, построив аналог линейного резонансного ускорителя заряженных частиц. Ускоряющая система такого ускорителя выполнена из множества соленоидов - аналогов пролетных или дрейфовых трубок, имеющих общую ось  $Z$ . Причем четные соленоиды запитываются переменным током в противоположной фазе с нечетными. Сверхпроводник, предварительно заряженный магнитным моментом, поступает в ускоряющую систему. Заметим, такую зарядку в частности можно обеспечить путем механического вращения сверхпроводника или его вращения с последующим охлаждением ниже критической температуры и остановкой или трансформаторным способом [5]. Сверхпроводник ускоряется между соленоидами, а внутри соленоидов движется по инерции. Представим сверхпроводник, с циркулирующим в нем током, расположенный между двумя ускоряющими соленоидами. Причем в заднем соленоиде ток течет в противоположном направлении по отношению к сверхпроводнику, а в переднем соленоиде циркулирует в одном с ним направлении. Сверхпроводник отталкивается от заднего соленоида и притягивается к переднему. Сверхпроводник ориентирует свой магнитный момент вдоль поля и стремится втянуться туда, где силовые линии гуще, то есть к оси соленоидов. Как только сверхпроводник проскакивает по инерции передний соленоид, направление поля в соленоиде меняется на противоположное. И процесс ускорения повторяется. Может показаться, что для перемещения сверхпроводника по инерции внутри соленоида без заметного замедления требуется обеспечить существенное превышение длины соленоида над его диаметром. Но это не верно, поскольку из расчетов следует, что значение производной магнитного поля вдоль оси внутри соленоидов меняет знак при незначительном среднем значении по сравнению с средним значением этой величины между соленоидами при соизмеримых размерах диаметра и длины соленоидов. На фиг. 2 представлена такая зависимость производной магнитного поля вдоль оси для двух одинаковых соленоидов имеющих общую ось размещенных друг от друга на расстоянии равном длине соленоида, при встречном направлении магнитного поля одного соленоида относительно другого при двойном превышении диаметра каждого из соленоидов над его длиной.

Фиг. 2 Зависимость в относительных единицах производной магнитного поля вдоль оси для двух одинаковых соленоидов, имеющих общую ось размещенных друг от друга на расстоянии равном длине соленоида, при встречном направлении магнитного поля одного соленоида относительно другого при двойном превышении диаметра каждого из соленоидов над его длиной.



Ускоряющая система может быть реализована иначе. То есть таким образом, когда во всех соленоидах, находящихся сзади от ускоряемого тела ток течет в противоположном направлении по сравнению с соленоидами, размещенными впереди ускоряемого тела, или когда ток подается только на соседние соленоиды, между которыми находится ускоряемое тело.

Пусть ускоряемое тело выбрано в виде цилиндра. Для цилиндра диаметром  $d$  и высотой  $h$  и плотностью  $\rho$  при расстоянии между ускоряющими цилиндрами  $D$  и плотности тока  $I_s$ , магнитный момент равен  $M = 1/3 \pi I_s h (d/2)^3$ , при  $m = \pi \rho h d^2/4$  сила  $F = M dB/dZ \approx 2B M/D$ , которой соответствует ускорение  $a \approx 2B M/Dm = 1/3 B I_s d / (D \rho)$ , где  $B$ - средняя за время ускорения величина магнитного поля ускоряющих соленоидов. Для кольца диаметром  $d$  получим  $a \approx 1/2 B I_s d / (D \rho)$ .

Для полосы ускоряющейся по рельсам величина ускорения в свою очередь равна  $a = B I d / m = B I_s \rho$ . Поскольку приблизительно половину времени макрочастица при рассматриваемом способе ускорения не ускоряется, при одинаковой величине ускорения макрочастиц размеры бесконтактного ускорителя будут больше, чем при контактном ускорении. Для уменьшения размеров ускорителя имеет смысл увеличивать частоту переменного тока по мере ускорения частицы или использовать большое число источников тока, работающих на разных частотах.

Для приблизительного равенства размеров контактного и бесконтактного ускорителей необходимо чтобы,  $d/4D \approx 1$  ( $D$ -среднее расстояние между соленоидами) при равенствах величин плотностей токов и средних значений величин магнитных полей.

#### IV. ОБСУЖДЕНИЕ ПУТЕЙ УМЕНЬШЕНИЯ РАЗМЕРОВ УСКОРИТЕЛЕЙ НА ПОРЯДКИ.

Для полосы ускоряющейся по рельсам величина ускорения в свою очередь равна  $a = B I d / m = B I_s \rho$ . Заметим, что размеры ускорителей пропорциональны  $\rho B I_s$ . Из чего следует, что для практического решения термоядерной проблемы необходимы сверхпроводящие материалы, способные пропускать большие сверхпроводящие плотности тока при больших магнитных полях, причем величины плотностей токов или/и магнитных полей должны многократно превосходить соответствующие величины сегодня существующих сверхпроводников. Вопрос стоит только в том, как изготовить такие материалы. Ответ на этот вопрос эквивалентен ответу на вопрос “Как уменьшить размер ускорителей?”. Возможные варианты решения этого вопроса приведены ниже.

1. Как известно, магнитное поле может уничтожить сверхпроводимость или другими словами разрушать куперовские пары электронов в сверхпроводниках, что является ограничением по созданию источников сильных магнитных полей. У ионных сверхпроводников нет куперовских пар и их аналогов - объектов для разрушения при всевозможных механизмах взаимодействия этих носителей заряда с другими частицами или квазичастицами в твердом теле. В качестве носителей заряда используются однозарядные ионы изотопа лития, являющиеся бозонами. Расчетная величина температуры Бозе-конденсации ионов изотопа лития из за малости величины их эффективной массы может превышать величину порядка  $10^4$  К [5]. Если, к примеру, у реально созданных ионных сверхпроводников величина температуры Бозе-конденсации ионов изотопа лития окажется всего лишь выше 10 градусов Кельвина, то концентрация сверхпроводящих ионов изотопа лития при температурах жидкого гелия будет на порядки превышать плотность куперовских пар в традиционных сверхпроводниках в тех же условиях, поскольку куперовские пары образуются лишь небольшой частью электронов, которые имеют энергию вблизи энергии Ферми, тогда как в ионных сверхпроводниках при сравнительно небольшом превышении температуры Бозе конденсации над температурой среды в основном состоянии оказывается число бозонов, сопоставимое по порядку величины с их общим числом. Поэтому есть надежда, что проблему может решить создание ионных сверхпроводников, которые могут быть использованы в качестве части макрочастицы для ее бесконтактного ускорения, поскольку макрочастице в этом случае можно придать чрезвычайно большой магнитный момент. Ионные сверхпроводники можно применить также при изготовлении источников больших переменных магнитных полей, необходимых для бесконтактного ускорения макрочастиц. В [5] предложено использовать МВЕ технологию для создания ионных сверхпроводников.

2. Известно, что в пленках устойчивая сверхпроводимость наблюдается в полях параллельных поверхности пленки по величине в сотни раз превышающих критическое поле для массивного сверхпроводника того же материала. Например, у свинцовой пленки толщиной 20Å сверхпроводимость сохраняется при полях в 40 Тл. Критический ток при этом по прежнему определяется величиной критического поля в массивном сверхпроводнике. Пусть толщина

пленки равна  $2a \ll \lambda$  и пленка помещена в поле величиной  $B_c$ , параллельное ее поверхности. Для поля в пленке имеем  $B = B_c \frac{\text{ch}(x/\lambda)}{\text{ch}(a/\lambda)}$  ( $x=0$  соответствует координате середины пленки). Точнее  $B$  есть индукция магнитного поля. Максимальное (критическое) поле пленки при этом дается соотношением  $B_c \approx 6^{1/2} \lambda/a V_c$ , где  $V_c$  критическое поле для массивного сверхпроводника. Смотри, например [7]. Поскольку при максимальном поле  $B(a) = B(0) \approx (6^{1/2}/2) V_c a/\lambda \approx V_c a/\lambda$ , плотность тока, наведенного внешним магнитным полем равна  $I_s \approx V_c / (\mu_0 \lambda)$ . Из уравнений Гинзбурга-Ландау следует подобный результат ( $I_s \approx V_c / (1.84 \mu_0 \lambda)$ ). Очевидно, что при  $x > 0$  направление тока в пленке противоположно случаю когда  $x < 0$ . То есть при помещении сверхпроводниковой пленки в магнитное поле в ней начинает циркулировать ток, плотность которого получена из теоремы о циркуляции магнитного поля. Для  $\lambda = 5 \cdot 10^{-8} \text{ м}$ ,  $a = 5 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ ,  $V_c = 0.1 \text{ Тл}$  получим  $I_s \approx 2 \cdot 10^{12} \text{ А/м}^2$ ,  $B_c = 24 \text{ Тл}$ . Используемые при расчете параметры приблизительно соответствуют таким материалам, как Nb или Pb и величина произведения  $I_s B$  для пленок Nb или Pb толщиной порядка 10 ангстрем приблизительно в  $10^3$  раз превосходит соответствующую величину для сплава Nb-Ti. Если бы пленки обладали достаточной механической прочностью мы имели бы уменьшение размеров ускорителей по крайней мере в  $10^3$  раз. И речь шла об ускорителях метровых размеров для решения термоядерной проблемы. Из пленок необходимо сделать механически прочное сооружение. То есть можно представить структуру, содержащую множество сверхпроводящих пленок из ниобия или свинца, между которыми выполнены слои не сверхпроводящего материала. Если масса структуры превосходит суммарную массу сверхпроводящих пленок в  $N$  раз ( $N < 10^3$ ), то размеры ускорителей можно уменьшить приблизительно в  $10^3/N$  раз по сравнению с ускорителями при ускорении частиц той же массы из Nb-Ti. При бесконтактном ускорении слои и пленки формируются на боковой поверхности цилиндра. Например, цилиндр может быть выполнен из легкоплавкого материала, который заменяется после удаления частично или полностью смесью дейтерия и трития. Минимальный линейный размер dt-капсулы без учета сжатия составляет порядка 1-2 мм. Например, для цилиндра с размерами диаметра и высоты равными 2 мм при суммарной толщине сверхпроводящих пленок равной 10 мкм величина массы сверхпроводящих пленок будет весить немного больше одного миллиграмма. Масса такого цилиндра из твердотельной смеси дейтерия и трития весит приблизительно столько же. Следует учитывать, что суммарная толщина сверхпроводящих пленок не должна превышать величину порядка  $10\lambda^2/a$ , поскольку величина критической плотности тока в противном случае уменьшается. В самом деле, пусть протекание тока в пленке приводит к возникновению поля на ее поверхности по величине порядка  $a/2\lambda V_c$ , что как было показано, возможно. Если имеются  $n$  одинаковых параллельных пленок, по каждой из которых течет такой ток, то магнитное поле возрастает в  $n$  раз. Из условия равенства величины магнитного поля его критической величине  $B_c = 0.5 n a/\lambda V_c = 6^{1/2} \lambda/a V_c$  получим максимальную суммарную толщину пленок  $S = 2na = 96^{1/2} \lambda^2/a \approx 10\lambda^2/a$ , при числе пленок  $n = 24^{1/2} (\lambda/a)^2$ . Минимальные размеры ускорителя при контактном ускорении получим из (1)

$$L_{\min} = \frac{1}{2} (\rho V^2) / (I_s B) = \frac{1}{2} (\rho V^2) / (6^{1/2} V_c^2 / a \mu_0)$$

Если  $V_c = 0.1 \text{ Тл}$ ,  $V = 10^6 \text{ м/с}$ ,  $\rho = 10^4 \text{ кг/м}^3$ ,  $a = 5 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ , то  $L_{\min} \approx 100 \text{ м}$ .

При этом минимальные размеры ускорителя без контактов в разы больше.

Минимальная толщина пленок, по видимому, не может превышать постоянную кристаллической решетки материала из которого она выполнена.

Величины плотности ( $\rho$ ) и постоянные кристаллической решетки материалов ( $a$ ), пригодных для формирования макрочастиц смотри ниже.

$$\rho_{\text{DT}} = 0.22 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3, \rho_{\text{Pb}} = 11.34 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3, \rho_{\text{Nb}} = 8.58 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3, a_{\text{Pb}} = 4.95 \cdot 10^{-10} \text{ м}, a_{\text{Nb}} = 3.3 \cdot 10^{-10} \text{ м}.$$

Поскольку для сверхпроводящих рельс критическая плотность тока много меньше, чем в сверхпроводящей пленке, контакт между рельсами и макрочастицей следует выполнить на достаточно большой площади. Это обстоятельство в основном определяет геометрическую форму ускоряемой макрочастицы (точнее скользящего контакта, оптимальная форма сечения которого равнобедренная трапеция). Смотри фиг.3. Причем длина меньшей из сторон трапеции ( $y$ ) равна расстоянию между рельсами. Расстояние между параллельными сторонами трапеции равно  $h$ . Кроме того  $x \gg y$ ,  $x \gg h$ , где  $x$  - длина основания трапеции. Плотность тока в скользящем контакте - больше чем плотность тока в шинах приблизительно в  $1/2 x/h$  раз. Плотность тока приблизительно одинакова в любом вертикальном сечении подвижного контакта. Конструкция позволяет при минимальном весе подвижного контакта относительно контактов с другими геометрическими формами обеспечить сохранение сверхпроводимости в ускоряющей системе.

Кроме того, необходимо при движении макрочастицы обеспечить сохранение площади контакта макрочастицы с рельсами. По этой причине контактный метод ускорения макрочастиц на практике будет очень трудно осуществить.

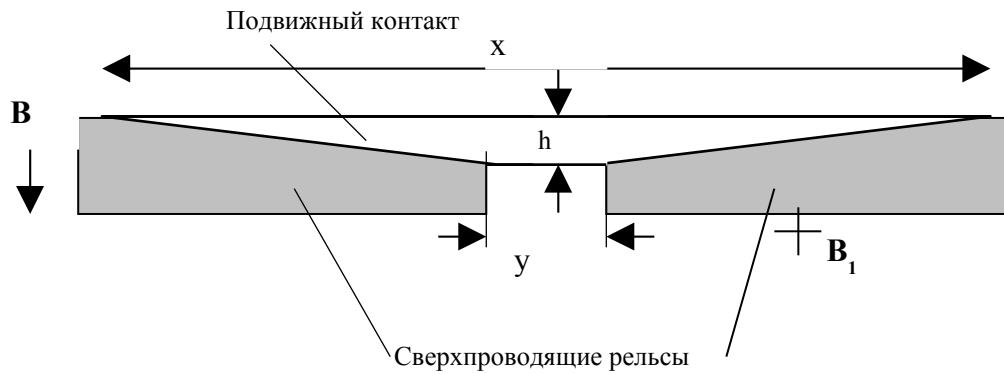


Fig.3. Пример ускорителя, когда критическая плотность тока в подвижном контакте много больше критической плотности тока в рельсах.

Чтобы избежать разрушения *dt* капсулы при ускорении, нужно сформировать ее внутри подложки [3]. Предел прочности *dt* капсулы определен величиной давления в 5 атмосфер. Предел прочности подавляющего числа твердотельных материалов на порядки больше. При контактном ускорении макрочастица очевидно содержит один или два подвижных контакта, на поверхности которых закреплена подложка, причем внутри подложки размещена смесь дейтерия и трития. При бомбардировке *dt* капсулы ускоренным твердым телом вместо подложки и *dt*-смеси можно использовать твердое тело с массой превосходящей массу *dt* мишени в несколько раз (порядка 5-10 миллиграмм). При изготовлении макрочастиц для контактного ускорения для создания слоев и пленок применимы планарные технологии. Хотя нет ясности о возможности применения стандартных технологий к созданию необходимых структур включающих в себя пленки из свинца или ниобия. Для создания бесконтактных макрочастиц см. fig.4.1- 4.4, пригодных для ускорения в ускорителях, имеющих небольшие размеры необходимо создать технологии формирования тонких пленок на цилиндрической поверхности. Скорее всего, речь идет о модернизации MBE и CVD или ALD технологий. Например, технология атомно слоевого осаждения (Atomic Layer Deposition (ALD)) позволяет уже сегодня формировать монослойные слои на площадях в десятки квадратных метров на поверхностях любой геометрической формы. Кроме того, необходимо автоматическим способом сформировать макрочастицу из составляющих, например, из легкой и прочной подложки, *dt*-капсулы, и пленок. Желательно, чтобы масса подложки была как можно меньше и существенно не превышала массу *dt*-капсулы.

Заметим, что для создания ионных сверхпроводников требуются гетероструктуры, также содержащие тонкие пленки специально подобранных составов. Технологически непросто изготовить ускоряемую макрочастицу в особенности для бесконтактного ускорения. Лимитирующий фактор – разрушающее давление, оказываемое на подложку при ускорении макрочастицы. Если ускоряется макрочастица в километровом ускорителе, величина давления *dt* капсулы на подложку приблизительно равна 0.5 GPa. Рассмотрим кубическую *dt* капсулу, контактирующую с подложкой в 5 из 6 плоскостей, имеющую массу  $m=2 \cdot 10^{-6}$  kg и линейный размер стороны  $l=2$  mm. Действительно когда  $L=10^3$ m,  $V=10^6$ m/s,  $t=L/V=10^{-3}$ s,  $a=V/t$ ,  $P=ma/S$ ,  $m=2 \cdot 10^{-6}$  kg,  $S=l^2=4$  mm<sup>2</sup>,  $P=0.5 \cdot 10^9$ Pa. Это давление больше предела прочности многих твердотельных материалов. Поскольку давление, оказываемое на капсулу много больше ее предела прочности ( $P=mV^2/(L^2)$ ), на противоположные грани подложки действует сила величиной  $\sim mV^2/L$ , растягивая подложку. Пусть  $l_s$  есть толщина подложки,  $l=2$ mm есть характерный линейный размер *dt*-капсулы,  $m=2$  миллиграмма. Следовательно минимальная толщина подложки ( $l_s$ ) определена приблизительно равенством  $mV^2/L = P_s \cdot l_s$ . Здесь  $P_s$  есть предел прочности материала, из которого выполнена подложка. Минимальная масса подложки ( $m_s$ ) определятся приближенным равенством  $m_s = 5 \rho \cdot l^2 \cdot l_s$ . Здесь  $\rho$  есть плотность подложки. Нетрудно посчитать, что для самых прочных материалов ( $P_s \sim 25 \cdot 10^9$ Pa, для кристаллов Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> или SiC) минимальная толщина подложки равна приблизительно 40 микрон, а минимальная масса приблизительно равна 2.5-3 миллиграмма при длине ускорителя 1000 м ( $L=1000$ m). Уменьшение длины ускорителя ( $L < 1000$ m) приводит к необходимости увеличения массы подложки и следовательно к ненужному увеличению энергетических затрат, необходимых для ускорения более тяжелой макрочастицы. Для увеличения КПД можно использовать возможность увеличения массы *dt*-смеси, например, вследствие увеличения диаметра цилиндрической *dt*-капсулы. Если этого не делать, то для сравнительно коротких ускорителей

может оказаться более приемлемым вариант бомбардировки dt- капсулы ускоренным твердым телом. Вторым лимитирующим фактором является длительное время формирования большого числа сверхпроводящих пленок и несверхпроводящих слоев ( $n > 10^4$ ). Не вполне ясно как создать простые и экономичные технологии, способные производить макрочастицы с необходимой скоростью (более 10 макрочастиц/сек). Более простых технологических решений термоядерной проблемы, вероятно, следует ожидать вследствие создания ионных сверхпроводников, поскольку применимы планарные технологии, и скорее всего при создании макрочастицы требуются ионные сверхпроводники в незначительном количестве. См. fig.4.5-4.6.

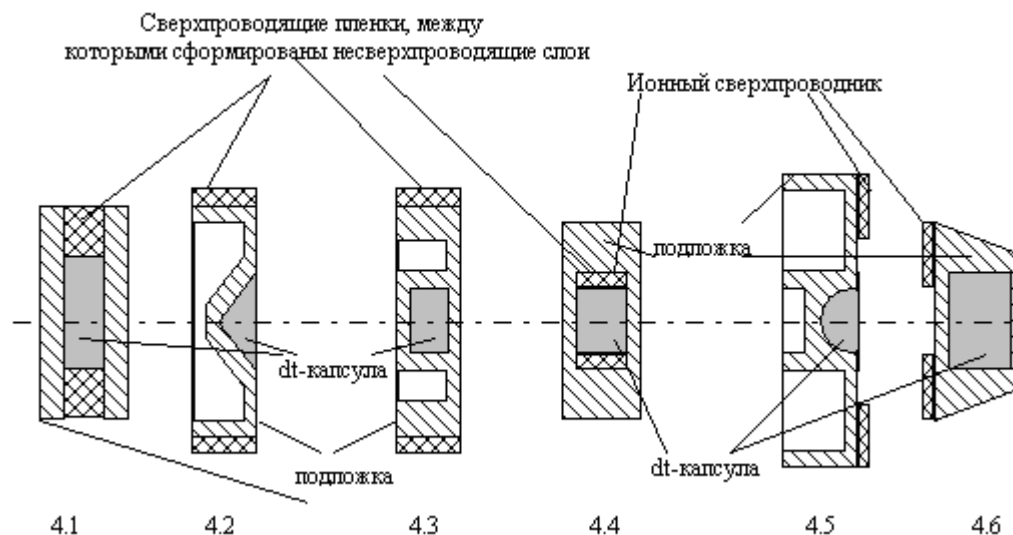


Fig.4. Конструкции бесконтактных макрочастиц, имеющих цилиндрическую симметрию.

Чтобы иметь возможность сравнить предлагаемый метод осуществления УТС с другими методами я приведу один пример. Опираясь на 25 летний опыт в работах по лазерному термоядерному синтезу, в США в середине 90-х годов приступили к строительству лазера NIF (Национальная установка для зажигания) на неодимовом стекле, рассчитанного на достижение термоядерной вспышки [2]. Точнее, согласно численным расчетам ожидается, что в экспериментах на этом лазере (в режиме однократных импульсов) будут достигнуты коэффициенты усиления, по отношению к энергии лазера, равные 5-7 при полном КПД в доли процента. Выходная энергия лазерного импульса будет составлять  $\sim 1,8$  МДж и будет достигнута за счет последовательного усиления импульса задающего генератора ( $\sim 0,1$  Дж) в 192 параллельных каналах. В экспериментах на этой установке планируется работа с обоими типами мишеней — с мишенями прямого действия и с рентгеновскими мишенями. Стоимость проекта оценивается приблизительно в 4 миллиарда \$ США, запуск при полной энергии ожидался в 2007-2008 гг.

Этот пример иллюстрирует сложность пути пройденного и предстоящего к созданию термоядерной электростанции. Читатель сам, по мнению автора, способен оценить целесообразность того стоит ли двигаться к решению термоядерной проблемы путем, изложенным в настоящей работе или продолжать движение по старой дороге.

Автор выражает благодарности Кореневу А.Г., Старцеву А.И., Цюю Г.С., без помощи которых появление данной работы было бы затруднительно, также Макухе В.К., Чикичеву С.И., Прилуцкой М.М. за перевод вышерасположенного текста на английский.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Sharkov B.Yu., Nuclear Inertial fusion. Position today and perspectives for a power engineering. Bu Ed. Sharkov B.Yu., M. Fizmatlit., 2005, pp.1-264 ( in Russian)
- [2] Hogan W.J., Moses E.L., Warner B.E. et al. The National Ignition Facility // Nuclear Fusion. 2001. V. 41, № 5. P. 567.
- [3] Monzon V.M., Acceleration of macroscopic particles for controlled thermonuclear fusion. Uspekhi Fizicheskikh Nauk, 1981, V.134, pp.611-637. ( in Russian)
- [4] Chernoplekov N.A. The status of research on high-current applied superconductivity. Uspekhi Fizicheskikh Nauk, 2002, V.172, №6 pp.716-722. ( in Russian)
- [5] Ioffe V. M. Does high-temperature ionic superconductivity exist?

[6] www.v-ioffe.ru

[7] Goldsmid H.J., Problems in solid state physics, bu Ed. Goldsmid H.J., Nauka, M., 1976, p.408( in Russian)

[8] Ioffe V. M. An alternative approach to solving thermonuclear synthesis problem., International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument and Engineering (APEIE-2010), V2, pp. 91-94, Novosibirsk, ( in Russian)

#### Дополнение

##### Более корректные оценки.

Пусть для определенности  $B_f = 0.5 \cdot 6^{1/2} \lambda / a B_c$ ,  $I_s \approx B_c / (1.84 \mu_0 \lambda)$ . Пусть протекание тока в пленке приводит к возникновению поля на ее поверхности по величине порядка  $a/4\lambda B_c$ , что соответствует плотности тока немного меньше критической величины. Если имеются  $n$  одинаковых параллельных пленок, по каждой из которых течет такой ток, то магнитное поле возрастает в  $n$  раз. Из условия равенства величины магнитного поля его критической величине  $B_f + 0.25 n a/\lambda B_c = 6^{1/2} \lambda/a B_c$  получим максимальную суммарную толщину пленок  $S = 2na = 96^{1/2} \lambda^2/a \approx 10\lambda^2/a$ , при числе пленок  $n \approx 5(\lambda/a)^2$ .

Плотность сверхпроводящего тока в сильных магнитных полях ограничена. (При температурах жидкого гелия ( $T=4.2$  К) при  $B=5$ Т для Nb-Ti  $I_s=5 \cdot 10^5$  А/см<sup>2</sup>.)

Для пленок критическая плотность тока много больше. Для создания механически прочной структуры необходимо обеспечить чередование тонких сверхпроводящих пленок с несверхпроводящими слоями. Число сверхпроводящих пленок в такой структуре меньше  $5(\lambda/a)^2$ . В противном случае магнитное поле создаваемое пленками при протекании в них максимальной плотности тока может превышать критическое поле для пленки. Для  $\lambda=5 \cdot 10^{-8}$ м,  $a=5 \cdot 10^{-10}$ м,  $n \sim 50$  000. Можно ли сегодня изготовить такие структуры? Поскольку требуется производить макрочастицы с большой интенсивностью, а формирование десятков тысяч пленок процесс длительный, необходимо формировать пленки на больших площадях. Скорее всего предпочтительно использовать MOCVD или ALD технологию. К сожалению, мне неизвестно о формировании очень тонких пленок Pb, V, Nb при помощи этих технологий, но это не значит, что это невозможно сделать. У пленок алюминия и индия критическая температура существенно превышает соответствующие критические температуры этих массивных материалов и температуру жидкого гелия (4.2 К). Поэтому алюминий и индий могут быть использованы в качестве тонких сверхпроводящих пленок. Технология (ALD) изготовления таких пленок в настоящее время известна.

Наиболее простое техническое решение заключается в обстреле ускоренным твердым телом термоядерной мишени, помещенной в реактор. Хотя осуществление этой версии требует дополнительных энергетических затрат. В этом случае нет необходимости в создании немассивной и прочной оболочки (подложки) для термоядерного топлива.

Если ориентироваться на ускорение dt капсулы, то следует учитывать сложность изготовления подложки. Чем большую длину имеет ускоритель, тем проще изготовить подложку ( немассивный прочный контейнер) для смеси дейтерия и трития. Поэтому использование ускорителя, имеющего длину 3-5 километра, может оказаться более приемлемым из за экономических соображений, чем использование сравнительно небольших ускорителей.