

## Передача энергии на большие расстояния с помощью электронных пучков

© М.А. Кумахов

Институт рентгеновской оптики,  
143005 Одинцово, Московская область, Россия  
email: mkumakhov@mail.ru

(Поступило в Редакцию 13 декабря 2013 г.)

Для передачи энергии на большие расстояния предложено использовать обнаруженный недавно нашей группой эффект многократного бесконтактного прохождения электронов в наэлектризованном кольце. В экспериментах на кольце электроны проходят огромные расстояния  $\geq 10^7$  km. Проведен анализ потерь электронов из-за излучения и из-за потерь на остаточном газе. Показано, что эти потери существенно меньше  $10^{-4}\%$  на расстоянии  $\geq 10^4$  km. Анализ сделан с учетом сложного профиля трассы. Сделана оценка электрической мощности, которую можно пропускать по такому каналу. Эта мощность больше  $10^{13}$  W при диаметре канала в несколько миллиметров. Если каналы сделать в виде соленоида или тороида, то возникающие большие магнитные поля можно использовать для разных приложений, в том числе для магнитного удержания плазмы.

### Введение

Техника традиционных средств транспортировки энергии на большие расстояния достигла весьма высокого уровня. Тем не менее потери на линиях электропередач еще большие. Например, в России они равны 7–8%, согласно данным, которые приводятся в [1].

Одним из важнейших путей решения этой важной проблемы современной энергетики является использование в будущем сверхпроводящих материалов [2].

В 50-х г. прошлого столетия известный советский физик Г.Н. Будкер предложил использовать для этого сильноточные релятивистские электронные пучки. При этом предполагалось компенсировать кулоновское расталкивание электронов с помощью ионов [3].

Такой „стабилизированный“ пучок предполагалось поместить в металлическую топливную трубу.

Идея Будкера до недавнего времени вызывала серьезный интерес (см., например, [4,5]).

По оценке экспертов преобразование энергии жидкого или газообразного топлива в энергию электронного пучка с последующим его транспортированием может оказаться экономически более выгодным, чем транспортирование самого топлива к месту потребления с последующим получением электроэнергии [6].

К сожалению, идея Г.Н. Будкера оказалась не реализуемой из-за неустойчивостей, возникающих в таком пучке [5].

В настоящей работе также предлагается использование электронных пучков для передачи энергии на большие расстояния. Но идеология этой статьи не связана с идеей Г.Н. Будкера.

### Эксперименты по прохождению электронных пучков на сверхдальние расстояния

В настоящей работе для решения проблемы передачи энергии на большие расстояния предлагается новый подход, который основан на недавно обнаруженном новом физическом эффекте [7,8]. В работе [7] был предложен и обоснован новый механизм бесконтактного поворота заряженных части (электронов, ионов) в полой трубе с наэлектризованными стенками. Эксперименты [8] подтвердили этот эффект.

При достаточно хорошем вакууме  $\sim 10^{-8}$ – $10^{-9}$  Pa пучки электронов с энергией  $\sim 20$ – $40$  keV удерживаются в трубе с радиусом  $\sim 10$ – $20$  cm в течение 5–10 min. Диаметр полого канала примерно несколько миллиметров.

При этом электроны проходят огромные расстояния.

Например, электрон с энергией 100 eV (скорость  $1.64 \cdot 10^{10}$  cm/s) за 100 s проходит путь  $\sim 1.64 \cdot 10^7$  km, что превышает длину экватора ( $\sim 40\,000$  km) более чем в 400 раз.

Путь длиной  $10^3$ – $10^4$  km электрон проходит за  $10^{-2}$ – $10^{-1}$  s.

### Потери энергии электронов

Потери энергии электронов могут быть обусловлены ионизационными потерями на остаточном газе, поэтому важен высокий вакуум. По нашим данным электроны с энергией  $\sim 100$  keV проходят расстояния в  $10^4$  km при вакууме  $10^{-9}$  Pa без потерь.

Возможно, это связано с тем, что первые порции электронов ионизируют остаточный газ. При этом положительные ионы сразу садятся на отрицательно заряжен-

ную стенку, т.е. происходит своеобразное „очистление“ канала.

Второй механизм потерь энергии электронов связан с их излучением при поворотах пучков, так как электронный пучок должен повторять профиль трассы.

При повороте электрона на радиус  $R$  мощность излучения  $W$  равна [9]

$$W(\text{eV/s}) = \frac{2}{3} \frac{e^2 \beta^4 c}{R}, \quad (1)$$

где  $\beta = v/c$ ,  $v$  — скорость электрона,  $c$  — скорость света,  $e$  — заряд электрона.

Для электронов с энергией 100 keV и радиусом  $R = 100 \text{ cm}$

$$W = 2.52 \cdot 10^{-2} \text{ eV/s}. \quad (2)$$

Если предположить, что на длине  $10^4 \text{ km}$  имеем один миллион поворотов с радиусом  $R = 10^2 \text{ cm}$  и длиной каждого поворота  $\approx 3 \cdot 10^2 \text{ cm}$ , то получим, что электрон теряет на всех этих поворотах  $9.2 \cdot 10^{-3} \text{ eV}$ . Таким образом, доля потерь энергии  $\eta$  равна

$$\eta = \frac{9.2 \cdot 10^{-3} \text{ eV}}{10^5 \text{ eV}} = 9.2 \cdot 10^{-8}. \quad (3)$$

Эта доля меньше одной миллионной от энергии электрона. Таким образом, этими потерями можно пренебречь.

## Мощность электронного пучка, которую пропускает канал

Предполагаем, что транспортный канал для электронного пучка представляет собой вакуумный канал с диаметром несколько миллиметров, окруженный наэлектризованной диэлектрической стенкой, толщиной в несколько миллиметров. Электризация делается с помощью внешнего поля, которое индуцирует заряд на поверхности внутренней стенки. При этом на поверхность внешней стенки наносится (или напыляется) тонкая металлическая пленка. Все это помещается в трубу с необходимыми техническими параметрами (жесткость, устойчивость к влаге, температурным перепадам и т.д.).

Объем канала длиной  $10^4 \text{ km}$  и диаметром, например, 2 mm равен  $\sim 30 \text{ m}^3$ .

Для современной вакуумной техники не составляет труда получение высокого вакуума в таком объеме.

Важным с точки зрения приложений является вопрос: какую мощность электронного пучка можно транспортировать по такому каналу.

Плотность электронного пучка  $n(\text{cm}^{-3})$  в канале с радиусом 1 cm можно оценить по формуле [7]

$$n = \frac{1}{4} \left( \frac{2U_b}{e^2 l} \right)^{3/2}, \quad (4)$$

где  $U_b$  — потенциальный барьер стенки (в eV),  $e$  — заряд электрона. При типичном значении  $U_b = 10^5 \text{ eV}$  и  $l = 10^{-1} \text{ cm}$  получаем  $n \approx 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ .

Канал длиной  $10^4 \text{ km}$  электрон с энергией 100 keV проходит за время  $\Delta t = 6.1 \cdot 10^{-2} \text{ s}$ . При этом за 1 s по такому каналу можно пропустить  $\approx 5 \cdot 10^{27}$  электронов. Учитывая, что энергия одного электрона равна  $10^5 \text{ eV}$ , получаем, что мощность  $W$  электронного пучка, которую теоретически можно пропустить по такому каналу, равна  $W = 5 \cdot 10^{27} \cdot 10^5 = 5 \cdot 10^{32} \text{ eV/s}$ , т.е. мощность равна  $\approx 8.3 \cdot 10^{13} \text{ W}$ . Таким образом, по каналу можно за 1 s пропустить энергию, равную  $8.3 \cdot 10^{13} \text{ J}$ . Если принять, что в среднем 1 атомный реактор вырабатывает  $10^9 \text{ J/s}$  (на самом деле эта энергия несколько меньше), то получается, что транспортируемая за 1 s энергия существенно превышает энергию, которую вырабатывали бы  $10^4$  атомных реакторов за то же время.

## Сравнение со сверхпроводящими системами

Сверхпроводники при низких температурах проводят высокие токи. Например, материал NbTi при температуре 4.2 K проводит  $(3-8) \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$  [10]. Предлагаемая нами система может проводить ток  $\approx 8 \cdot 10^5 \text{ kA/3mm}^2$ , т.е. на многие порядки больше, чем сверхпроводники. Очевидно, что предлагаемая система также на порядки дешевле. Магнитные поля, создаваемые в тороидальных катушках для удержания плазмы, пропорциональны току, текущему по катушке. То же самое справедливо и для магнитных полей в соленоидах. Поэтому использование предлагаемой технологии в будущем вместо сверхпроводников может оказаться перспективным.

Этот вопрос необходимо исследовать экспериментально.

## Некоторые другие возможности

Укажем кратко на некоторые другие применения.

Предлагаемая транспортная система электронных пучков может использоваться как для постоянных, так и переменных по времени пучков. В настоящее время существует множество возможностей как для получения постоянных, так и переменных импульсных пучков электронов.

При этом есть как небольшие, так и мощные источники электронов.

Например [11], существуют импульсные электронные пучки с запасаемой энергией в несколько сотен килоджоулей с длительностью импульса  $< 1 \text{ ns}$  и с энергией электронного пучка до 10 MeV.

Имеются плазменные источники электронов значительно большей мощности [12].

В предлагаемую транспортную систему можно включить как в начале, так и в любом другом месте не один, а множество источников электронов.

Кроме того, из транспортной системы в любом месте можно выводить как один пучок, так и множество пучков.

В связи с возможностью получения больших токов вокруг проводящего контура будет возникать большое магнитное поле. Эти поля, как указывалось, возможно использовать для множества применений, в том числе для создания магнитно-резонансных томографов.

## Заключение

Предлагаемая система передачи энергии с помощью электронных пучков основана на экспериментах [8], где наблюдалось в вакууме на уровне  $10^8$  Pa прохождение электронов на расстояния  $> 10^7$  km.

В настоящее время существует большое число газопроводов и нефтепроводов. Они имеют большое сечение, так что легко в них можно уместить предлагаемую транспортную систему. Для использования системы в космосе электронный пучок необходимо нейтрализовать ионами. Так как в космосе высокий вакуум, систему можно использовать для накопления и аккумуляции энергии.

## Список литературы

- [1] Интервью с Ю.Г. Шакарян, научным руководителем ОАО „НТУ ФСК ЕЭС“. // В мире науки. № 6. 2013. С. 104–107.
- [2] Кенфильд П., Будько С. // В мире науки. 2005. № 7. С. 59–65.
- [3] Будкер Г.Н. Атомная энергия. 1956.Т. 1.
- [4] Алфёров Ж., Велихов Е. Энергия без границ. Россия в глобальной политике. № 1, январь–март. 2003.
- [5] Рудаков Л.Н. // Соросовский образовательный журн. 1996. № 2.
- [6] Велихов Е. Мост Россия–Азия. Лукойл-пресс, сентябрь 1999.
- [7] Кумахов М.А. Пат. РФ № 2011122945. 08.06.2011. РСТ/RU2012, Wo 2012/169932A2/.
- [8] Кумахов М.А., Тегаев Р.И. // ЖТФ. 2013. Т. 83. Вып. № 6. С. 147–150.
- [9] Соколов А.А., Тернов И.М. Релятивистский электрон. М.: Наука, 1974.
- [10] <http://ru.wikipedia.org>.
- [11] Вавилов С.П. Импульсная рентгеновская техника. М.: Энергия, 1981.
- [12] Рухадзе А.А. и др. Физика сильноточных релятивистских электронных пучков. М.: Атомиздат, 1980.