

## Измерения колебаний дрейфового тока в двигателях с замкнутым дрейфом электронов

© Т. Чернышёв,<sup>1,2</sup> Д. Криворучко,<sup>2</sup> А. Скрылёв<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Объединенный институт высоких температур РАН,  
125412 Москва, Россия

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт,  
141701 Долгопрудный, Московская обл., Россия  
e-mail: thunarux@gmail.com

(Поступило в Редакцию 24 июля 2017 г.)

Индукционный метод для измерения дрейфового тока в двигателях с анодным слоем (ДАС) был использован для измерения интегрального искажения магнитного поля в канале стационарного плазменного двигателя (СПД) малой мощности. В работе подробно описана методология эксперимента, в результате которого определяется интегральный уровень колебаний магнитного поля в узком канале двигателя с замкнутым дрейфом электронов. Полученные данные показали, что в СПД зажигание разряда сопровождается полным размагничиванием разрядного промежутка дрейфовым током (отношение собственного магнитного поля к внешнему достигает 90%), для ДАС наблюдается аналогичный эффект. При этом в обоих двигателях полный ток разряда на полтора порядка превышает значения, характерные для стационарного режима, а свечение плазмы наблюдается не только внутри, но и за срезом разрядного канала. Проведены измерения колебаний дрейфового тока в установившихся режимах. В частности, показано, что при наличии сильных колебаний в области малых магнитных полей ( $10^{-2}$  Т) искажение магнитного поля дрейфовым током может достигать 33%. В режиме номинальной работы ( $2 \cdot 10^2$  Т) оно не превышает 8%. Характер колебаний и режимы работы в СПД и ДАС отличаются при выходе за границу оптимальной работы. Так, в СПД отсутствует критическое магнитное поле, при котором происходит переход в „турбулентный“ режим. В целом ток разряда слабее зависит от величины магнитного поля.

DOI: 10.21883/0000000000

### 1. Введение

Двигатели с замкнутым дрейфом электронов (также известные как холловские электрореактивные двигатели, ХЭРД) — это азимутально-симметричные устройства, где разряд горит в кольцевом канале, образованном полюсами магнитопровода. Внешнее магнитное поле имеет преимущественно радиальную составляющую, а электрическое поле в основном параллельно оси двигателя. Электроны осциллируют в скрещенных полях между катодной и анодной областями разряда, формируя дрейфовый ток, замкнутый в азимутальном направлении („холловский ток“), и ионизируют поступающий из анода газ. Существуют два основных варианта двигателей с замкнутым дрейфом электронов: стационарный плазменный двигатель (СПД, двигатель Морозова) и двигатель с анодным слоем (ДАС, двигатель Жаринова). Для СПД характерен протяженный разрядный канал, выполненный из диэлектрика; в ДАС короткий разрядный канал ограничен проводящими стенками. В современных моделях СПД часто используется „гибридная“ схема с проводящей вставкой под плавающим потенциалом в прианодной области. Это позволяет снизить потери энергии на стенки вследствие ухода электронов.

Знание распределения магнитного поля необходимо для понимания физики процессов, протекающих в ХЭРД, а также для задач численного моделирования

и ряда диагностических методов. Оно определяет размер циклоидных траекторий электронов и поперечную проводимость, от величины которых напрямую зависит эффективность работы двигателя. Магнитное поле в ХЭРД складывается из постоянной внешней компоненты и искажения, вносимого дрейфовым током заряженных частиц. Обычно влиянием полей плазмы на внешнее поле пренебрегают, так как в большинстве случаев оно не значительно, в частности, авторы [1] проводили локальные измерения усредненного по времени магнитного поля в квазистационарном режиме работы СПД — датчиком Холла и с помощью расчета по данным о плотности плазмы и распределении потенциала, полученных с зонда Ленгмюра. Измерения показали, что искажение магнитного поля мало (менее  $5 \cdot 10^{-4}$  Т при постоянной составляющей  $1.2 \cdot 10^{-2}$  Т). В работе [2] использовался набор миниатюрных катушек для измерения распределения моментальной локальной плотности дрейфового тока в СПД при помощи быстрого ( $< 1 \mu\text{s}$ ) прерывания разрядного тока, измерена локальная плотность дрейфового тока  $\sim 30 \text{ A/cm}^2$ , а также измерялась ВЧ составляющая, связанная с изменением подвижности электронов в плазме. В работе [3] исследовалось взаимодействие с дрейфового тока с цепями питания катушек намагничивания. В частности, рассматривался резонанс колебаний магнитного поля с собственной частотой магнитной системы.

При использовании инвазивных методов габариты зонда должны быть много меньше разрядной камеры, поэтому их применение затруднено в устройствах малых размеров и при больших мощностях разряда, кроме того, зонд вносит возмущение и не позволяет проводить длительные измерения. Использование миниатюрных катушек достаточно трудоемко и затруднительно в случае двигателей с коротким каналом, например в двигателях с анодным слоем (ДАС). В работе [4] был предложен индукционный метод интегрального измерения дрейфового тока. Вместо установки дополнительных катушек для снятия сигнала использовалась катушка намагничивания, что не требовало каких-либо изменений в конструкции двигателя и позволяло снимать данные при малых габаритах канала. Измерения проводились с помощью аппаратного интегрирования переменной ЭДС, возникающей на катушке в момент быстрого прерывания разрядного тока. При этом предварительно проводилась калибровка измерительной системы с помощью пробной катушки, имитирующей дрейфовый ток. Полученные измерения позволили восстановить тягу разряда в момент прерывания тока. В [5] индукционный метод был усовершенствован для получения осциллограмм переменной составляющей дрейфового тока в ДАС. В частности, были проведены измерения колебаний дрейфового тока в различных режимах горения разряда и в момент зажигания. В настоящей работе индукционный метод используется для измерения переменной составляющей дрейфового тока в СПД малой тяги в момент зажигания и в режимах с сильными колебаниями. Полученные результаты сравниваются с данными по ДАС из работ [5,6].

## 2. Теория

Можно оценить искажение магнитного поля, вносимое дрейфовым током с помощью закона Ампера–Максвелла, пренебрегая производными по времени и ограничиваясь рассмотрением вдоль оси разрядного канала:

$$\delta B = \frac{4\pi}{c} \cdot J_{\theta}, \quad (1)$$

где  $d$  — радиальная ширина разрядного канала,  $c$  — скорость света,  $J_{\theta}$  — дрейфовый ток. Из-за наличия магнитопровода дрейфовый ток в основном оказывает размагничивающий эффект на катодную область разряда. В квазистационарных режимах также имеет место связь реактивной тяги ионного пучка и усредненным по колебаниям дрейфовым током:

$$\langle J_{\theta} \rangle = \frac{F_c}{2\pi R_0 B_0}, \quad (2)$$

где  $F$  — реактивная тяга,  $R_0$  — средний радиус разрядного канала,  $B_0$  — внешнее магнитное поле. Выражение (2) означает, что тяга ускоренных в самосогласованном электрическом поле электронов передается на магнитопровод благодаря искажению магнитного поля

дрейфовым током. В эксплуатируемых режимах  $|\delta B|/B_0$  (размагничивание) не превышает нескольких процентов. Из (2) и (1) следует, что тяга пропорциональна размагничиванию. Так как тяга пропорциональна ионному току, при больших токах возможны ситуации, когда искажение магнитного поля будет велико. Например, в момент зажигания разряда, когда ток на порядок превышает номинальный [7–9], или при достаточно сильных колебаниях. Кроме того, в ряде случаев разряды такого типа могут переходить в неустойчивый режим при небольших отклонениях магнитного поля  $((1-2) \cdot 10^{-3} \text{ Т})$  от номинального.

## 3. Эксперимент

В настоящей работе рассматривается СПД с проводящей вставкой, геометрия разрядной камеры и форма магнитного поля для которого показана на рис. 1, *a*. Параметры СПД:  $R_0 = 22.5 \text{ мм}$ ,  $d = 8 \text{ мм}$ , полная глубина канала от среза магнитопровода до анода  $20 \text{ мм}$ , размер диэлектрических вставок  $1 \text{ см}$ . Результаты сравниваются с ДАС (макет ХРДПУ, разрабатываемый в ФГУП ФЭИ), чья разрядная камера и форма магнитного поля показаны на рис. 1, *b*. Параметры ДАС:  $R_0 = 22.5 \text{ мм}$ , средняя ширина разрядного канала  $d = 5 \text{ мм}$ , глубина канала от среза магнитопровода до анода  $7 \text{ мм}$ , детали проведения эксперимента с ДАС описаны в [5].

Исследования СПД проводились в лаборатории плазменных двигателей МФТИ. Экспериментальный стенд включает в себя горизонтально расположенную цилиндрическую вакуумную камеру диаметром  $1.8 \text{ м}$  и длиной  $4.5 \text{ м}$ . Высоковакуумная система откачки обеспечивает остаточное предельное давление  $2 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$ . Испытания проводились при расходе газа через анод  $Q_A = 1 \text{ мг/с}$ . Рабочее давление по ксенону на номинальном режиме работы двигателя составляло  $8 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$ . Для замыкания тока использовался стандартный полевой катод. Электрическая схема измерений приведена на рис. 2, *a*. Для стабилизации разрядного напряжения используется LC-фильтр ( $1.5 \text{ мН}$ ,  $100 \text{ мкФ}$ ).

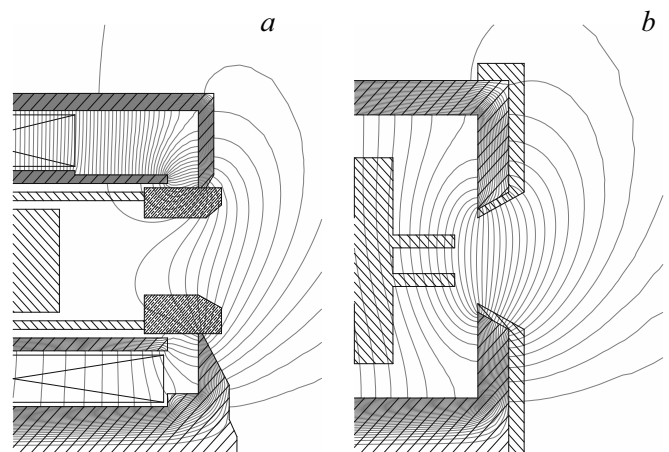


Рис. 1. Разряд камеры двигателей в масштабе (1 : 1). *a* — СПД, *b* — ДАС.

### 3.1. Методика измерений

В зависимости от аксиального положения „центра масс“ дрейфового тока силовые линии его магнитного поля частично или полностью замыкаются через магнитопровод. Колебания дрейфового тока по амплитуде или его сдвиг в аксиальном направлении приводят к изменению магнитного потока через сердечник магнитопровода. Из закона электромагнитной индукции Фарадея следует, что это приводит к появлению переменной ЭДС в цепи катушки намагничивания:

$$\delta U_m \propto dJ_\theta/dt.$$

Тогда переменная составляющая магнитного поля может быть получена с помощью формулы:

$$\delta J_\theta(t) = \mathcal{F}^{-1} \left( \frac{1}{K(\omega)} \mathcal{F} \left( \int_0^t \delta U_m(\tau) d\tau \right) \right) - at - b, \quad (3)$$

где  $K(\omega)$  — коэффициент взаимной индукции, который зависит как от напряженности внешнего магнитного поля, так и от частоты  $\omega$ ;  $\mathcal{F}$  и  $\mathcal{F}^{-1}$  — прямое и обратное преобразования Фурье;  $a, b$  — корректирующие коэффициенты, устраняющие накапливающуюся при интегрировании систематическую ошибку, связанную с неточностью определения нуля сигнала. Для стабилизации тока катушек и исключения резонансного взаимодействия с дрейфовым током [3] в цепи катушек намагничивания вводились индуктивности 30 мН. Для выделения переменной составляющей измерение ЭДС на катушке проводилось через конденсатор 1000  $\mu\text{F}$  осциллографом с импедансом канала 50  $\Omega$ . Показания снимались с центральной катушки, соотношение токов между внутренней и внешней катушками всегда составляло 1:0.88. Коэффициенты взаимной индукции измерялись в ходе калибровочного эксперимента, когда дрейфовый ток имитировался с помощью модельной катушки с синусоидальным током, вводимой в разрядную камеру (рис. 2, б). Калибровочный эксперимент показал, что в исследуемой области частот (1–100 kHz) коэффициент взаимной индукции линейно зависит от частоты и может быть описан формулой  $1/K(\omega) = (571\omega[\text{Hz}] + 3 \cdot 10^6)$ .

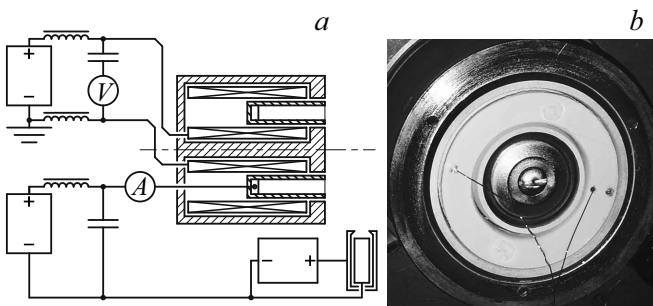


Рис. 2. а — схема цепей, б — измерение  $K(\omega)$ .

Вышеизложенный метод не позволяет различить изменение магнитного потока вследствие изменения дрейфового тока по амплитуде и вследствие его продольного движения. Из-за неопределенности аксиального местоположения дрейфового тока точность измерения колебаний магнитного поля составляет около 25%. Оценка искажения магнитного поля проводится по формуле (1).

### 3.2. Зажигание разряда

На рис. 3, а приведена осциллограмма зажигания разряда в СПД. Верхнее изображение — осциллограмма разрядного тока, нижнее — сигнал дрейфового тока, восстановленного по формуле (3). Для сравнения на рис. 3, б приведена аналогичная осциллограмма зажигания разряда в ДАС из работы [6]. Отметим, что в СПД анодный ток появляется с небольшой задержкой, которая связана, по-видимому, с зарядкой диэлектрических стенок канала и металлических вставок, а также конечным временем прохождения электронной лавины от катода к аноду через протяженный разрядный промежуток. Используя формулу (1), можно оценить искажение магнитного поля. Амплитуда „выброса“ дрейфового тока в СПД  $\delta J_\theta \sim 120$  А, тогда  $|\delta B|/B_0 \sim 0.95$ , т.е. происходит полное размагничивание разрядного промежутка. Для ДАС  $\delta J_\theta \sim 80$  А, тогда  $|\delta B|/B_0 \sim 0.68$ . Меньший ток и большая длительность процесса при зажигании ДАС связаны с использованием термоэмиссионных катодов (подробнее см. [9]).

Переходный процесс в момент зажигания разряда может быть интерпретирован следующим образом. В начальный момент времени разрядный канал равномерно заполнен газом, после зажигания заметная концентрация газа остается только вблизи анода. Можно по порядку величины оценить полное число заряженных частиц, участвующих в импульсе тока (с учетом ионизации натекающего газа):

$$N_A = \int_0^{t_1} I_A(t)/e dt, \quad (4)$$

где  $t_1$  — длительность зажигания. Сделав поправку на натекание газа, число частиц равно  $N_{A0} = N_A - t_1 Q_A [\text{A}^{\text{eq}}]/e$ , ( $1 \text{ A}^{\text{eq}} \equiv 1.36 \text{ mg/s}$ ). Эксперимент показывает, что величина  $N_{A0}$  пропорциональна расходу. Для исследуемых макетов она составляет  $N_{A0} \sim Q_A [\text{A}^{\text{eq}}] \cdot 10^{15}$  частиц. Отсюда можно сделать оценку аксиального размера области выгорания (предполагая, что  $N_{A0}$  составляют однозарядные ионы и электроны):

$$L \sim u_a \frac{e}{2Q_A [\text{A}^{\text{eq}}]} \cdot N_{A0},$$

где  $u_a$  — тепловая скорость атомов. Что для исследуемых макетов дает около  $\sim 3$  см и сопоставимо со средним радиусом разрядного канала. Это означает, что ионизация происходит не только внутри разрядного

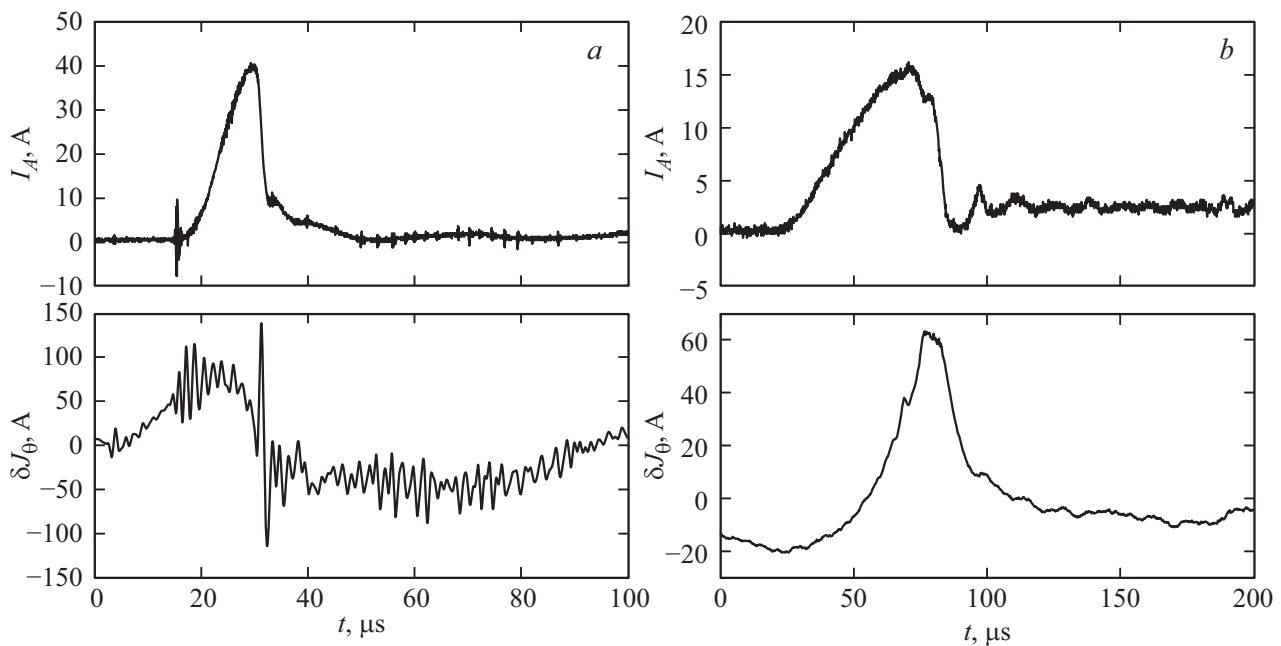


Рис. 3. Осциллограммы зажигания разряда. *a* — СПД,  $2 \cdot 10^{-2}$  Т, *b* — ДАС по данным [6],  $B_0 = 2.9 \cdot 10^{-2}$  Т.

канала, но и в достаточно большой области за срезом двигателя. Таким образом, „всплеск“ тока в момент зажигания обусловлен ионизацией „избыточных“ атомов. Можно оценить минимально необходимую емкость в анодной цепи, обеспечивающую протекание импульса тока:  $C_A^{\min} \sim (eN_A - t_1 I^{\max}) / \delta\phi_A$ , где  $\delta\phi \approx 50$  В — максимальное падение напряжения, при котором не происходит погасания разряда;  $I^{\max}$  — максимальный ток источника питания. При использовании ХЭРД на борту КА мощность источника питания близка мощности двигателя, поэтому  $I^{\max}$  не более чем на 10% превышает ток номинального режима. Отсюда  $C_A^{\min} \sim 2 \langle I_A \rangle \cdot 10^{-6}$  Ф, где  $\langle I_A \rangle$  — номинальный ток двигателя.

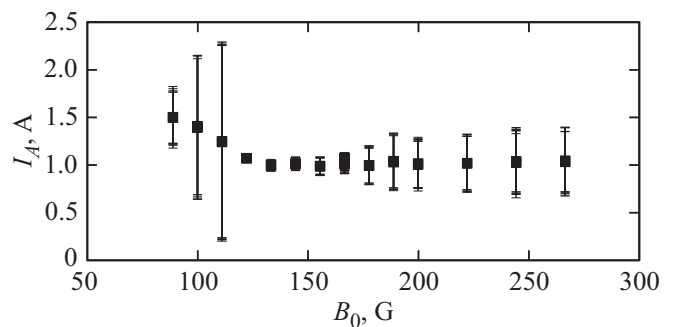


Рис. 5. Магнит-амперная характеристика разряда в СПД при  $Q_A = 1$  мг/с,  $\phi_A = 300$  В.

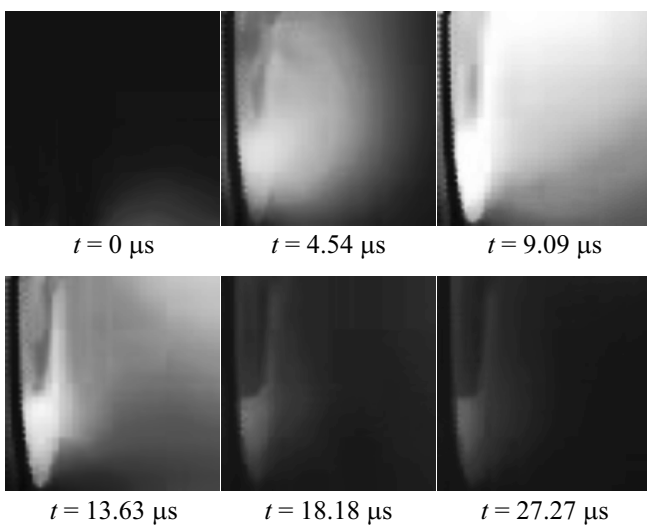


Рис. 4. Зажигание разряда.

С целью визуализации процесса зажигания СПД проводилась высокоскоростная съемка разряда (рис. 4). В момент времени  $t = 0$  появляется облако плазмы, инжестрированной из катода (слабое свечение справа снизу). После этого свечение возникает во всей разрядной области, достигая через  $10 \mu\text{s}$  максимальной яркости. В это время яркое свечение наблюдается как внутри канала, так и за его срезом. Примерно через  $15\text{--}20 \mu\text{s}$  интенсивность значительно падает и видимым остается свечение только внутри разрядного канала. С учетом того, что интенсивность излучения пропорциональна концентрации возбужденных частиц и соответственно возрастает с увеличением концентрации плазмы, изменение яркости во времени характеризует те же эффекты („всплеск“ тока, ионизация газа за срезом канала).

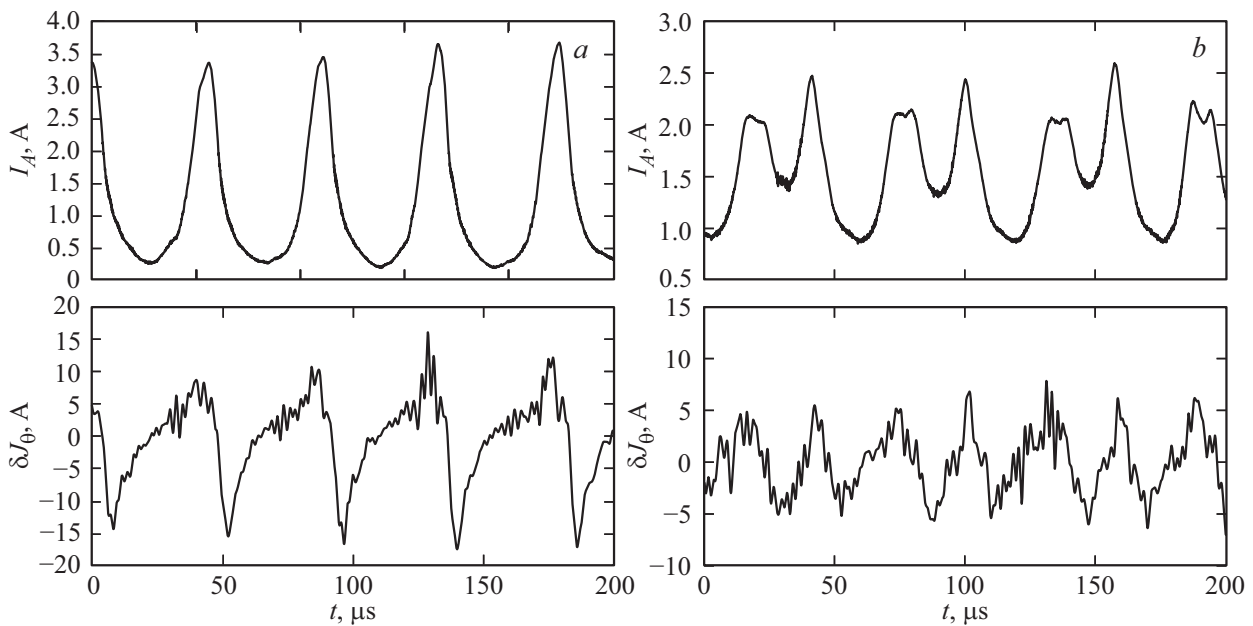


Рис. 6. Осциллограммы колебаний разряда в СПД,  $Q_A = 1 \text{ mg/s}$ ,  $\phi_A = 300 \text{ V}$ .  $a - B_0 = 10^{-2} \text{ T}$ ,  $b - B_0 = 2 \cdot 10^{-2} \text{ T}$ .

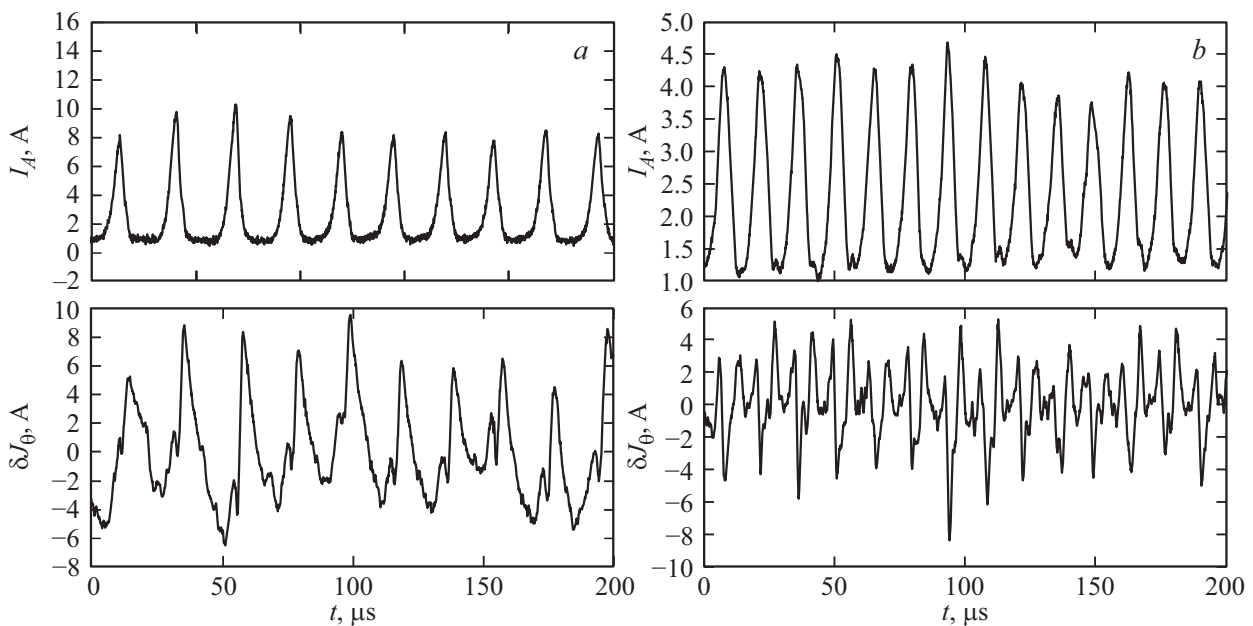


Рис. 7. Осциллограммы колебаний разряда в ДАС,  $Q_A = 1.8 \text{ mg/s}$ ,  $\phi_A = 250 \text{ V}$ .  $a - B_0 = 2.25 \cdot 10^{-2} \text{ T}$ ,  $b - B_0 = 2.7 \cdot 10^{-2} \text{ T}$ .

### 3.3. Установившийся режим

Также рассматривались горение разряда в установившемся режиме при фиксированном напряжении (300 V) и варьировании магнитного поля. Измерялся анодный ток, переменная компонента дрейфового тока и тяга. На рис. 5 приведена зависимость анодного тока от магнитного поля (магнит-амперная характеристика разряда), разбросом показаны амплитуды колебаний. В области малых магнитных полей развиваются сильные колебания анодного тока — так называемые „дыхательные моды“

(breathing modes) (рис. 6,  $a$ ), в области высоких полей — „ионизационные“ колебания (рис. 6,  $b$ ). При этом тяга слабо зависит от величины магнитного поля. Так, при  $B_0 = 10^{-2} \text{ T}$  и 300 V тяга составляет 1.62 g, и при увеличении магнитного поля до  $2 \cdot 10^{-2} \text{ T}$  тяга монотонно возрастает до 1.78 g, при дальнейшем увеличении магнитного поля тяга не меняется. Данная зависимость сохраняется при других напряжениях. Используя формулы (1) и (2) и считая, что  $J_\theta = \langle J_\theta \rangle + \delta J_\theta$ , можно оценить полное искажение магнитного поля. Так, в режиме „ионизационных“ колебаний  $|\delta B|/B_0 \approx 0.0092 - 0.087$ , а

в режиме „дыхательных мод“  $|\delta B|/B_0 \approx 0.019-0.333$ . Осциллограммы аналогичных измерений для ДАС показаны на рис. 7 (частота НЧ колебаний связана со временем пролета нейтрального атома через разрядный промежуток, поэтому для ДАС она оказалась выше). Для ДАС искажение магнитного поля в режиме „дыхательных мод“ —  $|\delta B|/B_0 \approx 0.045-0.182$ , в режиме „ионизационных“ колебаний  $|\delta B|/B_0 \approx 0.037-0.111$ . Стоит отметить, что в отличие от СПД „дыхательные моды“ в рассматриваемой модели ДАС появляются только после зажигания разряда и в течение  $\sim 1000 \mu\text{s}$  релаксируют к стационарному состоянию.

Поведение ДАС в области высоких магнитных полей значительно отличается от СПД — при превышении некоторого критического значения магнитного поля в ДАС возникает неустойчивость, сопровождающаяся появлением хаотических всплесков тока, — возникает „турбулентный режим“ [5,10], который связывают со сменой механизма проводимости [11,12]. Подобный эффект полностью отсутствует в СПД — во всем диапазоне магнитных полей выше оптимального наблюдаются только „ионизационные“ колебания.

## Выводы

Индукционный метод был успешно использован для измерения колебаний дрейфового тока в СПД малой тяги в момент зажигания и в режимах с сильными колебаниями. Приведено сравнение полученных результатов с аналогичными экспериментами, поставленными на ДАС. Измерения показали, что при зажигании разряда в СПД, так же как в ДАС, дрейфовый ток оказывается столь велик, что происходит значительное (90%) размагничивание разрядного промежутка. При этом полный ток разряда на порядок превышает значения, характерные для стационарного режима, а интенсивная ионизация происходит не только внутри канала, но и за срезом двигателя. Однако зажигание разряда в СПД отличается от ДАС — присутствует задержка между появлением сигнала дрейфового тока. Различная длительность зажигания связана с использованием разных типов катодов. Для СПД была проведена высокоскоростная съемка зажигания разряда, на которой наблюдались эффекты, аналогичные полученным в результате обработки осциллограмм: „всплеск“ тока и ионизация газа за срезом канала. Исследование установившихся режимов в СПД показало, что в области малых магнитных полей, где наблюдаются колебания тока большой амплитуды, максимальное искажение магнитного поля может достигать 33% от внешнего. В области номинальной работы искажение магнитного поля не превышает 8%. Также в отличие от ДАС в СПД отсутствует верхняя граница магнитного поля, при котором разряд переходит в „турбулентный“ режим.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 14-50-00124. This work was supported by the Russian Science Foundation project 14-50-00124.

## Список литературы

- [1] Haas J.M., Gallimore A.D. Considerations on the Role of the Hall Current in a Laboratory-Model Thruster. In 37th Joint Propulsion Conference & Exhibit, 8–11 July 2001.
- [2] Cliff A. Thomas, Nicolas Gascon, Mark A. Cappelli. A Study of the Azimuthal Electron Drift in an  $E \times B$  Discharge Using a Non-invasive Antenna Array. In 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conf. and Exhibit, 20–23 July 2003.
- [3] Da-ren Yu, Li-qiu Wei, Yong-jie Ding, Ke Han, Guo-jun Yan, Feng-yan Qi. // *Plasm. Sourc. Science Technol.* 2007. Vol. 16. N 4. P. 757.
- [4] Новичков Д.Н., Ермилов А.Н., Коваленко А.Ю., Сапронова Т.М. // *ТВТ.* 2005. Vol. 43. N 5. P. 691–696.
- [5] Ермилов А.Н., Ерошенков В.Ф., Новичков Д.Н., Коваленко Ю.А., Сапронова Т.М., Чернышёв Т.В., Шумилин А.П. // 2014. Vol. 52. N 3. P. 371–380.
- [6] Чернышёв Т.В. Экспериментальные и численные исследования нарушения стационарности горения интенсивных разрядов с замкнутым дрейфом электронов. Автореф. канд. дис. ОИВТ РАН, 2016.
- [7] Vial V., Mazouffre S., Prioul M., Pagnon D., Bouchoule A. // *IEEE Transactions on Plasma Sci.* 2005. Vol. 33. N 2.
- [8] Ellison C.L., Raitses Y., Fisch N.J. // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2011. Vol. 39. N 11.
- [9] Ермилов А.Н., Ерошенков В.Ф., Коваленко Ю.А., Королёв С.В., Чернышёв Т.В., Шумилин А.П. // *ТВТ.* 2013. Vol. 51. N 4. С. 497.
- [10] Ермилов А.Н., Ерошенков В.Ф., Новичков Д.Н., Коваленко Ю.А., Сапронова Т.М., Королёв С.В., Чернышёв Т.В., Шумилин А.П. // *ТВТ.* 2013. Vol. 51. N 5. P. 670.
- [11] Yamamoto Naoji, Komurasaki Kimiya, Arakawa Yoshihiro. Condition of Stable Operation in a Hall Thruster. In 28th International Electric Propulsion Conference, Toulouse, France, 2003.
- [12] Takahashi Nanako, Yamamoto Naoji, Nakashima Hideki, Yokota Shigeru, Komurasaki Kimiya, Arakawa Yoshihiro. Investigation of Internal Plasma Structure in an Anode-layer Hall Thruster. In 30th Int. Electric Propulsion Conf. Florence, Italy, September 17–20 2007.