

## Полный анализ и варианты конструкций для ЕНД-трастеров с насыщенным током короны

Категория: Ионокraftы и лифтеры

Ксавиер Борг, инж.

Опубликовано 01.01.2004 – обновлено 01.01.2006

© Лаборатория исследования пламени

[www.blazelabs.com](http://www.blazelabs.com)

Данная статья посвящена теоретическому анализу одноступенчатых многокоронных ЕНД-трастеров и разработке для них конкретных инженерных решений.

ЕНД-трастер (электродинамический аппарат) – устройство с тягой, даваемой ионным потоком, которое работает без движущихся частей, используя только электрическую энергию. Принцип ионной воздушной тяги с заряженными частицами, генерируемыми коронным разрядом, известен с самых ранних дней открытия электричества, ссылки в книге «Физико-механические эксперименты с разными предметами» Фрэнсиса Хоксби отсылают к 1709 г. Первая публично продемонстрированная модель летательного аппарата на этом принципе была разработана майором Де Северским (De Seversky) в виде «ионокraftа» (ionocraft) – одноступенчатого ЕНД-трастера, в котором устройство, продувая воздух вниз, поднимает себя согласно третьему закону Ньютона. Де Северский внес вклад, прежде всего, в физические основы этого устройства и его конструкционные изменения в течение 1960 г. Он запатентовал своё устройство (US Patent 3 130 945, 28 апр. 1964) и продемонстрировал рабочую модель, способную к поднятию собственного веса, исключая источник электропитания. В ходе нашего исследования и использования описанных в этой статье расчётов мы смогли спроектировать очень эффективные одноступенчатые ЕНД-трастеры, которые дают тягу, достаточную не только для поднятия собственного веса, но и для подъёма дополнительной полезной нагрузки, превышающей их собственный вес. Например, шестиугольный мультикоронный трастер, описанный в <http://www.blazelabs.com/exp14.asp>, имеет вес конструкции всего 85 граммов, а создает усилие до 200 граммов.

В данном методе создания тяги используются только электрические поля. В базовом варианте устройство состоит из двух параллельных проводящих электродов, одного – в виде тонкой проволоки, обычно называемой «коронирующий провод», другого – в виде проволочной сетки, трубок или «юбок» из фольги с гладкой круглой поверхностью, называемого «коллектором». Когда такая штука запитывается высоким напряжением в пределах нескольких киловольт, она производит тягу. Ионокraft является частью семейства ЕНД-трастеров – частным случаем, когда стадии ионизации газа и ускорения ионов объединены в единую стадию.

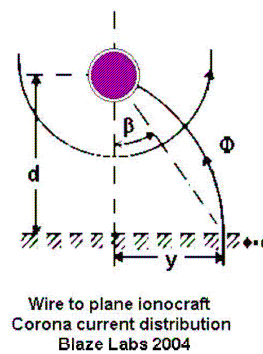
Цель статьи состоит в том, чтобы дать математические инструменты, позволяющие проектировать трастеры данного вида и предсказывать их основные электрические и механические свойства. Кроме этого представлено математическое решение задачи определения наилучшего интервала между соседними ячейками трастера. Полученные уравнения могут также использоваться при разработке других ЕНД-устройств, например, для расчёта коэффициента потока воздуха (CFD) в ЕНД-кулерах, которые могут использоваться как бесшумная альтернатива для охлаждения электронных устройств, или для вычисления давления воздуха, производимого ЕНД-громкоговорителями.

### Математический анализ

Поток зарядов рассматривается упрощенно как совокупность движений униполярных ионов, дрейфующих в ионном облаке с подвижностью  $m$  и с незначительными эффектами диффузии. Напряжение  $V$  приложено между коронирующим проводом и сеткой коллектора. Корона – разряд с нетепловой ионизацией.

На рисунке верхний проводник – коронирующая проволока (не в масштабе),  $d$  – вертикальный воздушный промежуток между проводником и плоскостью сетки, а  $y$  – эффективное поперечное расстояние, на которое облако распространяется при его движении к коллектору. Угол  $\beta$  называют углом расхождения, это мера

расхождения ионного облака в результате его взаимодействия с нейтральными воздушными молекулами и пространственным ионным зарядом.



### Проволока и плоский коллектор ионорафта. Распределение тока короны.

Можно предполагать, что всё перемещение заряда через воздушный промежуток осуществляют заряженные частицы, имеющие ту же самую полярность, что и корона, это описано подробно в <http://blazelabs.com/l-intro.asp>. Линии ионного потока совпадают с линиями электрического поля, но распределение электрического поля существенно зависит от пространственного ионного заряда. При высоких токах (токах насыщенности короны) распределение тока  $j(\beta)$  по коллектору имеет форму модифицированного Лапласиана, найденную ранее Варбургом (Warburg) в 1899, близкую к так называемому  $\cos^5$  распределению Варбурга, даваемому формулой:

$$j(\beta) = j_0 \cos^m(\beta), \text{ где } m = 4.82 \text{ для положительной короны и } m = 4.65 \text{ для отрицательных ионорафтов}$$

Если нарисовать распределение Варбурга, то сразу видно, что для диапазона углов от  $60^\circ$  до  $65^\circ$  плотность тока резко падает от 4% до 1%, так что линии поля не действуют на ионное облако далее, чем точка  $y$ , в которой  $\beta \geq 65^\circ$ . Из-за маленького различия в  $m$  для различных полярностей угол  $\beta$  для точек положительного ионного облака, где достигается этот порог, лишь на один градус меньше, то есть составляет  $64^\circ$ .

Это первое правило ясно указывает, что реализация сеток коллектора, размер которых превышает «в профиль»  $2d \cdot \text{tg}(\beta)$ , не будет иметь никакого благоприятного воздействия на результирующую тягу и даст только дополнительный «мертвый» вес. Зная  $\beta$ , мы можем теперь удобно выразить  $y$ , половину ширины ионного облака, в терминах высоты  $d$  провода над плоскостью коллектора, поскольку

$$K \text{tg}(\beta) = y/d \quad (1)$$

$$K \text{tg}(65^\circ) = y/d$$

$$y = 2.1 Kd - \text{половина ширины распространения для отрицательной коронирующей проволоки} \quad (2)$$

$$K \text{tg}(64^\circ) = y/d$$

$$y = 2 Kd - \text{половина ширины распространения для положительной коронирующей проволоки} \quad (3)$$

$K$  – коэффициент, зависящий от фактической геометрии электродов (см. приложение).

### Сечение эффективного ионного облака

Итак, эффективная площадь сечения отрицательного или положительного ионного облака на сетке, отнесённая на элемент длины  $l$ , такова:

$$A_n = 2 y l = 4.2 K d l \text{ для отрицательной короны} \quad (4)$$

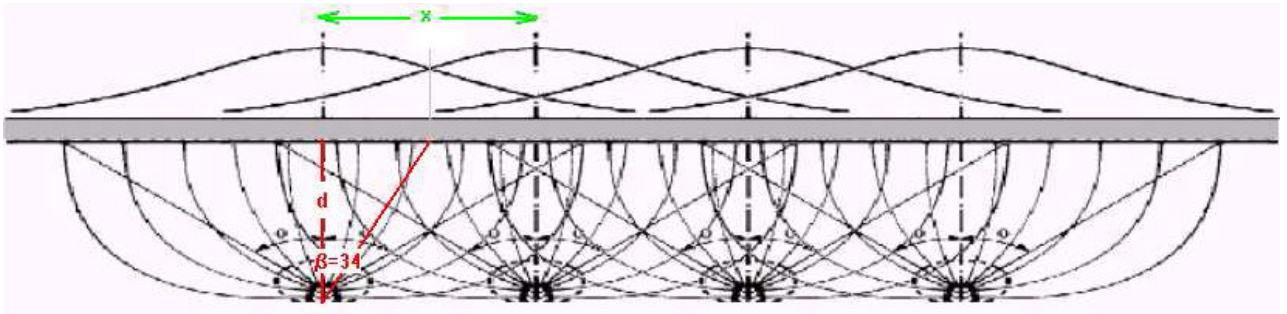
$$A_p = 2 y l = 4 K d l \text{ для положительной короны} \quad (5)$$

Таким образом, эффективная площадь независима от фактической боковой ширины сетки, если ширина  $2y \geq 4.2Kd$  или  $2y \geq 4Kd$  соответственно.

### Закон Ксавьера для интервала в мультикоронном элементе

Есть некое минимальное расстояние  $x$  между источниками короны (остриями или проволоками), такое, что при дальнейшем уменьшении расстояния эффективная сила этих 2-х источников начинает становиться меньше, чем удвоенная сила единственного источника. Для очень близких источников эффективная сила будет той же,

что и для одного источника, и они будут фактически вести себя как одно острие или проволока. В работах других исследователей в данной области это минимальное расстояние получается из экспериментов. Однако данное явление несложно проанализировать теоретически, дав точное предсказание этого расстояния для различных градиентов напряжения и конфигураций. Причина отмеченного «дефицита тока» в том, что плотность тока на любом острие в облаке не может превысить предел – ток насыщения  $j_0$ . В идеале, при множественных параллельных источниках, если никакие ионы не потеряны в среде, то коллектор должен получать постоянную плотность тока  $j_0$  на всем протяжении его поверхности. На диаграмме добавлены кривые плотности тока в коллекторе от каждого провода короны. Полная плотность тока в каждом положении на коллекторе без эффекта насыщения была бы суммой всех кривых. Поскольку, как видно из рисунка, область наименьшей плотности тока всегда в середине между эмитентами, там коллектор должен получать в идеале  $\frac{1}{2} j_0$  от каждого источника. Решая уравнение  $\cos^{4.82}(\beta) = 0.5$ , получаем  $\beta = 30^\circ$ . Таким образом, оптимальное расстояние между 2-мя элементами –  $x = 2y = 2Kd \operatorname{tg}(30^\circ) = 1.15 d$ . Это применимо ко всем парам точек плоскости, и также к парам проводов относительно плоскости коллектора.



Для 4-х параллельных элементов рассмотрение становится немного более сложным, потому что крайние элементы добавляют в середину коллектора ещё пару компонентов – под углами  $(\operatorname{tg}^{-1}[3y] / \operatorname{tg}^{-1}[1y]) * \beta = 1.59\beta$

$$j_{\max} = j_0 (2\cos^{4.82}(\beta) + 2\cos^{4.82}(1.59\beta)) \leq j_0, \text{ что дает } \beta \sim 34^\circ \text{ и интервал } x = 2 K d \operatorname{tg}(34^\circ) = 1.35 d \quad (6)$$

Для шести или большего количества параллельных элементов факторы  $\beta$  дадут углы большие, чем  $65^\circ$  и, таким образом, фактически не будут иметь никакого эффекта. Следовательно,  $x = 1.35 d$  можно считать максимальным расстоянием и для больших количеств параллельных элементов. Если проводники установлены теснее, чем это значение, то плотность тока короны в проволоке уменьшается так, что ни в какой точке плотность тока не будет превышать ток насыщения  $j_0$ , что был бы для единственного провода. В пределе, при  $x = 0$ , ток насыщения поделится на части по числу проводников, так что они будут действовать как единственный провод.



Лифтер с параллельными коронирующими проводами, разнесёнными на  $1.3d$

Оценки для максимального давления, силы, потока воздуха, воздушной скорости и тока насыщения короны

Поток ионов движется через воздушный промежуток электрическим полем, это движение нарушается столкновениями и трением с нейтральными молекулами газа. Ускорение иона в проволоке относительно сетки незначительно, так что вся энергия электрического поля, в конечном счете, передаётся нейтральным молекулам. Мы можем таким образом объединить силу  $qE$  по всем линиям поля и взять эффективную силу, спроектированную на перпендикуляр к плоскости сетки. Эта задача была решена Сигмондом (Sigmond) и другими, при этом полная сила, даваемая током короны  $i$  для величины промежутка  $d$  такова:

$$F = i d / \mu ,$$

где  $F$  - сила в ньютонах,  $i$  поток в амперах,  $d$  – воздушный промежуток в метрах,  $\mu$  – подвижность иона в воздухе

Этот результат означает, что вертикальный компонент силы независим от фактической траектории иона и электрического поля.

Мы снова имеем небольшое различие между отрицательными и положительными ионами из-за небольшого различия в подвижности для различных полярностей,  $\mu_n = 2.7 \text{ E-4 м}^2/\text{Вс}$  и  $\mu_p = 2.0 \text{ E-4 м}^2/\text{Вс}$ , таким образом, мы имеем:

$$\text{Скорость в ионном облаке } v_{\text{ион}} = \mu E, \text{ это приводит к скоростям в ионном облаке } >100 \text{ м/с} \quad (7)$$

$$F = i d / 2.7 \text{ E-4 для отрицательной короны} \quad (8)$$

$$F = i d / 2.0 \text{ E-4 для положительной короны} \quad (9)$$

Эта сила равна коэффициенту передачи импульса от быстрых ионов облака к почти неподвижным нейтральным молекулам воздуха и может использоваться, чтобы вычислить газовый поток и скорость в более низкой стороне сетки. Если предполагать, что воздушный поток свободно протекает сквозь сетку коллектора в эффективной области  $A$  со средним воздушным потоком  $S$  и скоростью  $v$  (м/с), то мы имеем:

$$S = vA$$

$$F = i d / \mu = \rho S v = \rho S^2 / A, \text{ где } \rho - \text{плотность воздуха в кг/м}^3, S - \text{расход воздуха в литр/с}$$

$$S = (i A d / \mu \rho)^{1/2} \quad (10a)$$

$$S \text{ [CFM]} = 2.12 * (i A d / \mu \rho)^{1/2} \quad (10b)$$

(S [CFM] – расход воздуха в кубических футах в минуту)

$$v = S / A = (i d / \mu \rho A)^{1/2} \quad (11)$$

Итак, полное максимальное давление, действующее по активной области сетки (при заданных размерах длина  $l$ , ширина  $2y$ ), таково:

$$P = F / A$$

$$P = i d / (A \mu)$$

$$P = i d / (2y l \mu).$$

Записывая  $y$  в терминах  $d$  как  $y = 2.1Kd$  или  $y = 2Kd$ , мы имеем для соответствующих полярностей короны:

$$P_{\text{max}} = i d / (4.2 K d l \mu) = i / (4.2 K \mu l) = j / (4.2 K \mu) \text{ для отрицательных корон} \quad (12)$$

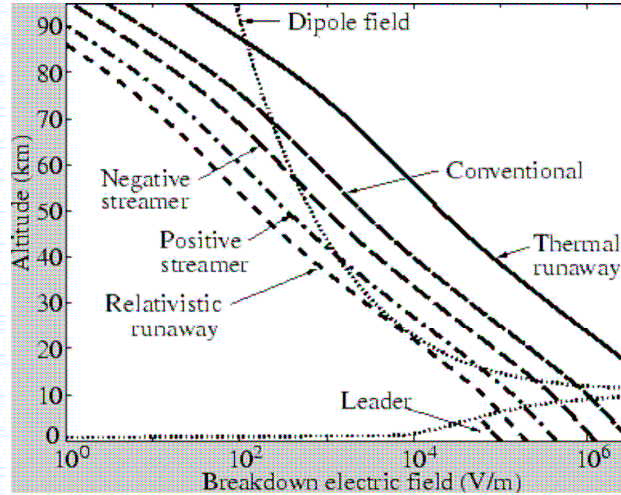
$$P_{\text{max}} = i d / (4 K d l \mu) = i / (4 K \mu l) = j / (4 K \mu) \text{ для положительных корон} \quad (13)$$

Это показывает, что произведенное давление не зависит от длины  $l$ , но зависит только от плотности тока насыщения  $j$  и коэффициента геометрии электрода Борга-Сигмонда (Borg-Sigmond)  $K$ .

Далее, градиент давления равен кулоновой силе, действующей на каждый ион. Из закона Гаусса мы имеем  $\partial p / \partial z = \epsilon_0 * E * (\partial E / \partial z)$ , где  $E$  изменяется от нуля до напряжения пробоя промежутка. Интегрирование даёт для увеличения полного давления значение

$$\Delta P_{\text{max}} = 1/2 \epsilon_0 E_{\text{max}}^2 \text{ или } 1/2 \epsilon_0 (V/d)^2 \quad (14)$$

Пробой в ионизированном воздушном промежутке происходит за счёт совсем другого механизма, чем обычная электронная лавина, а именно, «стримерами» короны. «Стримеры» – это волны ионизации, которые могут распространяться как узкие каналы сквозь области, где электрическое поле меньше, чем обычное напряжение пробоя для воздуха (30 кВ/см). На рисунке видно, что обычное напряжение лавинного пробоя на уровне моря – приблизительно  $3E6$  В/м, как показал Таунсенд (Townsend), но если в дело вступают стримеры короны, оно падает до  $1.1E6$  В/м для отрицательной короны или еще ниже – до  $0.6E6$  В/м – для положительной. Это самораспространение, насколько мы знаем, происходит благодаря крайне неоднородным электрическим полям, которые появляются из-за значительного градиента плотности тока или пространственного заряда.



Связь высоты (в км) и электрического поля пробоя (в В/м)

Заметим что снова имеется различие между напряжением пробоя стримера ( $V/d$ ) для отрицательных и положительных корон –  $E_n \sim -11$  кВ/см ( $-1.1E6$  В/м) и  $E_p \sim +6$  кВ/см ( $+0.6E6$  В/м). Однако это среднее напряжение пробоя изменяется с давлением, температурой, влажностью, вертикальной и боковой скоростью ветра. Поэтому рекомендуется использовать значения реального параметра пробоя  $V/d$ , полученные экспериментально.

Теперь мы можем приравнять вышеупомянутые уравнения давления:

$$P_{\max} = j_{\max} / (4.2 K\mu) = \frac{1}{2} * \epsilon_0 E_n^2 \text{ для отрицательных корон} \quad (15)$$

$$P_{\max} = j_{\max} / (4 K\mu) = \frac{1}{2} * \epsilon_0 E_p^2 \text{ для положительных корон} \quad (16)$$

Таким образом, для тока насыщения короны на единицу длины (на метр)  $j_{\max}$  в каждом из случаев имеем:

$$j_{\max} = 2.1 * K \mu \epsilon_0 E_n^2 \text{ для отрицательных корон } E_n = -V/d \quad (17)$$

$$j_{\max} = 2 * K \mu \epsilon_0 E_p^2 \text{ для положительных корон } E_p = +V/d \quad (18)$$

Это показывает, что существует верхний предел для плотности тока, независимый от фактического размера ионокraftа, определяемый условиями тока насыщения короны. То же самое касается создаваемого давления.

$$\text{Полное потребление тока: } i_{\max} = j_{\max} * l \quad (19)$$

$$\text{Полный расход энергии: } P = i_{\max} * V \quad (20a)$$

$$\text{Это также дает: } P = F_{\max} * v_{\text{ion}} \quad (20b)$$

Заменяя  $j_{\max}$  в  $F = i d / \mu = j l d / \mu$ , мы приходим к тому, что

$$F_{\max} = 2.1 K \epsilon_0 V^2 * (l/d) \text{ для отрицательных корон} \quad (21)$$

$$F_{\max} = 2 K \epsilon_0 V^2 * (l/d) \text{ для положительных корон} \quad (22)$$

$$\text{Тяга в грамм-силах: } T = (1000 / 9.8) * F_{\max} \quad (23)$$

Используя уравнения (23) и (20a), принимая  $g = 9.8$  м/с<sup>2</sup>, имеем для отношения тяги к мощности в Г-с/Ватт:

$$T/P = (1000 / 9.8) * F_{\max} / (V * i_{\max}) = 102 / (\mu E), \text{ где } E = E_p \text{ или } E_n \text{ в зависимости от полярности} \quad (24)$$

Эффективность машины = Выход механической энергии / Вход электрической энергии, имея в виду увеличение трастером скорости воздуха:

$$\% \text{ конверсионной эффективности} = 100 * F_{\max} * v / (i_{\max} * V) \quad (25)$$

$$\text{Действие } F_{\max} \text{ на единицу длины} = 2.1 K \epsilon_0 V^2 / d \text{ для отрицательных корон} \quad (26)$$

$$\text{Действие } F_{\max} \text{ на единицу длины} = 2 K \epsilon_0 V^2 * / d \text{ для положительных корон} \quad (27)$$

$$\text{Эффективность вентилятора (CFM/Ватт)} = S [\text{CFM}] / P \quad (28)$$

### Практически отработанные оценки для ионокрафта

Рассмотрим ионокрафт с рабочим напряжением в +40 кВ (полярность короны – положительная), построенный из 10 параллельных элементов по 20 см каждый.

Как мы знаем, для достижения максимальной тяги при напряжении  $E_p \sim +0.6$  МВ/м (см. краткую ссылку ниже) величина промежутка  $d$  должна быть 40 кВ / (6 кВ/см) = 6.7 см или 0.067 м.

Суммарная длина элементов:  $10 * 0.2 \text{ м} = 2 \text{ м}$ .

Уравн. (3) Ширина распространения ионов:  $y = 2 * K * d = 2 * 1 * d = 13.3 \text{ см}$  или 0.133 м.

Уравн. (5) Область ионного облака, достигающая сетки:  $A_p = 2 * y * l = 2 * 0.133 * 2 = 0.53 \text{ м}^2$ .

Уравн. (6) Расстояние между параллельными элементами короны:  $x = 1.3 \rho d = 1.3 * 0.067 = 0.087 \text{ м}$  или 8.7 см.

Уравн. (7): Скорость ионного облака:  $v_{\text{ион}} = \mu E = 2E-4 * 0.6E6 = 120 \text{ м/с}$ .

Уравн. (18): Удельный ток насыщения короны:  $j_{\max} = 2 \mu \epsilon_0 E_p^2 = 2 * 2E-4 * 8.8542E-12 * 0.6E6^2 = 1.28 \text{ мА/м}$  или 12.8 мкА/см.

Уравн. (19): Потребление тока для полной длины:  $i = j * l = 1.28 * 2 = 2.55 \text{ мА}$ .

Уравн. (10a): Расход воздушного потока:  $S = (i d / \mu \rho)^{1/2} = (2.55E-3 * 0.53 * 0.067 / (2E-4 * 1.2))^{1/2} = 0.61 \text{ литр/с}$ .

Уравн. (10b): Расход воздушного потока:  $0.61 * 2.1186 = 1.29 \text{ CFM}$ .

Уравн. (11): Скорость воздуха:  $v = S/A = (i d / \mu \rho A)^{1/2} = (2.55E-3 * 0.067 / (2E-4 * 1.2 * 0.53))^{1/2} = 1.15 \text{ м/с}$ .

Уравн. (22): Максимальная тяга:  $F_{\max} = 2\epsilon_0 V^2 * (1/d) = 2 * 8.8542E-12 * 40E3^2 * (2/0.067) = 0.85 \text{ Н/м} = 87.2 \text{ грамм-сил}$ .

Уравн. (16): Максимальное давление:  $P_{\max} = j / (4 \mu) = 1.28E-3 / (4 * 2E-4) = 1.6 \text{ Па}$ , иначе  $P_{\max} = 1/2 \epsilon_0 E_{\max}^2 = 1.6 \text{ Па}$  (или  $P_{\max} = F_{\max}/A_p = 1.6 \text{ Па}$ ).

Уравн. (20a/b): Полный расход энергии =  $i * V = 2.55 \text{ мА} * 40 \text{ кВ} = 102 \text{ Вт}$  (иначе  $F_{\max} * v_{\text{ион}} = 0.85 * [\text{от } 120 \text{ до } 102] \text{ Вт}$ ).

Уравн. (24): Отношение тяги к мощности:  $T/P = 102 / (\mu E_p) = 102 / (2E-4 * 0.6E6) = 0.85 \text{ г/Вт}$ .

Уравн. (25): Конверсионная эффективность:  $100 * F_{\max} * v / (i V) = 100 * 0.85 * 1.15 / 102 = 0.96 \%$  (или  $100 * v/v_{\text{ион}} = 100 * 1.15 / 120 = 0.96 \%$ ).

Уравн. (28): Эффективность вентилятора:  $S [\text{CFM}] / P = 1.29 / 102 = 0.013 \text{ CFM/Вт}$ .

Таким образом, по расчётам этот ионокрафт даёт тягу в 87.2 грамм-сил, и работает при 2.55 мА, потребляя 102 Вт.

Лифтер с такими размерами даёт тягу в 43.6 грамм-сил, и работает при 1.28 мА, потребляя 51 Вт.

Этот ионокрафт можно использовать и как скоростное ЕНД судно (hovercraft) или как ЕНД громкоговоритель, производящий полное давление 1.59 Па.

Как вентилятор это устройство имеет производительность 1.29 CFM, достигая эффективности 0.013 CFM/Вт.

В качестве воздушного насоса это устройство прокачивает 2210 литров воздуха в час

## Быстрые ссылки

$$\mu_n = 2.7 \text{ E-4 м}^2/\text{Вс}, \mu_p = 2.0 \text{ E-4 м}^2/\text{Вс}$$

$$E_n \sim -11 \text{ кВ/см или } -1.1\text{E6 В/м}, E_p \sim +6 \text{ кВ/см или } +0.6\text{E6 В/м}$$

Распределение Варбурга (Warburg) для потока:  $j(\beta) = j(0) \cos_m(\beta)$

$m = 4.82$  для положительной короны,  $m = 4.65$  для отрицательной короны

Экспериментальный угол расхождения  $\beta = 65^\circ$  для ионокрафтов с отрицательной короной,  $\beta = 64^\circ$  для ионокрафтов с положительной короной

$K$  – динамический геометрический коэффициент Борга-Сигмонда (Borg-Sigmond) (R.Sigmond использует фиксированную константу  $K$  для острия относительно коллектора плоской геометрии),  $K=1.125$  для планарной геометрии,  $K=1$  для многопроводных ионокрафтов,  $K=0.5$  для лифтеров

$$\varepsilon_0 = 8.8542\text{E-12 Ф/м}$$

$$\text{Плотность воздуха } \rho = 1.2 \text{ кг/м}^3$$

$$g = 9.8 \text{ м/с}^2$$

---

Английский оригинал статьи: <http://www.wbabin.net/physics/borg1.pdf>. Перевод на русский язык – В.Прохоров.

По теме:

Xavier Borg. “Home of the highest performance EHD thruster cells” (<http://www.blazelabs.com/l-intro.asp>),

Xavier Borg. “Lifters in vacuum & why they DO NOT work” (<http://www.blazelabs.com/l-vacuum.asp>).