

# Электроаэродинамическая тяга — Питанная Максвеллом и Кулонам

Инсайты, представленные в этом эссе, основаны на десятках экспериментов, проведенных автором в период с 2016 по 2018 год, исследуя электроаэродинамическую тягу с использованием широкого спектра источников питания (переменный и постоянный ток), геометрий электродов и типов эмиттеров ионов. Эти исследования достигли кульминации в строительстве ротора диаметром 80 см, изображенного ниже, который достиг скорости вращения 18 об/мин при напряжении менее 6 кВ и всего около 100 мВт электрической входной мощности.

Эта экспериментальная кампания показала, что производительность зависит гораздо больше от распределения и геометрии электростатических полей, чем от движения воздуха или самого ионного тока. Наблюдения заложили основу для теоретической переформулировки электроаэродинамической тяги, которая следует ниже.

## Электроаэродинамическая тяга — Тихий двигатель

Электроаэродинамическая (EAD) тяга — часто называемая электроhydroдинамической (EHD) тягой или «ионным ветром» — одна из тех редких технологий, которые кажутся научной фантастикой: устройство, которое бесшумно движется через воздух без движущихся частей, без сгорания и без видимого выхлопа. Публика впервые услышала о ней в начале 2000-х через домашние проекты «лифтеров», и снова в 2018 году, когда MIT продемонстрировал «ионный самолет», скользящий через спортивный зал.

Однако основная физика имеет более длинную и сложную историю. Почти столетие назад Томас Таунсенд Браун и Пол Бифельд наблюдали, что высоковольтные конденсаторы могут генерировать малую, но устойчивую тягу. Браун приписал эффект «антигравитации». Современная наука, вооруженная законами Максвелла и Кулона, признает, что истина более тонка — и во многих отношениях глубже.

EAD-тяга не о том, чтобы дуть воздух ионами. Это о **лепке электрических полей** так, чтобы результирующие **электростатические напряжения** производили чистую механическую силу. В этом смысле устройства EAD питаются Максвеллом и Кулонам: геометрией и динамикой самого электрического поля.

## Заблуждение об ионном ветре

Спросите большинство инженеров о EHD-тяге, и вы услышите простую историю: острый эмиттер производит ионы через коронный разряд; эти ионы ускоряются к коллекторному электроду, сталкиваясь по пути с нейтральными молекулами воздуха и передавая им импульс. Нейтральный газ движется — так называемый «ионный ве-

тер» — и по третьему закону Ньютона устройство испытывает равную и противоположную тягу.

Эта картина не неверна, но неполна.

На практике ионы несут пренебрежимо малую массу. Их столкновения с нейтральными часты, да, но импульс, передаваемый на столкновение, крошечен. Важнее всего: **никакая значительная механическая сила не действует напрямую на кончик иглы или коллектор**. «Ветер» — побочный продукт, а не источник тяги.

Настоящий двигатель — в **электрическом поле**, которое ускоряет эти ионы — в перераспределении электростатической энергии по мере формирования и течения пространственного заряда.

## Давление поля и тензор напряжений Максвелла

Уравнения Максвелла описывают, как электрические поля хранят и передают импульс через **тензор напряжений Максвелла**:

$$\mathbf{T} = \epsilon_0(\mathbf{E}\mathbf{E} - \frac{1}{2}E^2\mathbf{I})$$

Интеграция этого тензора по поверхности любого тела дает чистое **электростатическое давление**, действующее на него. Это давление — а не движение воздуха — толкает EHD-двигатель вперед.

При коронном разряде вокруг эмиттера образуется облако ионов. Эти ионы выполняют две ключевые вещи:

1. **Они частично экранируют электрическое поле эмиттера.** Локальная сила поля падает у кончика, но остается сильной в окружающем объеме.
2. **Они искажают общую геометрию поля.** С одной стороны эмиттера линии поля заканчиваются на близких заряженных поверхностях или заземленных структурах. С другой — они простираются наружу, частично нейтрализованные пространственным зарядом.

Результат — **дисбаланс электростатического давления** на системе эмиттер-коллектор — чистая сила. Импульс течет от поля к электродам, а не через молекулярные столкновения.

## Закон Кулона в действии

На самом простом уровне задействованные силы описываются законом Кулона:

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}$$

Каждый заряженный элемент поверхности структуры EHD притягивает или отталкивает каждую другую заряженную область в своем окружении. Общая тяга — векторная сумма этих бесчисленных кулоновских взаимодействий, непрерывно перестраиваемая движущимися ионами, модулирующими поле.

В стационарной короне тонкая оболочка положительных ионов находится между высоковольтным эмиттером и относительно отрицательным коллектором (или окружающей средой). Эти ионы служат **посредниками**: они частично экранируют притяжение между эмиттером и коллектором и, двигаясь, непрерывно восстанавливают асимметрию поля. Постоянный электрический ввод поддерживает этот дисбаланс, преобразовывая электростатическую потенциальную энергию в механическую силу.

## Уроки от NASA и пределы парадигмы ионного ветра

В начале 2000-х NASA и ее подрядчики вернулись к устройствам типа Бифельд-Браун в рамках исследований Gravitec и Talley AIAA. Используя высоковольтные асимметричные конденсаторы в атмосферных и вакуумных средах, эксперименты предназначались для проверки, сохраняется ли эффект без воздуха.

Результаты были недвусмысленны — и непреднамеренно раскрывающие.

В атмосферном режиме роторы достигали едва измеримого вращения (1–2 об/мин) и тяги в диапазоне 10–100  $\mu\text{N}$  — порядки величины ниже ожидаемого, если бы устройства действительно использовали гравитационный эффект. Движение полностью приписывалось конвенционному коронному разряду и слабому ионному ветру.

В вакууме, при давлениях до  $10^{-6}$  Торр, движение полностью прекращалось. Любые переходные сигналы отслеживались до выгазирования или остаточного поверхностного заряда. Без молекул воздуха для поддержания ионизации электростатическое поле становилось симметричным, и сила исчезала.

Исследователи заключили, что тяга масштабируется примерно линейно с плотностью воздуха — вывод, часто цитируемый для «опровержения» EHD-тяги как невозможности в вакууме. Но то, что он действительно продемонстрировал, было глубже: **без среды для переноса пространственного заряда электрическое поле теряет асимметрию, производящую градиенты электростатического давления.**

Другими словами, эти ранние тесты случайно подтвердили **интерпретацию тензора напряжений Максвелла** электроаэродинамической тяги. Это не гравитация в действии, не просто ионное торможение — важна была наличие **заряд-медиированного дисбаланса поля.**

Устройства Gravitec, построенные для простоты и симметрии, лишены значительного *резервуара заряда* или *диэлектрика-формирователя поля*. Их открытые геометрии рассеивали линии поля в окружение, расточая большую часть электростатической энергии.

Напротив, описанный здесь ротор EPS-алюминий концентрировал заряд вдоль хорошо определенной проводящей оболочки, позволяя области пространственного заряда *лепить* локальное поле. Результат: полезная тяга менее 6 кВ и около 100 мВт — производительность почти на два порядка лучше по энергетической эффективности.

Эти выводы эхом повторяют последовательную тему: **эффективность электроаэродинамическая возникает не из напряжения или потока воздуха, а из контроля топологии заряда и геометрии поля.**

## Эффект резервуара заряда

Легкая фольга над жестким, изолирующим сердечником ведет себя как больше, чем просто проводник — она формирует **большоплощадный резервуар заряда**, усиливающий асимметрию электрического поля. В текущем дизайне вспененный полистирол (EPS) служит чисто **легкой структурной опорой**, вся поверхность которой обернута алюминиевой фольгой, **электрически непрерывной с высоковольтным питанием**. EPS добавляет пренебрежимо малую электрическую функцию; его ценность в том, чтобы обеспечить большую проводящую поверхность при минимальной массе.

Эта обширная проводящая оболочка хранит заряд напрямую из источника питания, позволяя коронному разряду работать против **предварительно заряженного электростатического поля** вместо построения его с нуля в каждом цикле. Высокая площадь поверхности фольги драматически увеличивает эффективную емкость — порядка 10–100 пФ см<sup>-2</sup>, в зависимости от текстуры поверхности и кривизны — и преобразует умеренное приложенное напряжение в гораздо более сильный локальный градиент электрического поля.

Когда коронный разряд зажигается, фольга действует как стабилизирующая референция потенциала. Выделенные ионы слегка модулируют локальное поле, но не доминируют над ним; вместо этого хранимый поверхностный заряд поддерживает постоянную асимметрию, производящую непрерывную тягу при очень низкой мощности.

С точки зрения тензора напряжений Максвелла сила пропорциональна интегралу силы поля и его градиента:

$$F \approx \epsilon_0 \int (E \cdot \nabla E), dV$$

и большая, хорошо заряженная фольга максимизирует оба члена без необходимости в более высоком напряжении или токе. Это объясняет, почему ротор низкой мощности и низкого напряжения смог достичь значительного вращения: он заменил **хранимую электростатическую энергию** на тяжелые потери ионного тока конвенциональных геометрий «ионного ветра» — практическую форму *электростатической эффективности*.

## Геометрия эффективности

Эффективность EHD-двигателя определяется не скоростью потока воздуха, а **тем, насколько эффективно формируется электрическое поле**. Ключевые параметры включают:

- **Асимметрия поля:** Чистый направленный компонент градиента электростатического давления.
- **Распределение плотности заряда:** Как облако ионов модифицирует это поле через частичное экранирование.
- **Емкостная связь:** Общий хранимый заряд на противоположных поверхностях на вольт приложенного.
- **Каналы потерь:** Потери коронного разряда, рекомбинация и диэлектрическая утечка.

Дизайны, которые ограничивают и формируют поле — например, размещая широкую противоположно заряженную поверхность близко к эмиттеру — могут достигать улучшений на порядки в тяге на ватт. Электрическое поле выполняет работу; ионы лишь позволяют полю оставаться асимметричным и динамичным.

## Пересмотр Бифельд-Брауна

Ранние наблюдения Брауна о тяге из асимметричных конденсаторов предшествуют нашему современному пониманию физики плазмы. Без рамок тензора напряжений Максвелла или динамики пространственного заряда было естественно думать, что эффект может включать гравитацию. Тот факт, что EHD-двигатели производят силу «против» вектора поля (и иногда вертикально вверх), только углубил загадку.

Видя через современную линзу, «антигравитация» Брауна была просто видимым электростатическим давлением. Сходство в математической форме — как гравитационная, так и электростатическая потенциальные энергии падают как  $1/r^2$  — делало путаницу исторически понятной, но физика полностью электромагнитна.

## Перспективы и современный контекст

Недавние анализы и обсуждения среди коллег усиливают эту переформулировку электроаэродинамической тяги как **феномена градиента поля**, а не двигателя ионного ветра. В классических конфигурациях лифтеров коронные токи порядка милливольт при десятках киловольт дают плотности тяги в диапазоне микро- до миллиньютонов на ватт — отражение того, насколько мало энергии электрического поля заканчивается направленным механическим напряжением. Напротив, ротор EPS, обернутый фольгой, преобразует тот же физический закон в *заряд-управляемый* процесс: широкая проводящая поверхность поддерживает сильный градиент  $E$  с минимальным током, обменивая потери дрейфа на хранимую энергию поля.

Это различие эхом повторяет более широкий сдвиг в современном исследовании. **Актуаторы диэлектрического барьерного разряда** в аэродинамическом контроле также выводят свою поверхностную силу из напряжений Максвелла, а не из объемного потока воздуха, достигая эффективности  $10\text{--}100\text{ Н кВт}^{-1}$  при настройке геометрии

электродов на асимметрию. **Геометрии плавающих электродов и ограничения**, изучаемые в ONERA и в рамках программ EHD EC, показывают двух- до пятикратные увеличения тяги путем формирования оболочки ионов — именно логика дизайна ротора резервуара заряда. И в **разреженных воздушных средах**, таких как верхняя стратосфера или марсианская атмосфера, где ионное торможение слабеет, но электростатическое напряжение остается, поверхности, богатые зарядом, могут поддерживать тягу долго после отказа конвенциональных дизайнов.

Физика идеально согласуется с рамкой импульса Пойнтинга классического электромагнетизма: тяга соответствует градиенту плотности энергии поля,

$$F \approx \epsilon_0 \int (E \cdot \nabla E), dV$$

что означает, что система извлекает импульс напрямую из электромагнитного поля. Ионы — катализаторы, поддерживающие дисбаланс, а не сама реакционная масса. Это объясняет, почему в вакуумных экспериментах, где поле становится симметричным, тяга исчезает — член  $\nabla E$  коллапсирует. Напротив, в роторе резервуара фольги емкостная оболочка держит  $E$  крутым и направленным, производя примерно **0.1–1 mN** тяги, эквивалентной моменту, из всего **100 mW** входной мощности — в 10–100 раз эффективнее устройств ионного торможения.

Параметр	Конвенциональный дизайн ионного ветра	Ротор резервуара заряда фольги	Импликация
Напряжение	20–50 кВ	< 6 кВ	Ниже риск пробоя, проще масштабирование
Мощность	1–10 Вт	≈ 0.1 Вт	10–100× выше тяга / Вт
Механизм тяги	Столкновения ион-нейтраль	Градиент поля (напряжение Максвелла)	В значительной степени независимо от плотности воздуха
Ключевой фактор	Зазор эмиттер-коллектор	Емкостный резервуар фольги	Хранимый заряд > переходный ток
Эффективность (Н кВт <sup>-1</sup> )	0.01–0.1	1–10 (выводимая)	Реализуемо для микро-ВПЛА

Такие сравнения подчеркивают концептуальный поворот: **от токо-управляемой к заряд-управляемой тяге**, от перемещения вещества к формированию полей. Следующая граница — то, что можно назвать *электростатической архитектурой* — использование вычислительной оптимизации и продвинутых материалов (эмиттеры углеродных нанотрубок, шаблонные фольги, метаматериальные диэлектрики) для максимизации  $\int E \cdot \nabla E$ . Гибридные импульсные режимы постоянного тока могут дальше эксплуатировать переходное хранение заряда, снижая химические побочные продукты.

# Заключение — Питаемая Максвеллом и Кулонам

Электроаэродинамическая тяга — не экзотическая курьезность или псевдонаучная аномалия. Это прямое проявление законов Максвелла и Кулона — макроскопическая машина, преобразующая электростатическую потенциальную энергию в движение через контролируемую асимметрию поля.

Где ранние изобретатели видели «антигравитацию», а современные проекты — «ионный ветер», настоящая история проще и глубже: **электрические поля обладают напряжением**. Сформируйте это напряжение, и вы можете тянуть себя через воздух без движущихся частей, без топлива и без шума.

Это тихий гений электроаэродинамической тяги — поистине, **питаемая Максвеллом и Кулонам**.

## Ссылки

1. Talley, C. et al. *Evaluation of the Biefeld–Brown Effect: Asymmetric Capacitor Thruster Tests in Vacuum and Atmosphere*. AIAA Paper 2003-1023, NASA Marshall Space Flight Center, 2003.
2. Brown, T. T. *Electrokinetic Apparatus*. U.S. Patent No. 3,187,206, 1965.
3. Wilson, S., Barrett, S. R. *Flight of an Aeroplane with Solid-State Ion Propulsion*. *Nature* **563**, 532–535 (2018).
4. Moreau, E. *Airflow Control by Non-Thermal Plasma Actuators*. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **40**, 605–636 (2007).
5. Ronney, P. D. *EHD Flow Control and Plasma Actuators*. NASA Technical Reports Server, 2015.
6. ONERA EHD Program: *Electrohydrodynamic Propulsion and Flow Control*. Internal Reports 2018–2023.