

Мельніков Д. Є., асистент;
 Кіресв М. Е., студент;
 Смолич Д. В., студент
 Національний авіаційний університет, Київ

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТУ БІФЕЛЬДА-БРАУНА ЯК АЛЬТЕРНАТИВНОГО СПОСОБУ СТВОРЕННЯ РУШІЙНОЇ СИЛИ

В даній роботі проводиться дослідження силоутворюючих елементів на основі ефекту Біфельда-Брауна. Досліджуються різні схеми компоновки літальних апаратів з силоутворюючими елементами на основі цього ефекту з подальшим аналізом експериментально отриманих даних.

Ефект Біфельда-Брауна оснований на тому, що несиметричний конденсатор (конденсатор, у якому один електрод набагато більший за інший) при подачі високої напруги ($>20\text{kV}$), починає рухатись у напрямі високого градієнту електричного потенціалу, тобто виникає рушійна сила [1, 2, 3]. Пристрій, який досліджується в цій роботі, створює тягу в повітрі без будь-яких рухомих частин та згоряння палива. Іоноліт (в закордонній літературі широко використовується назва «Lifter») працює виключно на вищезгаданому ефекті. «Lifter» складається з двох паралельно провідних електродів, один з яких дріт, а інший – дерев'яний каркас обмотаний фольгою. Існує декілька теоретичних моделей, які досить добре описують роботу даного пристрою. В даній роботі, розрахунки проводились згідно електрокінетичної моделі виникнення рушійної сили (рис. 1).

Навколо позитивного електроду, де градієнт електричного потенціалу дуже високий, електрони відділяються від атомів і молекул довкілля (повітря). Ці електрони мігрують на позитивний електрод, де вони збираються. Це видалення вільних електронів залишає відповідні атоми і молекули позитивно зарядженими, що й створює позитивну іонну хмару навколо дроту, тобто вище негативного електроду. Алюмінієва пластина, що притягується позитивною іонною хмарою, переміщується вгору завдяки електростатичній силі. Крім того, позитивна іонна хмара, що притягується алюмінієвою пластинною (негативний електрод) і, відштовхувана позитивним електродом, рухається вниз, відповідно до ліній електричного поля. Негативна пластина нейтралізує позитивний заряд атомів і молекул. Їх зіткнення настільки сильні, що надлишкові електрони відділяються від пластини і захоплюються атомами і молекулами середовища, які стають негативно зарядженими. Це створює негативно заряджену хмару, яка відштовхується вниз від алюмінієвої пластини, збільшуючи підймальну силу. Позитивна іонна хмара безперервно генерується довкола позитивного електроду, і процес повторюється знову і знову. Дрейф іонів через повітряний проміжок проходить з приблизно постійною швидкістю v_d , яка пропорційна напруженості електричного поля E та коефіцієнту рухливості іонів μ :

$$v_d = \mu \cdot E \quad (1)$$

Відстань у сантиметрах, яку проходять іонізовані молекули повітря до зіткнення з нейтральними молекулами визначається як величина вільного пробігу, і дорівнює $5 \cdot 10^{-3}/P$, де P – тиск середовища (мм.рт.ст.). Більший повітряний проміжок щодо певної величини вільного пробігу, означає більшу ймовірність частих зіткнень іонів з нейтральними молекулами, а, отже, більший імпульс і одержання більшої тяги. Отже, Lifter перетворює електричну енергію в електрокінетичну тягу F_s в середовищі, в якому він рухається.



Рис. 1. Електрокінетична модель створення рушійної сили

Сила взаємодії електричного заряду q з електричним полем з напругою U прикладеною до простору протяжністю d описується виразом:

$$F = q \cdot \frac{U}{d} \quad (2)$$

де U – напруга, прикладена між електродами, а d – відстань між дротом і пластиною. Ця формула строга для конденсатора з паралельними пластинами (де траєкторія польоту іонів паралельна вектору створюваної тяги), але відмінність через різну форму електричного поля буде невелика. Очевидно з третього закону механіки, та ж сама сила буде прикладена середовищем до піднімального пристрою. Кількість заряду q розподіленого між електродами в будь-який час, коли відбувається коронний розряд:

$$q = i \cdot \frac{d}{v_d} \quad (3)$$

де, i – електричний струм, а v_d – дрейфова швидкість іонів. Іони переміщуються не по прямій траєкторії, тому що на рух зумовлений електричними силами впливає тепловий рух. Під час цього руху іони взаємодіють з молекулами навколишнього середовища. Таким чином, дрейфова швидкість – це швидкість руху іонів від коронуючого дроту до колектора. Величина рухливості позитивних і негативних іонів в повітрі відповідно рівні $\mu(+)=2 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ та $\mu(-)=2.7 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ [4, 5]. Далі для розрахунків використовується тільки $\mu(+)$, оскільки на коронуючий дріт подається позитивний потенціал.

Підставляючи v_d з (1) в (3) і q з (3) в (2) отримуємо силу:

$$F = i \cdot \frac{d}{\mu} \quad (4)$$

Використовуючи відомий вираз для визначення потужності, можемо отримати формулу для ефективності, тобто відношення тяги до затрачуваної потужності:

$$P = i \cdot U \quad (5)$$

$$\frac{F}{P} = \frac{d}{\mu \cdot U} \quad (6)$$

З цього рівняння видно, що поліпшення ефективності можна досягнути лише зміною напруженості електричного поля і/або ефективної іонної рухливості. Отже, гази найбільш високої густини працюють краще за все, більш масивні молекули (і іони) кращі, і найважливіше, що для даної напруженості електричного поля E , ефективність збільшується лінійно зі збільшенням повітряного проміжку d , який може бути змінений при розробці подібних піднімальних пристроїв. Ефективність може досягати 40 г/Вт.

Для функціонування силоутворюючого пристрою необхідна коронна генерація. В ході експериментів було відмічено, що нижче певної напруги, тяга пристрою зменшуються різко до нуля. Немає іонізації – немає необхідних іонів для створення сили тяги. Найважливіший параметр напруги - мінімальна напруга коронного розряду МНКР (CIV), напруга, при якій на коронуючому дроті виникає видимий незброєним оком (у темряві) тонкий палаючий шар. Як тільки початкова напруга досягнута, напруженість електричного поля на поверхні дроту дорівнює E_i , коронуючий дріт може бути видимий, і залишається таким до радіальної відстані, на якій градієнт напруженості знижується до значення напруженості поля пробою повітря E_0 – константа, рівна 3МВ/м. Коли початкова напруга досягнута, повітря навколо провідника, починає іонізуватися, і іони починають свій рух до колектора.

Це обчислення ґрунтується на припущеннях, що коронний розряд присутній тільки на одному електроді, таким чином, струм іонів протилежного знаку незначний. В іншому випадку цей струм зменшив би тягу. Початкова напруга коронного розряду U_0 визначається з рівняння Піка [6]:

$$U_0 = m_o \cdot E_i \cdot r_w \cdot \ln\left(\frac{d}{r_w}\right) \quad (7)$$

де, $E_i = E_0 \cdot \delta \cdot (1 + 0.0301/\sqrt{\delta \cdot r_w})$ – градієнт початкової напруги коронного розряду (В/м); $E_0 = 3\text{МВ/м}$ - напруженість поля пробою повітря при НУ; m_o – коефіцієнт нерівності дроту(=1 – для гладких (полірованих) дротів; = 0.98 .. 0.93 – для шорсткуватих або брудних дротів;= 0.87 .. 0.83 – для кабелів);

$\delta = (3.92 \cdot b)/(273 + t)$ – коефіцієнт густини повітря; b – барометричний тиск (см. рт. ст.), t – температура ($^{\circ}\text{C}$),

$\delta = 1$ при $b = 76 \text{ см}$ і $t = 25^{\circ}\text{C}$, d – відстань між електродами (м), r_w – радіус дроту (м).

Отже, при $E_0 = 3\text{МВ/м}$, НУ ($\delta = 1$) та гладких дротів ($m_o = 1$), рівняння Піка може бути зведено до вигляду:

$$U_0 = 3 \cdot 10^6 \cdot (1 + 0.0301/\sqrt{r_w}) \cdot r_w \cdot \ln\left(\frac{d}{r_w}\right) = E_i \cdot r_w \cdot \ln\left(\frac{d}{r_w}\right) \quad (8)$$

$E_i = E_0 \cdot (1 + 0.0301/\sqrt{r_w})$, отже, E_i залежить тільки від фізичного радіуса дроту.

Колектор повинен мати заокруглений край достатнього радіуса кривизни, щоб уникнути коронного розряду, інакше, іони протилежної полярності будуть генеруватися на колекторі, і, як наслідок, зменшать тягу. Для визначення необхідного радіуса кривизни колектора, розглянемо графік $U_0(r)$ (рис. 2):

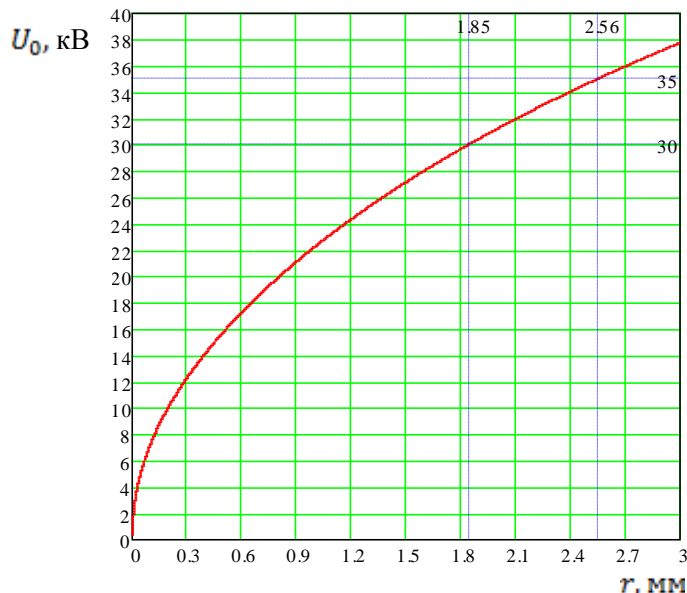


Рис. 2. Зв'язок радіуса заокруглення колектора та мінімальної напруги коронного розряду

Із графіка видно, що для заданого значення повітряного зазору ($d = 45$ мм) і початкової напруги коронного розряду $U_0 = 30$ кВ, мінімальний радіус кривизни колектора r дорівнює **1.85 мм**, а для $U_0 = 35$ кВ - $r = 2.56$ мм.

Максимальний коронний струм на одиницю довжини (метр) коронуючого дроту знаходимо з виразу:

$$j_{max} = 2 \cdot K \cdot \mu \cdot \varepsilon_0 \cdot E_p^2 \quad (9)$$

для позитивної корони, $E_p = +U/d$

де, K – динамічний геометричний коефіцієнт Борг-Сігмонда (для розглянутого випадку, $K = 0.5$) [7], ε_0 – діелектрична постійна, E – напруженість електричного поля. Це показує, що існує верхня межа для густини струму, яка не залежить від фактичного розміру піднімального пристрою.

Повне споживання струму:

$$I = j_{max} \cdot l \quad (10)$$

де, l – довжина системи дріт-пластина (м).

Підставляючи вираз для струму й густини в (4) отримуємо:

$$F_{max} = \frac{2 \cdot K \cdot \varepsilon_0 \cdot U^2 \cdot l}{d} \quad (11)$$

Дослідження проводились за допомогою високовольтного блоку живлення, який був побудований на основі трансформатора рядкової розгортки (ТДКС) НР 7839. Вимірювання вихідної напруги проводилось за допомогою дільника напруги, сконструйованого з високовольтних резисторів, загальний опір яких складає ~ 1 ГОм, коефіцієнт ділення ~ 1000 . Сила, що виникала у силоутворюючих елементах, вимірювалась за допомогою високоточної ваги. (Методика проведення досліду базується на [8]).

Експериментально були отримані залежності сили, що формується в силоутворюючому елементі (сконструйованому піднімальному пристрої максимальною масою 13 г), від підведеної напруги (рис. 3) та сили струму (рис. 4).

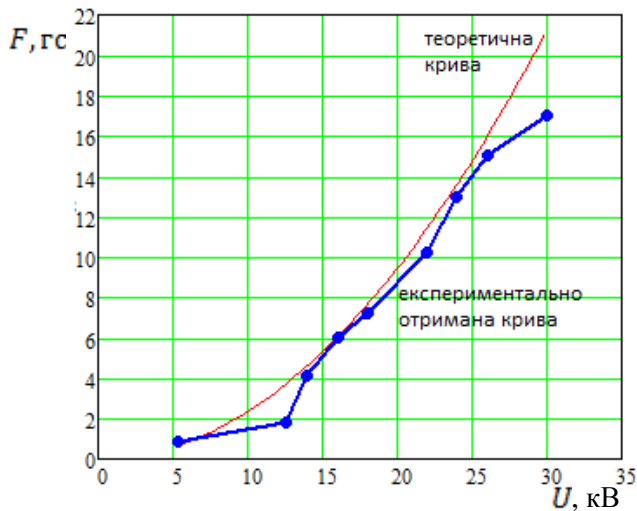


Рис. 3. Криві залежності піднімальної сили (в гс) від підвідної напруги (в кВ)

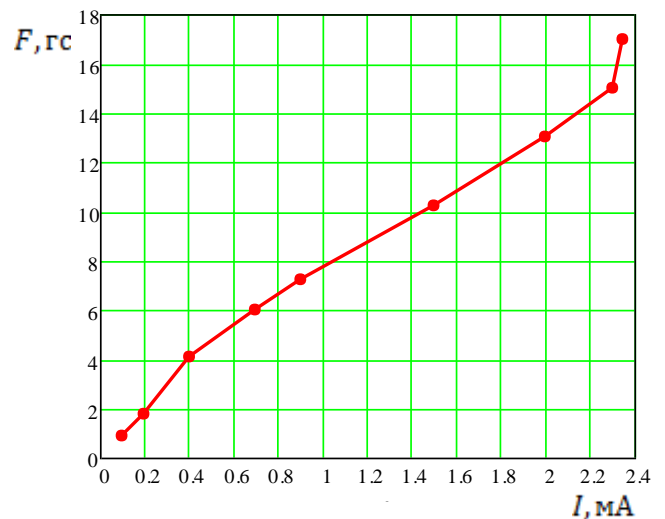


Рис. 4. Експериментальна крива залежності піднімальної сили (в гс) від електричного струму (в мА)

З отриманих графіків видно, що експериментально отримані значення сили відрізняються від теоретичних. Це обумовлено насамперед виникненням в повітряному проміжку потоку іонів протилежного знаку, що зменшує загальний струм через силоутворюючий елемент, а також похибками вимірювальних приладів.

В ході дослідів було встановлено наступне:

Напрямок реактивної сили зберігається при підключенні до силоутворюючого елемента постійної напруги будь-якої полярності. Різниця тільки в коефіцієнті рухливості позитивних чи негативних іонів.

Переміщення об'єктів, на яких встановлені силоутворюючі елементи на ефекті Біфельда-Брауна, може відбуватися як в горизонтальній так і у вертикальній площині. Виходячи з цього можна спроектувати та побудувати електромеханічні перетворювачі роду струму, які майже не створюють власне магнітне поле, оскільки струм, протікаючий через силоутворюючий елемент дуже малий.

В майбутньому планується проведення ряду експериментів в різних діелектричних рідинах та визначити як від цього залежить утворювана сила. У той час, як сила в повітрі досить слабка, може бути виявлено, що електрокінетична сила могла б використовуватись в інших цілях, таких як транспортування рідини або підводний рух.

Список літератури

1. *Brown, T.T.*, US Patent 2,949,550, "Electrokinetic Apparatus," 1960.
2. *Brown, T.T.*, US Patent 3,187,206, "Electrokinetic Apparatus," 1965.
3. *Bahder, T.B., Fazi, C.*, "Force on an Asymmetric Capacitor—Final Report, Aug.–Dec. 2002," ARL-TR-3005, NTIS Order Number ADA416740.
4. <http://fee.mpei.ac.ru/elstat/lect> .
5. <http://ionization.ru/> .
6. *Peek F. W.* Dielectric phenomena in high voltage engineering, 1915. - 256 с.
7. <http://blazelabs.com> .
8. *Сенченков А. П.* Техника физического эксперимента. – М.: Энергоатомиздат., 1983. – 240с.