



# НАНОТЕХНОЛОГИИ И УСКОРЕНИЕ МАКРОЧАСТИЦ – РЕШЕНИЕ ТЕРМОЯДЕРНОЙ ПРОБЛЕМЫ

В.Иоффе / [alkornsk@mail.ru](mailto:alkornsk@mail.ru)

**С**оздание термоядерной электростанции на основе инерционного термоядерного синтеза (ТС) [1] не совсем удачно. Разогрев твердотельной мишени из дейтерия и трития лазерным излучением, пучком ионов или инерционным Z-пинч-эффектом обеспечивает одиночный микровзрыв, однако частота их должна быть достаточно большой и для электростанции мощностью около 1 ГВт составляет десятки герц. Сложно обеспечить фокусировку излучения большого числа источников и помещение мишени в заданную точку, поскольку за сотые доли секунды до этого в реакторе произошел взрыв, эквивалентный десяткам килограммам тротила. Пока нет ответа, за какое время технически можно заменить мишень. В [2] замена осуществляется за сутки. Не решена и проблема деградации оптических элементов. При использовании Z-пинч-эффекта практически невозможно за доли секунды заменить на новую разрушенную взрывом токонесущую систему. Попытки получения энергии из удерживаемой магнитным полем плазмы также не способствуют созданию рентабельной термоядерной станции. В статье рассматривается иной подход.

## МЕТОД УСКОРЕНИЯ МАКРОЧАСТИЦ

Инерционный управляемый ТС требует быстрого нагрева объема плотного вещества. Важно накопить энергию, а потом почти мгновенно преобразовать ее в тепло в миллиграммовой dt-капсуле (замороженная смесь дейтерия и трития). Можно накопить кинетическую энергию, ускоряя капсулу до  $10^6$  м/с, что практически соответствует температуре термоядерной реакции в 10–20 кэВ, если эту энергию преобразовать в тепло в результате удара о мишень внутри реактора или о другую ускоренную капсулу. Появляется возможность доставки топлива в неостывший полностью реактор. Термоядерный поджиг можно осуществить также при бомбардировке dt-мишени ускоренным твердым телом.

Идее ускорения твердотельных макрочастиц для управляемого ТС почти полвека. Оценены его различные механизмы [3]. Однако приемлемые решения не найдены. Необходимые размеры ускорителей макрочастиц огромны – порядка 100 км. Задача работы – показать, что решение термоядерной проблемы при

относительно небольших размерах ускорителей может быть реализовано при использовании тонких пленок.

Механизм ускорения поясняется на рис.1 – источник тока  $I$  замкнут через полосу (скользящий контакт) на поверхности двух параллельных токонесущих шин, находящихся на расстоянии  $d$  друг от друга. Полоска перпендикулярна к шинам. Магнитное поле  $B$  (индукция) направлено нормально к плоскости поверхности контактов. На полосу действует сила  $F=BI d$ , которой соответствуют ускорение  $a=BI d/m$  и скорость  $V=(BI d/m)t$ , направленные вдоль шин, где  $t$  – время ускорения,  $m$  – масса полоски.

Длина полосок при этом равна:

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

где  $L=200$  м;  $t=4,10^{-4}$  с;  $B=10$  Тл;  $V=10^6$  м/с;  $I=10^5$  А;  $m=10^{-6}$  кг;  $d=2,5 \cdot 10^{-3}$  м, что приемлемо для реализации, причем в экспериментах применяются импульсные источники, ток в которых на порядки больше необходимых  $10^5$  А. Создание магнитного поля в 10 Тл также реализуемо. Исключить трение контакта о воздух можно,



поместив систему в вакуум. Уменьшить его трение о рельсы можно при магнитном поле  $B_1$  по движению контакта. Тогда появляется сила, направленная вертикально и позволяющая компенсировать массу полоски и уменьшить пропорциональную ей силу трения. Исключить трение скользящего контакта о рельсы можно вертикальным их расположением. Для легкого прижима полоски к рельсам можно использовать дополнительное магнитное поле.

Поскольку большой ток может сжечь перемычку, целесообразно ее и токоведущие рельсы изготавливать из сверхпроводящего материала. Если  $I_s$  – критическая плотность тока для перемычки,  $\rho$  – плотность,  $S$  – площадь сечения,  $m = \rho S d$ , а через шины и перемычку течет ток  $I = I_s S$  из (1), то минимальные размеры ускоряющей системы равны:

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

где  $L_{\min} = 1,3 \cdot 10^5$  м при температуре жидкого гелия 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 5 Тл. Примерно такой же размер ускорительной системы при  $B = 6$  Тл для Nb<sub>3</sub>Sn. (Критические плотности тока этих материалов в магнитных полях приведены в [4].) Перемычку можно использовать как средство доставки термоядерного топлива в реактор при  $L > L_{\min}$ .

Поскольку контактное ускорение макрочастиц имеет недостатки, целесообразно построить аналог линейного резонансного ускорителя. Сверхпроводник с магнитным моментом можно ускорить в неоднородном магнитном поле. Ускоряющая система выполняется из множества соленоидов с общей осью Z, причем четные соленоиды запитываются переменным током в противоположной фазе с нечетными.

Пусть сверхпроводник расположен между двумя ускоряющими соленоидами. В заднем соленоиде ток течет противоположно току в сверхпроводнике, а в переднем – одинаковом. Сверхпроводник отталкивается от заднего соленоида и притягивается к переднему. Как только он проскакивает передний соленоид, направление поля меняется на противоположное, и ускорение повторяется.

Возможен иной вариант. В соленоидах позади ускоряемого тела ток течет в противоположном направлении по сравнению с соленоидами впереди него, или ток подается на соседние соленоиды, между которыми расположено ускоряемое тело. Если оно имеет форму цилиндра с диаметром  $d$ , высотой  $h$  и плотностью  $\rho$  при расстоянии между цилиндрами  $D$  и плотности тока  $I_s$ , магнитный момент равен  $M = 1/3 \pi I_s h (d/2)^3$ . При  $m = \pi h d^2 / 4$  сила  $F = M d B / d Z \approx 2 B M / D$ . Ей соответствует ускорение  $a \approx 2 B M / D m = 1/3 B I_s d / (D \rho)$ , где  $B$  – средняя индукция магнитного поля ускоряющих соленоидов.

Для кольца диаметром  $d_a \approx 1/2 B I_s d / (D \rho)$ . Для полосоки ускорение равно  $a = B I d / m = B I_s / \rho$ . Поскольку почти половину времени бесконтактная макрочастица не ускоряется, при одинаковом ускорении размеры бесконтактного ускорителя

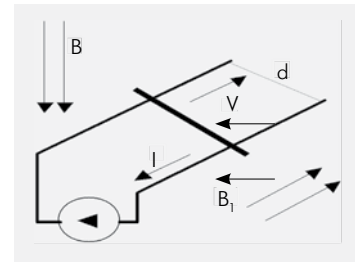


Рис.1. Контактное ускорение

будут больше, чем при контактном. Для уменьшения размеров ускорителя можно увеличить частоту переменного тока ускорения частицы или использовать большое число источников тока, работающих на разных частотах, причем вместо соленоидов могут быть применены индуктивные части СВЧ-резонаторов.

## ВОЗМОЖНОСТЬ УМЕНЬШЕНИЯ УСКОРИТЕЛЕЙ НА ПОРЯДКИ

Размеры ускорителей пропорциональны  $\rho / (B I_s)$ . Тогда необходимы сверхпроводящие материалы, способные пропускать большие плотности тока при значительных магнитных полях, причем  $B I_s$  должна многократно превышать эту величину для лучших сверхпроводников. Поскольку такими соединениями являются сплавы ниобия, а создание новых сверхпроводящих материалов прогнозировать невозможно, проблема представляется неразрешимой. Учитывая, что масса ускоряемой частицы мала, необходимые материалы создать можно в виде тонкопленочных структур.

В пленке сверхпроводимость в сотни раз превышает критическое поле для массивного материала. У свинцовой пленки толщиной 20 Å сверхпроводимость сохраняется при полях в 40 Тл. Результаты Лондонов [5] менее чем вдвое отличаются от данных более точных теорий. Уравнение Лондонов для поля внутри тонкой пластины сверхпроводника в одномерном случае выглядит так:  $\lambda^2 d^2 B / dx^2 = B$ . Здесь  $\lambda$  – глубина проникновения магнитного поля в массивном сверхпроводнике,  $B$  – индукция поля. Если  $B(a) = B(-a) = B_f$ , то  $B = B_f \operatorname{ch}(x/\lambda) / \operatorname{ch}(a/\lambda)$ . Это распределение поля в магнитное поле в тонкой пленке сверхпроводника толщиной  $2a$ . При краевых условиях:  $B(a) = B_f$ ,  $B(0) = B_f / \operatorname{ch}(a/\lambda)$  решение отражает распределение поля в помещенной в магнитное поле сверхпроводящей пленке с током толщиной  $a$ .

Изменение магнитного поля  $\Delta B = 2 B_f = \mu_0 I_s a = B_f - B_f / \operatorname{ch}(a/\lambda)$  обусловлено током в пленке. Когда  $\lambda \gg a$ , поле равно  $B_f = 6^{1/2} B_c \lambda / a$  [5]. Плотность критического тока  $I_s = (6^{1/2} / 2) B_c / (\mu_0 \lambda) \approx B_c / (\mu_0 \lambda)$ , где  $B_c$  – критическая магнитная индукция в массивном сверхпроводнике. Для  $\lambda = 5 \cdot 10^8$  м,  $a = 5 \cdot 10^{-10}$  м,  $B_c = 0,1$  Тл –  $I_s \approx 2 \cdot 10^{12}$  А/м<sup>2</sup>,  $B_f = 24$  Тл. Параметры приблизительно соответствуют Nb, V, Pb,



$\lambda_a$ ,  $T_a$ , и произведение  $I_s V$  для пленок Nb или V толщиной 5–10 Å приблизительно в  $10^3$  раза выше, чем у сплава Nb-Ti. Если бы пленки имели достаточную механическую прочность, уменьшить размеры ускорителей удалось бы по крайней мере в  $10^3$  раз.

Из пленок необходимо создать механически прочное сооружение, например, с множеством сверхпроводящих пленок, между которыми находятся слои из обычного материала. Если масса структуры превосходит суммарный показатель для сверхпроводящих пленок в  $N$  раз, размеры ускорителя можно уменьшить приблизительно в  $10^3/N$  раз для частиц той же массы из Nb-Ti. Для бесконтактно ускоряемых макрочастиц слои и пленки формируются на боковой поверхности цилиндра из легкоплавкого материала, заменяемого смесью дейтерия и трития. Минимальный линейный размер dt-капсулы без учета сжатия – 1–2 мм.

Суммарная толщина пленок не должна превышать  $10\lambda^2/a$ , поскольку критическая плотность тока в противном случае уменьшается. Пусть ток в пленке приводит к возникновению на ее поверхности поля  $0,5V_c a/\lambda$ , что соответствует плотности тока, несколько меньше критической. Если по каждой из  $n$  параллельных пленок течет такой ток, магнитное поле на поверхности крайних пленок возрастает в  $n$  раз. При магнитном поле, равном критической величине  $V_c = 0,5na/\lambda V_c = 6^{1/2}\lambda/a V_c$ , максимальная толщина пленок  $S = 2na = 96^{1/2}\lambda^2/a \approx 10\lambda^2/a$ , при их числе  $n = 24^{1/2}(\lambda/a)^2$ . Для  $\lambda = 5 \cdot 10^{-8}$  м,  $a = 5 \cdot 10^{-10}$  м –  $S = 50$  мкм,  $n = 50000$ . Сравнительно большая величина  $S$  – гарантия создания прочных тонкопленочных структур. Из (2) минимальные размеры ускорителя при контактном ускорении:

$$L_{\min} = \frac{1}{2}(\rho V^2)/(I_s B) = \frac{1}{2}(\rho V^2)/(6^{1/2} V_c^2/a \mu_0). \quad (3)$$

Если  $V_c = 0,1$  Тл,  $V = 10^6$  м/с,  $\rho = 10^4$  кг/м<sup>3</sup>,  $a = 5 \cdot 10^{-10}$  м, то  $L_{\min} \approx 100$  м. Минимальные размеры ускорителя без контактов в разы больше, причем структура из сверхпроводящих и нормальных слоев, работоспособная при больших полях, направленных параллельно ее поверхности.

Магнитное поле может уничтожать сверхпроводимость или разрушать куперовские пары электронов в сверхпроводниках. У ионных сверхпроводников нет куперовских пар и их аналогов – объектов для разрушения магнитным полем. В качестве носителей используются бозоны – однозарядные ионы изотопа лития с малой эффективной массой, поэтому проблему поможет решить создание ионных сверхпроводников, используемых для бесконтактно ускорения макрочастицы, поскольку ей можно придать очень большой магнитный момент. Ионные сверхпроводники можно применять также при изготовлении необходимых для бесконтактно ускорения

макрочастиц источников больших переменных магнитных полей. Для их создания в виде тонких пленок, сжимаемых более толстыми слоями, предложено использовать МВЕ-технологии [6–8].

Минимальная толщина пленок не может превышать постоянную кристаллической решетки материала (а). Плотность ( $\rho$ ) и  $a$  для формирования макрочастиц и расчетные длины ускорителей приведены в таблице.

Минимальная длина ускорителя  $L_{\min}$  (3),  $P_c$  – предел прочности материала. Вследствие большой  $V_c$  наиболее перспективны для создания сверхпроводящих пленок Nb или V. Поскольку для сверхпроводящих рельс критическая плотность тока много меньше, чем в сверхпроводящей пленке, контакт между ними и макрочастицей следует создать на большой площади. Это определяет форму ускоряемой частицы, оптимальное сечение которой – равнобедренная трапеция (рис.2), причем длина меньшей стороны ( $y$ ) равна расстоянию между рельсами. Расстояние между параллельными сторонами –  $h$ , а  $x \gg y$  и  $h$ , где  $x$  – длина основания. Плотность тока в скользящем контакте больше, чем в шинах приблизительно в  $\frac{1}{2} x/h$ , и одинакова в любом вертикальном сечении подвижного контакта.

Конструкция позволяет при минимальном весе сохранить сверхпроводимость в ускоряющей системе. Это легко изготавливаемая форма исключает срезание подвижного контакта с рельс.

При движении макрочастицы необходимо сохранить площадь ее контакта с рельсами. Чтобы избежать разрушения dt-капсулы, следует сформировать ее внутри подложки [3]. Предел прочности капсулы определяется в  $5 \cdot 10^{-4}$  ГПа, который у большинства твердотельных материалов на порядки больше. При контактном ускорении макрочастица содержит один или группу подвижных контактов с подложкой, внутри которой размещена смесь дейтерия и трития. При бомбардировке капсулы ускоренным твердым телом вместо подложки и dt-смеси можно использовать твердое тело с массой, превосходящей массу dt-мишени в несколько раз (10–20 мг).

При изготовлении пленок макрочастиц применяются планарные технологии. Пока не ясна возможность безвакуумных технологий для создания структур, включающих пленки из свинца, ванадия, тантала, лантана или ниобия. Вместе с тем для изготовления

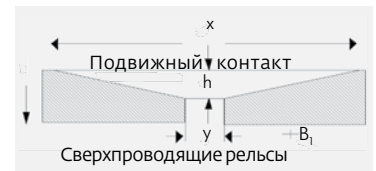


Рис.2. Ускоритель, когда критическая плотность тока в подвижном контакте много больше, чем в рельсах



Некоторые параметры материалов для ускоряемых макрочастиц

Материал	a, Å	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$V_c$ , Тл	$P_c$ , ГПа	$L_{min}$ , м
Pb	4,95	$11,34 \cdot 10^3$	0,08	$7 \cdot 10^{-2}$	212
Nb	3,3	$8,58 \cdot 10^3$	0,2	1,1	19
V	3,03	$5,96 \cdot 10^3$	0,142	0,6	24
In	3,25	$7,29 \cdot 10^3$	0,0293		720
Al	4,05	$2,7 \cdot 10^3$	0,0105		2600
DT-смесь (T=4,2K)		$0,22 \cdot 10^3$		$5 \cdot 10^{-4}$	
Кристалл SiC		$3,21 \cdot 10^3$		21–37	
Кристалл Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		$3,960 \cdot 10^3$		28–42	

бесконтактных макрочастиц (рис.3, 3.1–3.4) для небольших ускорителей необходимо формировать тонкие пленки на цилиндрической поверхности. Скорее всего, речь идет о модернизации MBE- и CVD- технологий. Например, атомно-слоевое осаждение (АСО), как частный случай CVD, позволяет формировать моноатомные слои на площадях в десятки квадратных метров на поверхностях любой геометрической формы [9]. Кроме того, необходимо сформировать макрочастицу, например, из легкой и прочной подложки, dt-капсулы и структуры, включающей различные слои. Масса подложки должна быть как можно меньше и существенно не превышала массу капсулы. Для создания ионных сверхпроводников требуются гетероструктуры, также содержащие тонкие пленки.

Лимитирующий фактор для изготовления макрочастицы для бесконтактного ускорения – разрушающее давление dt-смеси на подложку. Для кубической капсулы характерны линейный размер стороны  $l=2$  мм и масса  $2 \cdot 10^{-6}$  кг. Тогда  $S=l^2=4$  мм<sup>2</sup>,  $L=10^3$  м,  $V=10^6$  м/с,  $t=L/V=10^{-3}$  с,  $a=V/t$ ,  $P=ma/S$ , откуда  $P=0,5 \cdot 10^9$  Па. Это давление больше предела прочности многих твердотельных материалов ( $P=mV^2/(Ll^2)$ ), и термоядерное топливо ведет себя подобно жидкости – на противоположные грани подложки, растягивая ее, действует сила  $\sim mV^2/L$ .

Пусть  $l_s$  – толщина подложки,  $l=2$  мм,  $m=2$  мг. Минимальная толщина подложки ( $l_s$ ) определена приблизительно равенством  $mV^2/L=P_s l_s$ . Здесь  $P_s$  – предел прочности материала подложки. Минимальная ее масса ( $m_s$ ) определяется равенством  $m_s=5\rho l_s^3$ , где  $\rho$  – плотность подложки. Для прочных материалов ( $P_s \sim 25\text{--}30 \cdot 10^9$  Па – кристаллы Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> или SiC) толщина подложки 40 мкм, масса – 2,5–3 мг при длине ускорителя 1000 м. Уменьшение длины приводит к необходимости увеличения массы подложки и энергетических затрат для ускорения более тяжелой макрочастицы. Для повышения КПД можно использовать

увеличение массы dt-смеси. Если этого не делать, для сравнительно коротких ускорителей может оказаться более приемлемым вариант бомбардировки капсулы ускоренным твердым телом.

Второй лимитирующий фактор – длительность формирования сверхпроводящих пленок и несверхпроводящих слоев ( $n > 10^4$ ). Нужны технологии, способные производить более 10 макрочастиц/с. Более простых решений термоядерной проблемы следует ожидать при создании ионных сверхпроводников, поскольку в этом случае применимы планарные технологии (см. рис.3, 3.5–3.6).

В целом формировать пленки для управляемого ТС можно по CVD-технологии. В качестве сверхпроводящих пленок целесообразно применять Nb, V, La, Ta или Pb. К сожалению, автору не известны публикации о формировании очень тонких пленок из этих материалов безвакуумными методами. Вероятно, следует подобрать материалы для равномерного осаждения на них Nb и наоборот. У пленок Al и In критическая температура существенно превышает ее для массивных материалов [10], и они могут быть использованы в качестве тонких сверхпроводящих пленок, причем АСО-метод их изготовления и изолирующих слоев известен [9].

Наиболее простое решение – обстрел ускоренным твердым телом помещенной в реактор термоядерной мишени. Тогда нет необходимости создавать немассивную и прочную оболочку. Этот подход требует дополнительных мощностей. При изготовлении макрочастицы с термоядерной смесью проблема – в необходимости делать контейнер для нее максимально прочным и облегченным. Чем большую длину имеет ускоритель, тем меньше может быть масса подложки, поэтому ускоритель в несколько километров более приемлем, чем сравнительно небольшой. Для прогресса термоядерной энергетики нужно совершенствовать технологии создания структур с чередованием тонких сверхпроводящих пленок

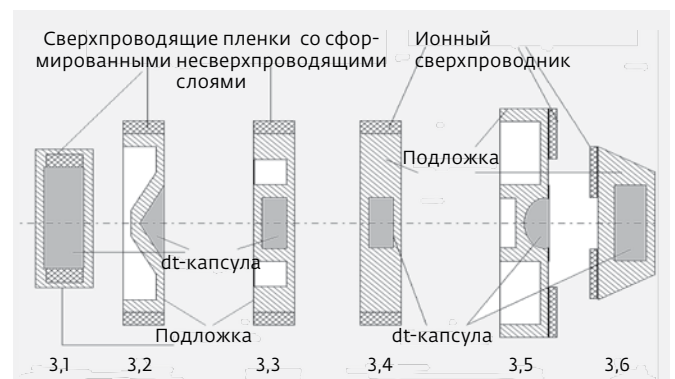


Рис.3. Бесконтактные ускорители с цилиндрической симметрией макрочастиц



с несверхпроводящими слоями, формировать сверхпрочные изолирующие материалы для подложек. Здесь, возможно, наблюдался бы больший прогресс, если бы нанотехнологии рассматривались как одно из средств решения прикладных задач.

Потребность в термоядерной энергии сейчас не стала меньше, чем полвека назад. По этой причине всегда неплохо хорошенько подумать над проблемой в целом. Для сравнения предлагаемого метода управляемого ТС с другими методами можно привести пример. Опираясь на опыт работ по лазерному управляемому ТС, в США в середине 1990-х годов для обеспечения термоядерной вспышки приступили к созданию мощных лазеров на Nd (проект NIF) [2]. Ожидалось, что при полном КПД в доли процента в режиме однократных импульсов будут достигнуты коэффициенты усиления по отношению к энергии лазера, равные 5-7. Выходная энергия лазерного импульса будет составлять ~1,8 МДж за счет последовательного усиления импульса задающего генератора в 192 параллельных каналах. Стоимость проекта оценивалась в 4 млрд. долл. Запуск при полной энергии ожидался в 2007-2008 годах, однако был осуществлен лишь в 2010 году. Почти через 40 лет с начала работ была проведена термоядерная вспышка, но до практического получения энергии еще очень далеко. Это иллюстрирует сложность создания термоядерной

электростанции. Читатель сам способен оценить целесообразность решения термоядерной проблемы по пути, изложенному в представленной работе, или продолжения движения по старому направлению\*.

*Автор выражает благодарность А.Кореневу, А.Старцеву, Г.Цюю, без помощи которых появление данной работы было бы затруднено, а также В.Макухе, М.Прилуцкой и рано ушедшему из жизни С.И.Чикичеву (1951-2010).*

### Литература

1. Ядерный синтез с инерционным удержанием. Современное состояние и перспективы для энергетики. / Под ред. Б.Ю.Шаркова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005.
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. Монзон В.М. Ускорение макрочастиц для управляемого термоядерного синтеза. – УФН, 1981, т.134, №4, с.611-637.
4. Черноплеков Н.А. Состояние работ по сильноточной прикладной сверхпроводимости. – УФН, 2002, т.172, №6, с.716-722.
5. Тинкхам М. Введение в сверхпроводимость. – М: Атомиздат, 1980. с.130-139.
6. Ioffe V.M. Does high-temperature ionic superconductivity exist? International. – Journal of Modern Physics, V, 2009, v.23, №4, p.597-613.
7. www.v-ioffe.ru
8. Ioffe V.M. An alternative approach to solving thermonuclear synthesis problem., International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument and Engineering (APEIE-2010), v.2, p.91-94, Novosibirsk.
9. Путконен М., Тузовский В. Новые применения атомно-слоевого осаждения (АСО). – Наноиндустрия, 2010, №5, с.18-21.
10. Физические константы, справочник. / Под ред. И.С.Григорьева и Е.З. Мейлихова. – М: Энергоатомиздат, 1991.

\*Электростанция мощностью в 1 ГВт производит в год электроэнергию и тепло приблизительно на 1 млрд. долл. При сроке ее окупаемости в 10 лет, не беря во внимание расходы на эксплуатацию, стоимость электростанции не должна превышать ~10 млрд. долл. Планируемая стоимость реактора на основе инерциального ТС мощностью 1 ГВт около 1 млрд. долл. Это много меньше прогнозируемой стоимости лазерного или ионного драйвера [1]. Стоимость электростанции состоит в основном из цены реактора и ускорителя макрочастиц, который при длине в 1 км может стоить ~300 млн. долл. Тогда в перспективе речь может идти о термоядерной станции стоимостью 1-3 млрд. долл.

## NANOTECHNOLOGIES AND ACCELERATION OF MACROPARTICLES IS THE THERMONUCLEAR ISSUE SOLUTION

V.Ioffe / alkornsk@mail.ru

The creation of the fusion power station on inertial thermonuclear fusion (TF) [1] is not entirely successful. Heating a solid state target of deuterium and tritium by laser radiation, ion beam or the inertial Z-pinch effect provides a single micro-explosion, but the frequency of such explosions has to be large enough and for a station with a capacity of about GW it will be dozens of Hz. It is difficult to focus the radiation of a large number of sources and place the target to the set point in hundreds parts of the second because there was an explosion equivalent to dozens of kilograms of TNT in the reactor. There is no answer as to how long it can take technically to replace the target. In [2] it is carried out within one day. The issue of degradation of optical elements under the influence of ionizing radiation has not been solved yet. In addition, by use of Z-pinch effect it is almost impossible in split seconds to replace with a new one the current-carrying system. Attempts to obtain energy from plasma confined by a magnetic field do not contribute to creation of a cost-effective thermonuclear station. There is a need to consider a different approach.

### METHOD OF ACCELERATING OF MACROPARTICLES

The inertial controlled TF requires rapid heating a certain amount of dense substance in a short time. It is important to save energy and then convert it into heat in a dt-milligram capsule (frozen mixture of deuterium and tritium). It is possible to accumulate kinetic energy

by accelerating of the capsule up to  $10^6$  m/s which almost practically corresponds to the optimum temperature of a thermonuclear reaction in 10-20 keV, if this energy is converted into heat as a result by punching the target inside the reactor or on another accelerated capsule. Thus there emerges an opportunity to deliver fuel to a reactor which has not



got cooled completely. Obviously, fusion ignition can be achieved also by bombardment of the dt-target by an accelerated solid body.

Although the idea of accelerating solid particles for controlled TS is nearly half a century of age, and the evaluation of its mechanisms has already been carried out [3], acceptable solutions have not been found yet. Calculations have shown that the required sizes of the macroparticle accelerators are huge – about 100 km. The objective of this paper is to show that the solutions of the fusion issue, with sizes of accelerators relatively small, are available and can be implemented with the use of thin films.

A possible acceleration mechanism is illustrated in Fig.1 – the current source  $I$  is closed by a strip (slider) on the surface of two parallel current-carrying buses which are at a distance  $d$  from each other. The strip is perpendicular to the buses. The magnetic field  $B$  (induction) is directed normal to the plane of the surface of the contacts. The force  $F = Bid$  influences the strip. It corresponds to acceleration  $a = Bid/m$  and velocity  $V = (Bid/m)t$ , directed along the buses if the force of friction and air resistance are ignored. The time of acceleration is  $t$ ,  $m$  is its mass.

Fig.1 Contact acceleration

At that the length of the conductive strips is equal to:

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

At  $B = 10$  Tl,  $V = 10^6$  m/s,  $I = 10^5$  A,  $m = 10^{-6}$  kg,  $d = 2.5 \cdot 10^{-3}$  m, it is  $L = 200$  m,  $t = 4 \cdot 10^{-4}$  s, which is acceptable for the implementation of pulsed sources, the current in which is by several orders greater than the required  $10^5$  A. Creating a magnetic field of 10 Tl is also feasible. Excluding friction of the sliding contact with the air is possible when the system is put in vacuum. Reducing friction of the strip on the rails is possible with a magnetic field  $B_1$  directed along the movement of the contact. Then there appears a force directed vertically upwards and it can compensate the weight of the strip and reduce friction which is proportional to the weight. Excluding friction of the sliding contact on the rails can be performed by their vertical location. Easy clamping of the strip to the rails can be achieved by using an additional magnetic field.

Since a considerable current can burn the jumper, it is expedient to make it and the conductive rails from a superconducting material. Assuming that  $I_s$  is the critical current density for the material of the jumper,  $p$  is density,  $S$  is the cross-sectional area,  $m = pSd$ . From (1) the current flow is  $I = I_s S$  through the buses and the jumper, the minimum size of the accelerating system is:

$$L = L_{\min} = 1/2(pV^2)/(I_s B). \quad (2)$$

At liquid helium temperature for the alloy Nb-Ti at  $p = 6.5 \cdot 10^3$  kg/m<sup>3</sup>,  $V = 10^6$  m/s,  $I_s = 5 \cdot 10^5$  A/cm<sup>2</sup> at external fields 5 Tl  $L_{\min} = 1.3 \cdot 10^3$  m. Approximately the same size of the accelerating system is obtained for  $B = 6$  Tl for Nb<sub>3</sub>Sn. (The critical current densities of these materials in the magnetic fields are from [4]). The jumper can be used as a delivery means of the fusion fuel into the reactor at  $L > L_{\min}$ .

Since the contact acceleration of the macroparticles has obvious disadvantages, it is advisable to construct an analog of the linear resonance accelerator. The superconductor with a magnetic moment can be accelerated in a non-homogeneous magnetic field. The accelerating system is made from a set of solenoids with a common axis  $Z$ , and here the even solenoids are powered by alternating current in the opposite phase with odd ones.

Let the superconductor is located between two accelerating solenoids. In the rear solenoid the current flows opposite to the direction of the current in the superconductor, and in the front one it flows in the same direction. The superconductor is pushed from the rear solenoid and is attracted to the front of one. As soon as it leaps the strait solenoid the direction of the field in the superconductor is reversed, and the acceleration is repeated.

Another version is possible. In the solenoids behind the accelerated body the current flows in the opposite direction as compared with the solenoids placed in front of it, or the current is applied to the adjacent solenoids between which the accelerated body is placed. If this body has the shape of a cylinder with a diameter  $d$ , height  $h$  and density  $\rho$  at the distance between the cylinders  $D$  and the current density  $I$  the magnetic moment is  $M = 1/3 \pi I h (d/2)^3$ . When  $m = \pi \rho h d^2/4$  strength  $F = MdB/dZ \approx 2BM/D$ . The acceleration of  $a \approx 2BM/Dm = 1/3BI d / (D\rho)$  corresponds to it where  $V$  is the average magnetic induction of the field of the accelerating solenoids. For a ring with a diameter  $d$  a  $\approx 1/2 BI d / (D\rho)$ . For a strip the acceleration is  $a = Bid/m = BI_s/p$ . Since almost half of the time the contactless macroparticle is not accelerated, of the same acceleration the sizes of the contactless accelerator will be greater than at the contact one. To reduce the sizes of the accelerator it makes sense to increase the frequency of AC of the accelerated particle or to use a large number of the current sources

operating at different frequencies and here instead of solenoids the inductive parts of the UHF-resonators can be applied.

#### POSSIBILITY OF REDUCING ACCELERATORS BY ORDERS

The dimensions of the accelerators are proportional to  $p/(BI_s)$ . Then for the solution of the issue the superconducting materials which are capable of transmitting high current densities with significant magnetic fields are necessary, and  $BI_s$  must be many times greater than this value for the best superconductors. Since these compounds are alloys of niobium, and the progress in the production of the new superconducting materials can not be predicted, the problem seems insoluble. However, taking into account the fact that the mass of the accelerated particle is small, one can create the necessary materials in small volumes in the form of thin-film structures.

In the film superconductivity is by hundreds of times greater than the critical field for the same bulk material which is observed in the field parallel to its surface. For example, superconductivity of the lead film with a thickness of 20 Å persists at the fields of 40 Tl. The results of Londons [5] are less than twice differ from those of more accurate theories. Londons equation for the field inside of the superconductor thin plate in the one dimension case is:  $\lambda^2 d^2 B/dx^2 = B$ . Here  $\lambda$  is magnetic field penetration depth in the bulk superconductor,  $B$  – induction of this field. If  $B(a) = B(-a) = B_f$ ,  $B = B_f \text{ch}(x/\lambda)/\text{ch}(a/\lambda)$ . This case describes the field distribution in the magnetic field in a superconductor thin film of thickness  $2a$ . With the boundary conditions  $B(a) = B_f$ ,  $B(0) = B_0/\text{ch}(a/\lambda)$  the mentioned decision reflects the field distribution of the superconducting film placed in a magnetic field with current of thickness  $a$ .

The change of the magnetic field  $\Delta B = 2B_f - \mu_0 I_s a = B_f - B_0/\text{ch}(a/\lambda)$  is conditioned with the current in the film. When  $\lambda \gg a$ , the field is  $B_f = 6^{1/2} B_c \lambda/a$  [5]. The critical current density:  $I_s = (6^{1/2}/2) B_c / (\mu_0 \lambda) \approx B_c / (\mu_0 \lambda)$ , where  $B_c$  is critical magnetic flux density in the bulk superconductor. For  $\lambda = 5 \cdot 10^8$  m,  $a = 5 \cdot 10^{-10}$  m,  $B_c = 0.1$  Tl –  $I_s \approx 2 \cdot 10^{12}$  A/m<sup>2</sup>,  $B_f = 24$  Tl. The parameters correspond approximately to Nb, V, Pb, La, Ta and the production  $I_s B$  for films Nb or V with thickness of  $5 - 10$  Å about  $10^3$  times is greater than this value for the alloy Nb-Ti. If the films had a sufficient mechanical strength, to reduce sizes of the accelerators have been able to at least by  $10^3$  times.

It is necessary to create from these films a mechanically robust construction. One can present the structure with many superconducting films between which there are layers of a conventional material. If the mass of the structure exceeds the total figure for the superconducting films by  $N$  times ( $N < 10^3$ ), the sizes of the accelerator can be reduced by about  $10^3/N$  times for the particles of the same mass from Nb-Ti. For the contactless-accelerated macroparticles the layers and films are formed on the side surface of the cylinder, which can be made of a low-melting material, partially or completely replaced with a mixture of deuterium and tritium. The estimated minimum linear dimension of the dt-capsule without compression is 1-2 mm.

The total thickness of the superconducting films should not exceed  $10\lambda^2/a$  otherwise the critical current density is reduced. Let the current flow in the film leads to the appearance on the surface of it of the field  $0.5B_c a/\lambda$  what corresponds to a current density which is slightly less than critical. If for each of  $n$  identical parallel films such current flows the magnetic field on the surface of the utmost films increases in extreme  $n$  times. From the equality of the magnetic field to its critical value  $B_f = 0.5na/\lambda B_c = 6^{1/2} \lambda/a B_c$  the maximum thickness of all the films  $S = 2na = 96^{1/2} \lambda^2/a \approx 10\lambda^2/a$ , when the number  $n = 24^{1/2} (\lambda/a)^2$ . For  $\lambda = 5 \cdot 10^8$  m,  $a = 5 \cdot 10^{-10}$  m –  $S = 50$  micron,  $n = 50,000$ . Relatively large value of  $S$  is a good guarantee for the creation of the strong thin-film structures ( $S/a$  can reach  $10^5$ ). From (2) the minimum size of the accelerator at the contact speed-up:

$$L_{\min} = 1/2(pV^2)/(I_s B) = 1/2(pV^2)/(6^{1/2} B_c^2/a\mu_0) \quad (3).$$

If  $B_c = 0.1$  Tl,  $V = 10^6$  m/c,  $p = 10^4$  kg/m<sup>3</sup>,  $a = 5 \cdot 10^{-10}$  m, then  $L_{\min} \approx 100$  m. Here the minimum dimensions of the accelerator without the contacts are by times more, and the structure of the superconducting and normal layers is operable at high fields only when the field is parallel to its surface.

The magnetic field can destroy superconductivity or Cooper pairs of electrons in the superconductors. By reason of the low energy of connections of the Cooper pair the transition of the superconductor to the normal state in the magnetic field which bigger than the critical one is energetically advantageous. The ionic superconductors have no Cooper pairs and their analogs – of objects to destroying by



the magnetic field. As such carriers bosons are used – singly charged ions of lithium isotope with a small effective mass, so the problem will be solved by creating ionic superconductors used as the part of the macroparticle for its non-contact acceleration. Then it can be made a very large magnetic moment for such a particle. The ion superconductors can also be used in the manufacture of the sources of great alternating magnetic fields which are necessary for the non-contact acceleration of the macroparticles. To create them in the form of thin films compressible by the thicker layers it is proposed to use the MBE-technology [6 – 8].

The minimum film thickness, apparently, can not exceed the lattice constant of the material (a), from which it is made. Density ( $\rho$ ) and (a) for the formation of the macroparticles and estimated lengths of the accelerators are presented in the Table.

Here, the minimum length of the accelerator  $L_{\min}$  (3),  $P_c$  – the ultimate strength of the material. Due to the relatively large  $B_c$  they are most promising for the production of the superconducting films from Nb or V. As for the superconducting rails critical current density is much less than in the superconducting film. Contact between them and the macroparticle should be produced on a large enough area. This determines the form of the accelerated particle (of the sliding contact the optimal section of which is an isosceles trapezoid) (Fig. 2), here the length of its smaller side (y) is equal to the distance between the rails. The distance between the parallel sides of the trapezoid is h,  $x \gg y$  and h, where x is the length of the base. The current density in the sliding contact is more than in the buses by about  $\frac{1}{2} x/h$  and it is approximately the same in any vertical cross-section of the moving contact.

The design allows at the minimal weight to retain superconductivity in the accelerating system. This most easily manufactured shape eliminates the shift of the movable contact from the rails.

At the movement of the macroparticle it is necessary to save area of its contact with the rails. That it is not simply to implement. To avoid the destruction of dt-capsule it must be formed within the substrate [3]. Tensile strength of the capsule is determined in  $5 \cdot 10^4$  GPa which is for the majority of the solid materials by orders more. During the contact acceleration the macroparticle obviously contains one or a group of movable contacts with the substrate inside of which a mixture of deuterium and tritium is placed. During the bombardment of the capsule with the accelerated solid body instead of the substrate and dt-mixture one can use a solid body with the mass greater than dt-target by several times (10-20 mg).

At the manufacture of the macroparticle films for the contact acceleration one can use planar technologies. It is not yet clear the opportunity to create structures including films of lead, vanadium, tantalum, niobium or lanthanum using of the vacuumless standard technologies. However, for the manufacture of the non-contact macroparticles (Fig. 3.1- 3.4) for the small accelerators it is necessary to form thin films on a cylindrical surface. More than likely, it is referred to the modernization of MBE- and CVD-technologies. For example, the Atomic Layer Deposition (ALD) as a special case of CVD, allows to form monoatomic layers on the areas of tens  $m^2$  on the surfaces of any geometry [9]. In addition, there is the need to form the macroparticle, for example, from the light and durable substrate, the dt-capsule and the structure comprising different layers. It is desirable that the mass of the substrate will be as small as possible and does not significantly exceed the weight of the capsule. To create ionic superconductors there is a need of heterostructures which also contain the thin films of the selected compositions.

It is very difficult to produce the macroparticle for the non-contact acceleration. The limiting factor is the collapsing pressure of dt-mixture on the substrate. If, for example, the macroparticle is accelerated in the kilometer-long accelerator it is approximately equal to 0.5 GPa. For the cubic capsule the characteristic the linear dimension of the side are  $l=2$  mm and mass of  $2 \cdot 10^{-6}$  kg. Then  $S = l^2=4$  mm<sup>2</sup>,  $L=10^3$  m,  $V=10^6$  m<sup>3</sup>/sec,  $t = L/V=10^{-3}$  sec,  $a = V/t$ ,  $P = ma/S$ , where  $P = 0.5 \cdot 10^9$  Pa. This pressure is greater than the tensile strength of many solid materials ( $P = mV^2/(Ll^2)$ ), and thermonuclear fuel behaves like a liquid – the force  $\sim mV^2/L$  acts on the opposite edges of the substrate stretching it.

Let  $l_s$  is of the substrate thickness,  $l=2$  mm,  $m=2$  milligram. Consequently, the minimum thickness of the substrate ( $l_s$ ) is determined by the equation about  $mV^2/L=P_s \cdot l \cdot l_s$ . Here  $P_s$  is the tensile strength of the substrate material. The minimum mass of the substrate ( $m_s$ ) is determined by the approximate equality of  $m_s = 5 \rho l^2 l_s$ . Here  $\rho$  is density of the substrate. For the most durable materials ( $P_s \sim 25-30 \cdot 10^9$  Pa-crystals  $Al_2O_3$  or SiC) are approximately minimal: 40 microns of the substrate thickness, and weight – 2.5-3 milligram at the accelerator length of 1,000 m. The length decrease

leads to the need of the increase the mass of the substrate and of the energy costs for the acceleration of the heavier macroparticle. To increase the efficiency one can use the increase in the mass of the dt-mixture, for example, by increasing the diameter of the cylindrical capsule. If do not perform it, it may be the more acceptable version of its bombardment by the accelerated solid body for the relatively short accelerators.

The second limiting factor is the duration of the formation of the superconducting films and non-superconducting layers ( $n > 10^4$ ). Obviously, there is a need of technologies that can produce more than 10 macroparticles/s. Simpler solutions of the fusion problem may be expected in the creation of the ionic superconductors. In this case one can use the planar technologies for simultaneously producing a large number of macroparticles (Fig. 3.5-3.6).

In general, it should be noted that the shape of the film for a controlled synthesis can be performed with CVD – technology. As the superconducting films it is advisably Nb, V, La, Ta, and Pb. Unfortunately, the author is not aware of the publications about the formation of very thin films of these materials by non-vacuum methods, although CVD was used to form films of Nb alloys. There is probably a need of picking up materials for the uniform deposition on them of Nb and vice versa. In the films of Al and In the critical temperature is much higher than this parameter for the bulk materials [10]. They can be used as thin superconducting films, here the ASO- method of making of such films and insulating layers is already known. [9]

The simple solution is in the bombardment the thermonuclear target placed in the reactor with the rapid solid body. Then there is no need to create for the thermonuclear fuel a nonmassive and durable shell. However, this approach requires additional capacities. During the manufacture of the macroparticle with the fusion mixture the issue is in the need to make a case for it. It must be very strong and light-weighted. The greater length of the accelerator, the smaller mass of the substrate can be. So the accelerator in a few km may be more acceptable than the comparatively small one. Thus, for the progress in creating a fusion power station it is necessary to improve the technologies of the creation of the structures with alternating very thin superconducting films with non-superconducting layers, to form for the substrates manufacturable tech-duty solid insulating materials. In these areas may be seen more progress if the nanotechnologies could be considered as one of the methods to solve applied issues, but did not develop on their own, what often happens.

The need for fusion power has not become less than half a century ago. For this reason, it is advisable to look at the issue with fresh eyes. It is always good to think carefully on the issue in general. For comparison of the proposed method of CS with other methods one can give an example. Resting on the experience of the works on laser CS (projects Shiva and Nova), in the U.S. in mid- 90s for providing of the thermonuclear explosion specialists started creating powerful Nd-lasers for the National Ignition plant (Project NIF) [2]. According to the calculations it was expected that at full efficiency in % shares in a single pulse mode the gains will be achieved with respect to the laser energy equal to 5-7. The output energy of the laser pulse will be -1.8 MJ by sequential gain of the main oscillator in the 192 parallel channels. The project cost was estimated at about U.S. \$ 4 billion. Running at full power was expected in 2007-2008, but it was made in 2010 only. Almost 40 years since the beginning of the works it was carried out a thermonuclear flash, but to a practical energy production is still very far away. This example illustrates the complexity of the creation of the fusion power station. The reader himself is able to assess the practicability of solving the thermonuclear issue along the way set out in the present paper or the continuation of the movement in the old direction.\*

*The author thanks A.Korenev, A.Startsev, G.Tsoy without the help of whom the appearance of this work would be difficult, as well as V.Makuha, M.Prilutskay and early dead S.I.Chikichev (1951 – 2010).*

\*The power plant with a capacity of 1 GW produces electricity and heat for approximately \$ billion per annum. At the term of its payback in 10 years, not taking into account the operating costs, the cost of the power plant should not exceed about \$10 billion. Estimated cost of the reactor based on inertial confinement fusion capacity of 1GW is about \$1 billion. This is much less than the projected cost of the laser or ion driver [1]. In the instant case the cost of the plant is basically the price of the reactor and of the accelerator of macroparticles. At a length of 1 km could cost about 300 million US-dollars. Then, in the future it would be referred to a fusion plant costing \$ 1 – 3 billion.

#### Literature