

Распространение фронта азимутальных колебаний потенциала плазмы в отражательном разряде с термокатодом

М. А. Валинуров^{1,2}, А. В. Гавриков¹, Г. Д. Лизякин¹, А. П. Ойлер^{1,2} и
Р. А. Тимирханов¹

¹ Объединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., 13, стр.2, Москва 125412, Россия

² Московский физико-технический институт (государственный университет),
Институтский пер., 9, Долгопрудный 141701, Россия

E-mail: valinurov.ma@phystech.edu

Статья поступила в редакцию 22 декабря 2022 г.

Аннотация. Присутствие скрещенных электрического и магнитного полей в плазме вызывает дрейфовое движение в направлении, перпендикулярном обоим полям. Конфигурация из радиального электрического поля и аксиального магнитного поля порождает азимутальное вращение плазмы и при этом могут возникать различные плазменные неустойчивости. Данная работа посвящена изучению азимутальных колебаний потенциала плазмы в плазменном столбе отражательного разряда. В работе при помощи зондовых методов были экспериментально получены и проанализированы временные зависимости плавающего потенциала плазмы. Было обнаружено, что происходит периодическое возмущение потенциала плазмы, которое может быть объяснено в рамках гипотезы о возникновении в объеме разряда вращающейся спицевой структуры. Определена азимутальная скорость распространения этого возмущения и показано, что она, при учете вращения плазмы как целого, совпадает со скоростью ионного звука. <https://doi.org/10.33849/2022201>

1. ВВЕДЕНИЕ

В наши дни одним из популярных направлений для исследований является плазма в скрещенных электрическом и магнитном полях, так как такая конфигурация применяется во множестве современных устройств [1]. В качестве примеров можно привести ускоритель Холла [2] или устройства для масс-сепарации, такие как масс-фильтр Т. Окавы [3] и масс-сепаратор В.П. Смирнова [4, 5]. Одной из распространенных проблем, зачастую возникающих в подобных устройствах, являются различные волны и неустойчивости [6], которые могут существенно влиять на результат работы конкретного устройства. В случае масс-сепаратора В.П. Смирнова [4, 5], ионы разделяемых веществ движутся в скрещенных полях в плазме, при этом важную роль играет ее потенциал [7]. Его колебания могут существенно повлиять на траектории ионов и изменить место их осаждения, тем самым ухудшая результат сепарации. Изучение пространственных и временных зависимостей распространения возмущений потенциала плазмы позволит лучше понять их физическую природу и учесть влияние при конструировании плазменных устройств. Настоящая статья посвящена экспериментальному исследованию азимутальной составляющей такого возмущения в цилиндрической геометрии в отражательном разряде с термокатодом.

2. МЕТОДЫ

Исследования проводились в цилиндрической установке длиной 230 см, с внутренним диаметром 86 см, и диаметром плазменного столба 50 см, при наличии аксиального магнитного поля 1.4 кГс. Схема установки приведена на рисунке 1. На противоположных торцах установки расположены два катода, один из них имеет диаметр 50 см, другой — 70 см. Анодом служит заземленная цилиндрическая поверхность вакуумной камеры. В центре одного из катодов установлен термокатод из гексаборида лантана (LaB₆). Таким об-

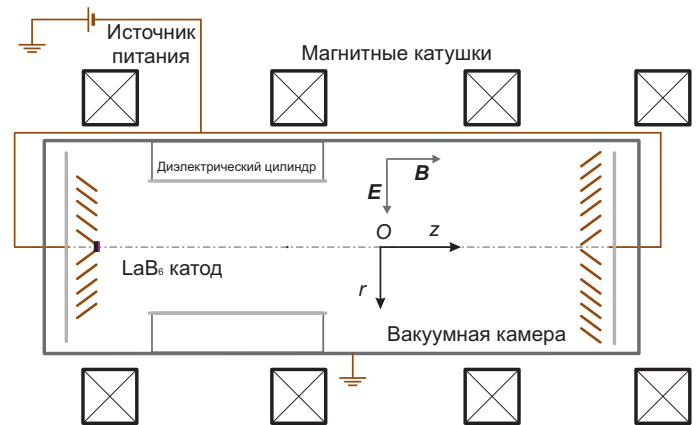


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки.

разом в установке формируется отражательный разряд с термоэмиссионным катодом. Характерное радиальное электрическое поле, возникающее в таком разряде, составляло 15 В/см [5]. В установку с постоянным натеканием 3.5 SCCM (Standard Cubic Centimeter per Minute) подается рабочий газ — аргон. Для изучения колебаний потенциала плазмы использовался одиночный зонд, находящийся под плавающим потенциалом [8]. Для исследования распространения фронта волны в азимутальном направлении использовался четырехканальный плавающий зонд, расположенный в круговом сечении разрядной камеры. Фактически он представляет собой четыре изолированных друг от друга одиночных плавающих зонда. Схема его расположения в сечении экспериментальной установки приведена на рисунке 2, также на нем изображена траектория дрейфа заряженного иона аргона под действием скрещенных электрического и магнитного полей. Полученные при помощи зондов временные зависимости потенциала плазмы от времени анализировались при помощи методов Фурье-анализа, а также кросс- и автокорреляций [9].

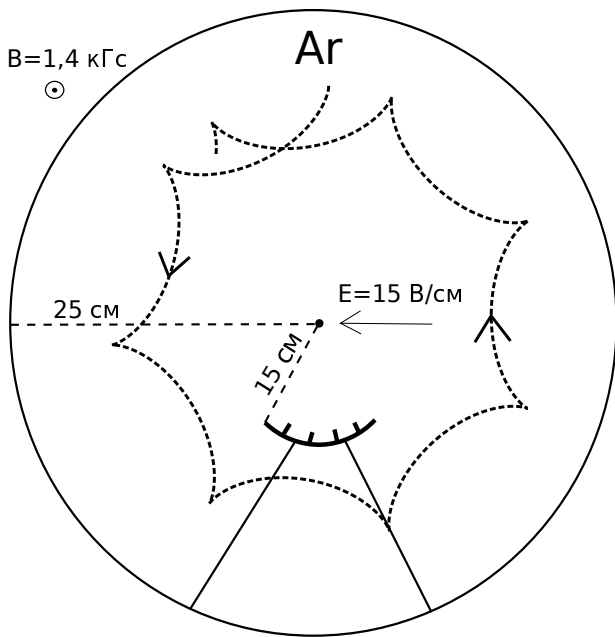


Рисунок 2. Схема расположения четырехканального плавающего зонда.

3. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Первая серия экспериментов проводилась с одиночным плавающим зондом. Давление составляло 0.34 мТорр, ток разряда 10 А, напряжение на катодах — 550 В. Данные снимались при четырех значениях радиальной координаты (т.е. расстояниях r от оси камеры): 5, 10, 15 и 20 см. Характерный вид получаемой временной зависимости плавающего потенциала при фиксированной координате расположения зонда приведен на рисунке 3(a). Каждый сигнал записывался в течение 100 мс с шагом дискретизации 0.1 мкс. Вторая серия экспериментов проводилась со статичным четырехканальным плавающим зондом на радиальной координате $r = 15$ см. Рабочее давление аргона составляло 0.25 мТорр, ток разряда 12 А, напряжение — 550 В. В первом эксперименте этой серии расстояния между регистрирующими элементами зонда составили 1.8 см, 1.8 см и 5.4 см, во втором — все расстояния составили 7.2 см. На рисунке 3(б) приведены типичные временные зависимости плавающего потенциала, получаемые с двух соседних элементов. Хорошо заметно, что сигналы в значительной мере повторяют друг друга, но при этом один немного отстает от другого. Каждый сигнал записывался в течение 1 мс с шагом дискретизации 0.4 мкс.

4. ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для зависимостей плавающего потенциала от времени, полученных в первой серии экспериментов, были рассчитаны среднеквадратичные отклонения от среднего значения (абсолютное и относительное). Графики зависимостей этих величин от радиальной координаты приведены на рисунке 4. Кроме того, для них были построены спектры, которые сглаживались методом скользящего среднего с окном 750 Гц. Получившиеся спектры и их усреднение приведены на рисунке 5. В качестве характерных особенностей можно выделить су-

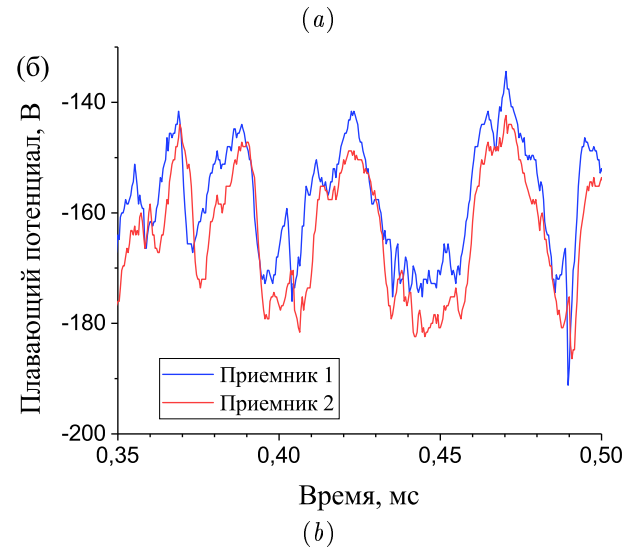
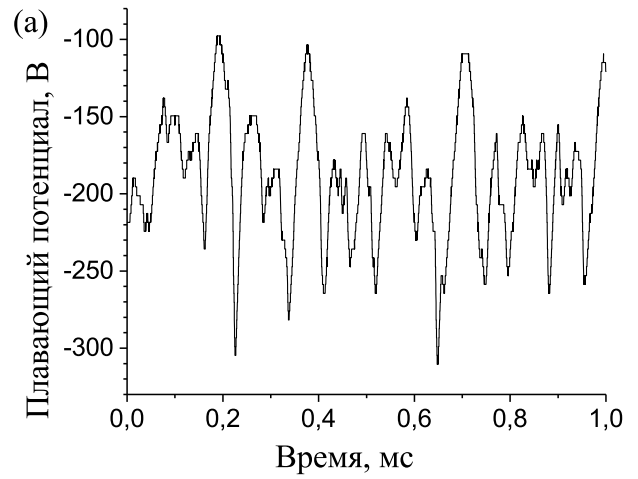


Рисунок 3. Характерный вид сигнала, полученного: (a) одиночным плавающим зондом, (b) регистрирующими элементами четырехканального зонда.

щественный спад амплитуды спектральных компонент при частотах более 20 кГц. Также для полученных в этой серии экспериментов зависимостей плавающего потенциала от времени был рассчитана автокорреляционная функция

$$\zeta(f, T) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)f(t+T)dt, \quad (1)$$

здесь f — функция сигнала (плавающий потенциал плазмы), T — время запаздывания. При интегрировании рассматривались участки сигнала длиной 0.1–1 мс. Пример полученной функции приведен на рисунке 6. Можно видеть, что пики автокорреляционной функции расположены эквидистантно. Это значит, что возмущение повторяется в данной точки пространства с некоторой периодичностью. В ходе анализа данных, полученных во второй серии экспериментов, был проведен кросскорреляционный анализ зависимостей плавающего потенциала от времени, получаемых с разных приемников четырехканального зонда:

$$\xi(g_1, g_2, T) = \int_{-\infty}^{+\infty} g_1(t)g_2(t+T)dt, \quad (2)$$

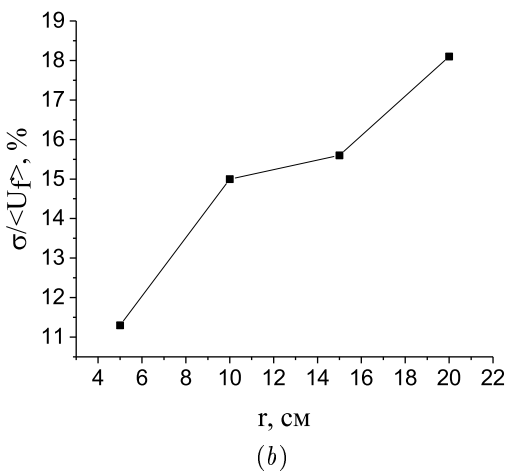
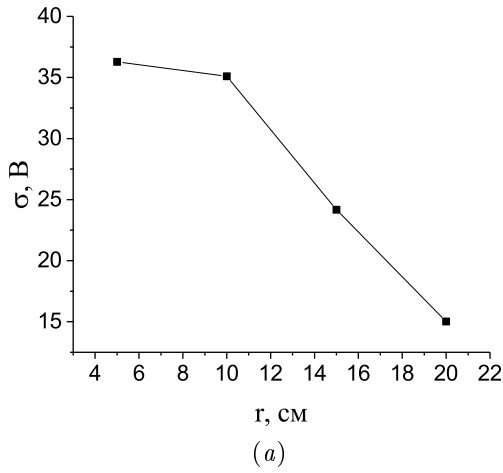


Рисунок 4. Зависимость (а) среднеквадратичного и (б) относительного среднеквадратичного отклонений плавающего потенциала плазмы от среднего значения.

где g_1, g_2 — функции сигнала с двух разных каналов, T — время смещения одного из сигналов относительно другого. Пример кросскорреляционной функции приведен на рисунке 7, в этом случае наблюдается ярко выраженный пик кросскорреляционной функции при $T = T_{max} = 5.2$ мкс. Это время может быть интерпретировано как время прохождения фронта возмущения плавающего потенциала плазмы от одного канала четырехканального зонда к другому (т.е. вдоль азимутальной координаты). Скорость распространения такого возмущения может быть оценена следующим образом: $v_f = l/T_{max} = 7.2 \text{ см}/5.2 \text{ мкс} = 14 \text{ км/с}$, где l — расстояние между регистрирующими элементами зонда, которое в рассматриваемом случае равно 7.2 см. Во всех экспериментах второй серии эта скорость оказывалась близкой к 14 км/с. Сравним полученную скорость с ионно-звуковой и магнито-звуковой скоростями, а также со скоростью вращения плазмы. Результаты расчетов приведены в таблице 1, при этом значения скорости вращения плазмы v_{rot} и температуры электронов $T_e = 6$ эВ взяты из работы [10]. По полученным результатам видно, что магнито-звуковая скорость существенно больше найденной скорости распространения возмущения потенциала v_f , в то время как

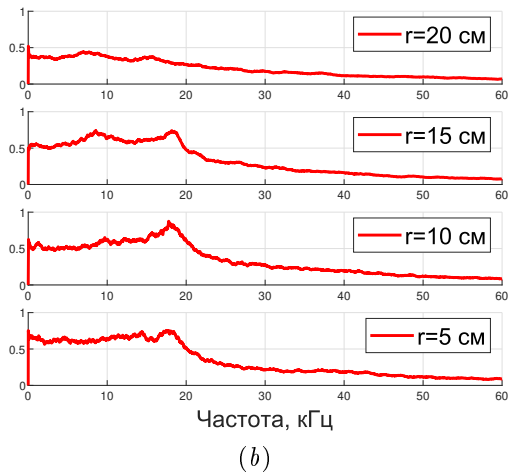
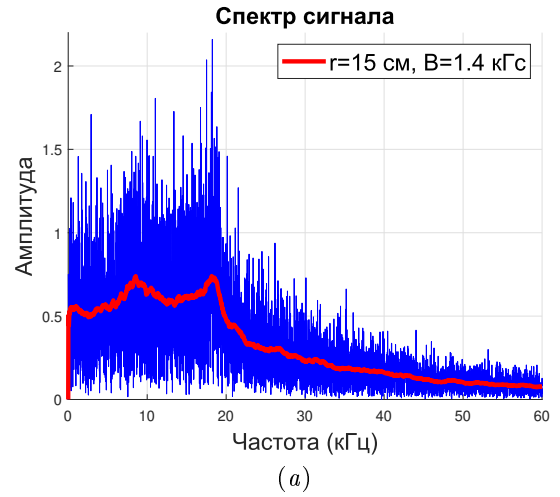


Рисунок 5. (а) Пример спектра колебаний потенциала плазмы, (б) усредненные спектры на различных координатах.

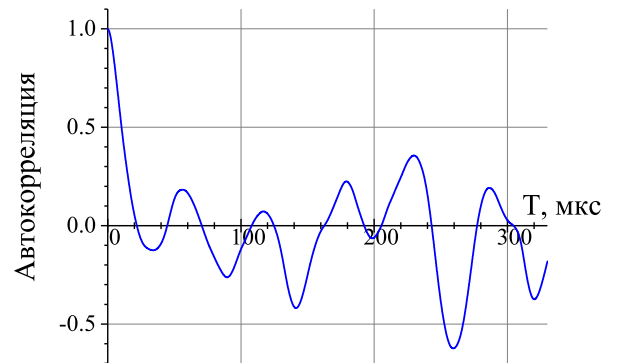


Рисунок 6. Автокорреляционная функция зависимости плавающего потенциала от времени.

ионно-звуковая скорость и скорость вращения плазмы близки к ней по порядку величины. Более того, их сумма составляет $v_{rot} + v_{ion-s} = 13 \text{ км/с} \approx v_f$. Рассмотрение суммы этих скоростей имеет смысл, так как ионно-звуковая скорость рассчитывается относительно неподвижной плазмы, в то время как в эксперименте у плазмы присутствует дополнительная компонента скорости вдоль азимутальной оси.

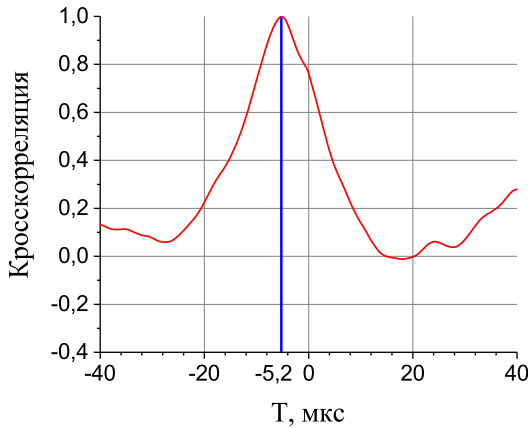


Рисунок 7. Пример кросскорреляционной функции сигналов с двух соседних регистрирующих элементов четырехканального плавающего зонда, находящихся на расстоянии 7.2 см.

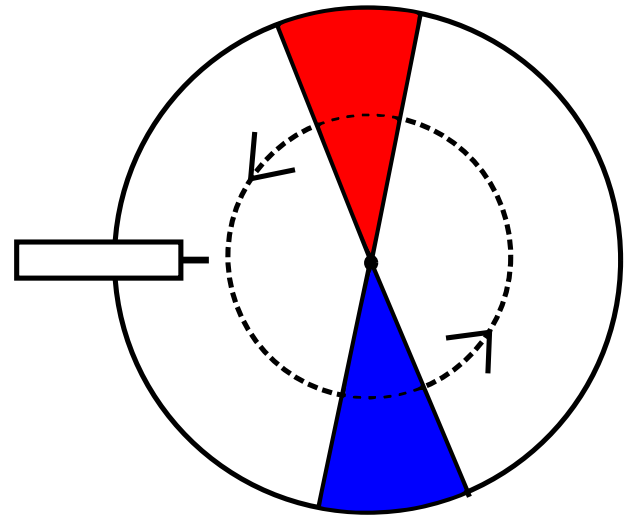


Рисунок 8. Схематичное изображение спицы. Красным цветом показано положительное возмущение потенциала, синим — отрицательное.

Таблица 1. Сравнение скорости распространения фронта с другими характерными скоростями.

Измеренная скорость фронта	Ионно-звуковая скорость	Магнито-звуковая скорость	Скорость вращения плазмы
v_f	$\sqrt{\frac{T_e}{m_i}}$	$\frac{B}{\sqrt{4\pi\rho}}$	v_{rot}
14	4	150	9

В качестве возможного объяснения всех приведенных выше наблюдений может быть выдвинута гипотеза о существовании некоторой спицевой структуры [11], вращающейся в круговом сечении разрядной камеры со скоростью, близкой к сумме скорости вращения плазмы и ионно-звуковой скорости. Под спицей в данном случае подразумевается некоторая пространственная структура, формирующаяся в плазме вдоль диаметра разряда и вращающаяся в первом приближении твердотельным образом. Схематичное изображение спицы приведено на рисунке 8. Подобные крупномасштабные структуры встречаются в разрядах со скрещенными ЕхВ полями [12]. Гипотеза о существовании спицы объясняет постоянство частот пиков на спектре колебаний потенциала плазмы на различных координатах (см. рисунок 4(б)). Полученные выше результаты позволяют оценить количество одновременно существующих в разряде таких спицевых структур. Автокорреляционные зависимости позволяют сделать предположение о симметричном расположении и синхронном вращении спицевых структур. Тогда, если предположить одновременное существование k спиц, то характерная частота изменения сигнала на зонде (с учетом найденной скорости $v_f=14$ км/с): $v_k = v_f k / 2\pi r = k \times 15$ кГц. Отметим, что 15 кГц входит в основную часть спектра исследуемых сигналов, в то время как уже на 30 кГц спектр иссякает, т.е. $k = 1$ и в рассматриваемых экспериментах существовала только одна спица. Следует отметить, что гипотеза о существовании спицы также

позволяет на базе рассматриваемой автокорреляционной функции оценить скорость распространения возмущения в азимутальном направлении (или скорость вращения спицевой структуры): среднее расстояние между максимумами автокорреляционной функции (рисунок 6) $\langle T_f \rangle = 58$ мкс. Тогда скорость распространения возмущения $v_f = 2\pi r / T_f = 16$ км/с, что в пределах погрешности совпадает с полученным выше значением 14 км/с, что также подтверждает предположение о наличии спицевой структуры. Предположение о твердотельном вращении спицевой структуры имеет также и слабые стороны. Исходя из него, можно утверждать, что азимутальная компонента скорости фронта возмущения плазмы со спицевой структурой должна расти пропорционально радиусу. При этом было показано, что скорость распространения фронта зависит от скорости вращения плазмы и ионно-звуковой скорости. И хотя первая растет с увеличением радиуса (см. [10]), темпов ее роста недостаточно для создания твердотельного вращения спицы. Данное замечание, вероятно, может быть устранено, если принять во внимание возможные “деформации” спицы, связанные с радиальными перетеканиями заряда и возникающими в связи с этим возмущениями потенциала, распространяющимися и в радиальном направлении. Рассмотрение подобных явлений было представлено, например, в результатах численного моделирования [13].

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполненных исследований было установлено, что в зависимости потенциала плазмы отражательного разряда с термокатодом от времени существенна роль периодической составляющей. При помощи четырехканального зонда была определена скорость, с которой бежит в азимутальном направлении волна, отвечающая за возмущение плавающего потенциала плазмы $v_f = (14 \pm 2)$ км/с. Было проведено сравнение данной скорости со скоростью вращения плазмы, а также ионно-звуковой и магнито-звуковой скоростями, в результате которого было показано, что скорость вол-

ны относительно покоящейся плазмы близка к ионно-звуковой скорости. Наблюдаемые в работе эффекты могут быть объяснены гипотезой о наличии спицевой неустойчивости. Показано, что в рамках этой гипотезы в условиях рассматриваемых экспериментов присутствует только одна спица.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kaganovich I D *et al* 2020 *Physics of Plasmas* **27** 120601
2. Choueiri E 2001 *Physics of Plasmas* **8** 1411–1426
3. Ohkawa T and Miller R 2002 *Physics of Plasmas* **9** 5116–5120
4. Ворона Н А, Гавриков А В, Самохин А А, Смирнов В П и Хомяков Ю С 2014 *Ядерная физика и инжиниринг* **5** 944–944
5. Liziakin G *et al* 2021 *Journal of Physics D: Applied Physics* **54** 414005
6. Михайловский А Б 1975 *Теория плазменных неустойчивостей* (Атомиздат)
7. Oiler A P, Liziakin G D, Gavrikov A V and Smirnov V P 2022 *Molecules* **27** 6824
8. Райзер Юрий Петрович 1987 *Физика газового разряда* (Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит.)
9. Пергамент Михаил Иосифович 2010 *Методы исследований в экспериментальной физике* (Интеллект)
10. Ойлер А П, Лизякин Г Д, Гавриков А В и Смирнов В П 2022 *Журнал Технической Физики* **92** 1529–1536
11. Kim J Y, Jang J Y, Choi J, Wang J i, Jeong W I, Elgarhy M, Go G, Chung K J and Hwang Y 2021 *Plasma Sources Science and Technology* **30** 025011
12. Smolyakov A, Chapurin O, Frias W, Koshkarov O, Romadanov I, Tang T, Umansky M, Raitses Y, Kaganovich I and Lakhin V 2016 *Plasma Physics and Controlled Fusion* **59** 014041
13. Powis A T, Carlsson J A, Kaganovich I D, Raitses Y and Smolyakov A 2018 *Physics of Plasmas* **25** 072110