

Измерения колебаний дрейфового тока в двигателях с замкнутым дрейфом электронов

© Т. Чернышёв,^{1,2} Д. Криворучко,² А. Скрылёв²

¹ Объединенный институт высоких температур РАН,
125412 Москва, Россия

² 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} Gs) искажение магнитного поля дрейфовым током может достигать 33%. В режиме номинальной работы ($2 \cdot 10^2$ Gs) 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/JTF.2018.05.45899.2458

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; для 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 $5 \cdot 10^{-4}$ Gs при постоянной составляющей $1.2 \cdot 10^{-2}$ Gs). В работе [2] использовался набор миниатюрных катушек для измерения распределения моментальной локальной плотности дрейфового тока в СПД при помощи быстрого ($< 1 \mu s$) прерывания разрядного тока, измерена локальная плотность дрейфового тока ~ 30 А/см², 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_{θ} — 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 (1) и (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 $((1-2) \cdot 10^{-3} \text{Gs})$ 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: $R_0 = 22.5 \text{ mm}$, $d = 8 \text{ mm}$, полная глубина канала от среза магнитопровода до анода 20 mm , размер диэлектрических вставок 1 cm . Результаты сравниваются с ДАС (макет ХРДПУ, разрабатываемый в ФГУП ФЭИ), чья разрядная камера и форма магнитного поля показаны на рис. 1, *b*. Параметры ДАС: $R_0 = 22.5 \text{ mm}$, средняя ширина разрядного канала $d = 5 \text{ mm}$, глубина канала от среза магнитопровода до анода 7 mm , 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 m и длиной 4.5 m . Высоковакуумная система откачки обеспечивает остаточное предельное давление $2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$. Испытания проводились при расходе газа через анод $Q_A = 1 \text{ mg/s}$. Рабочее давление по ксенону на номинальном режиме работы двигателя составляло $8 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}$. Для замыкания тока использовался стандартный полевой катод. Электрическая схема измерений приведена на рис. 2, *a*. Для стабилизации разрядного напряжения используется LC-фильтр (1.5 mH , $100 \mu\text{F}$).

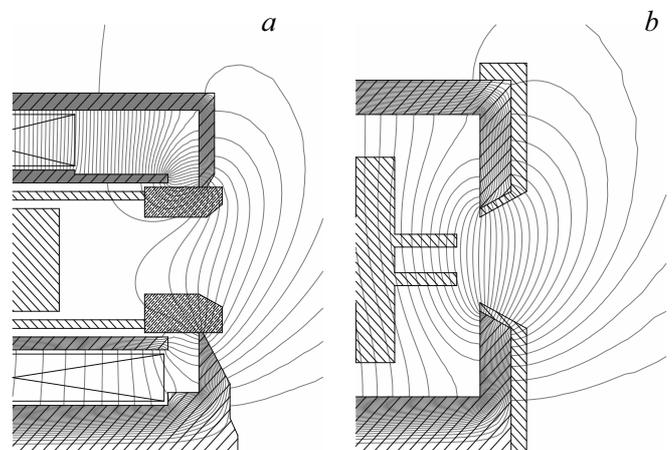


Рис. 1. Разряд камеры двигателей в масштабе (1 : 1). *a* — СПД, *b* — ДАС.

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 ω ; \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 μF осциллографом с импедансом канала 50 Ω . 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, *b*). Калибровочный эксперимент показал, что в исследуемой области частот (1–100 kHz) коэффициент взаимной индукции линейно зависит от частоты и может быть описан формулой $1/K(\omega) = (571\omega[\text{Hz}] + 3 \cdot 10^6)$.

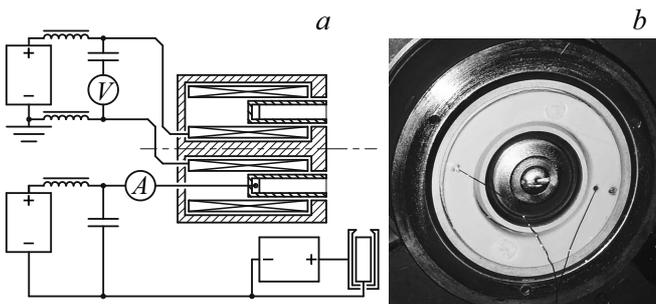


Рис. 2. *a* — схема цепей, *b* — измерение $K(\omega)$.

Вышеизложенный метод не позволяет различить изменение магнитного потока вследствие изменения дрейфового тока по амплитуде и вследствие его продольного движения. Из-за неопределенности пространственного распределения 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, *a* приведена осциллограмма зажигания разряда в СПД. Верхнее изображение — осциллограмма разрядного тока, нижнее — сигнал дрейфового тока, восстановленного по формуле (3). Для сравнения на рис. 3, *b* 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 $N_{A0} = N_A - t_1 Q_A [A^{eq}]/e$, ($1 A^{eq} \equiv 1.36 \text{ mg/s}$). Эксперимент показывает, что величина N_{A0} пропорциональна расходу. Для исследуемых макетов она составляет $N_{A0} \sim Q_A [A^{eq}] \cdot 10^{15}$ частиц. Отсюда можно сделать оценку аксиального размера области выгорания (предполагая, что N_{A0} составляют однозарядные ионы и электроны):

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

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

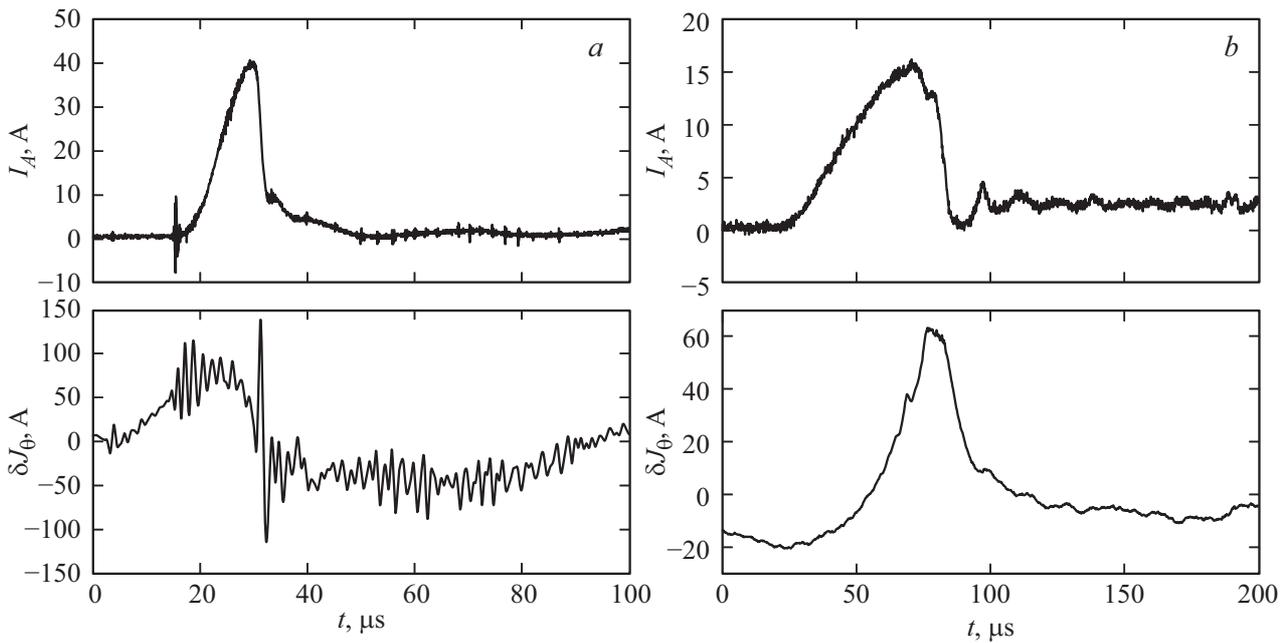


Рис. 3. Осциллограммы зажигания разряда. *a* — СПД, $2 \cdot 10^{-2}$ Gs, *b* — ДАС по данным [6], $B_0 = 2.9 \cdot 10^{-2}$ Gs.

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 $\delta\phi \approx 50$ V — 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 $C_A^{min} \sim 2 \langle I_A \rangle \cdot 10^{-6}$ F, где $\langle I_A \rangle$ — номинальный ток двигателя.

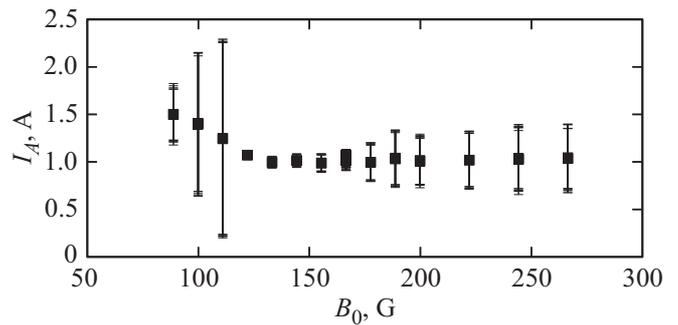


Рис. 5. Магнит-амперная характеристика разряда в СПД при $Q_A = 1$ mg/s, $\phi_A = 300$ V.

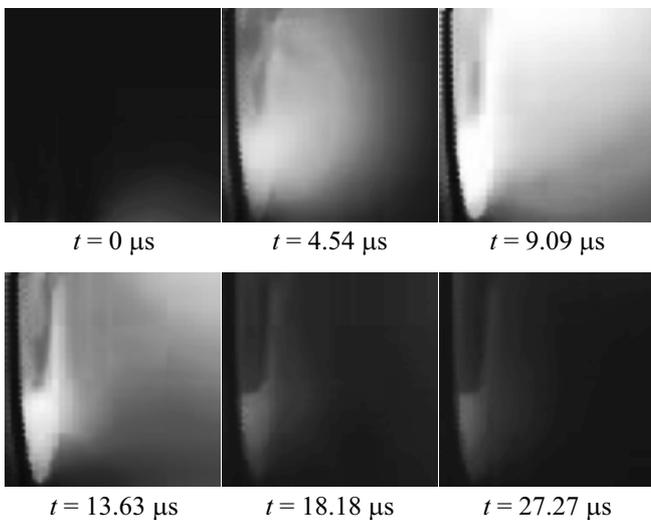


Рис. 4. Зажигание разряда.

С целью визуализации процесса зажигания СПД проводилась высокоскоростная съемка разряда (рис. 4). В момент времени $t = 0$ появляется облако плазмы, инжектированной из катода (слабое свечение справа снизу). После этого свечение возникает во всей разрядной области, достигая через $10 \mu s$ максимальной яркости. В это время яркое свечение наблюдается как внутри канала, так и за его срезом. Примерно через $15-20 \mu s$ 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).

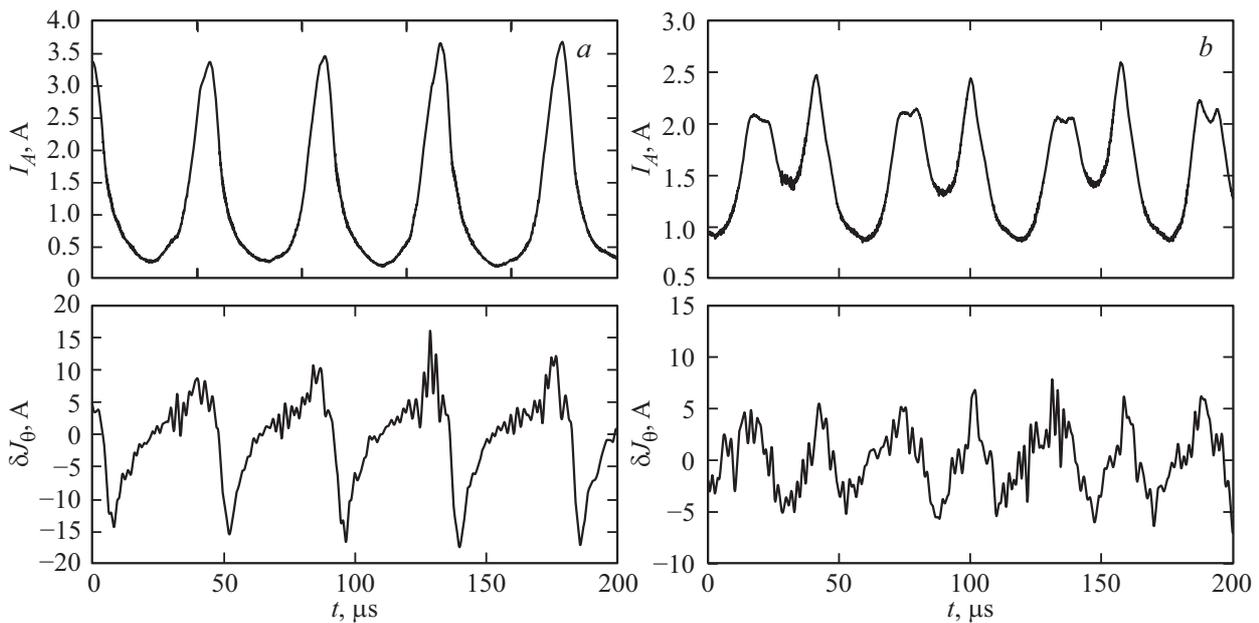


Рис. 6. Осциллограммы колебаний разряда в СПД, $Q_A = 1 \text{ mg/s}$, $\phi_A = 300 \text{ V}$. $a - B_0 = 10^{-2} \text{ Gs}$, $b - B_0 = 2 \cdot 10^2 \text{ Gs}$.

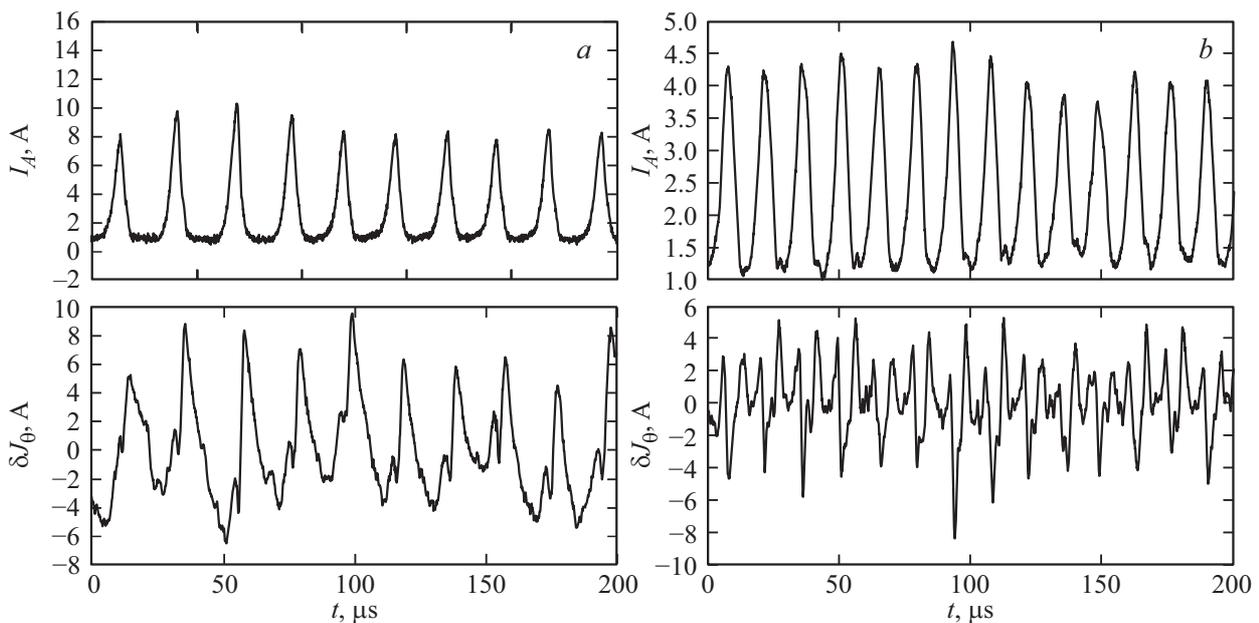


Рис. 7. Осциллограммы колебаний разряда в ДАС, $Q_A = 1.8 \text{ mg/s}$, $\phi_A = 250 \text{ V}$. $a - B_0 = 2.25 \cdot 10^2 \text{ Gs}$, $b - B_0 = 2.7 \cdot 10^{-2} \text{ Gs}$.

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 $B_0 = 10^{-2} \text{ Gs}$ и 300 V тяга составляет 1.62 g, и при увеличении магнитного поля до $2 \cdot 10^{-2} \text{ Gs}$ 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., Ерошенко В.Ф., Новичков Д.Н., Коваленко Ю.А., Сапронова Т.М., Чернышёв Т.В., Шумилин А.П. // *ТВТ* 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., Ерошенко 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., Ерошенко 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.