

## Стимулирование высокочастотного пробоя газа в торсатроне Ураган-3М убегающими электронами

© И.К. Тарасов,<sup>1</sup> М.И. Тарасов,<sup>1</sup> Д.А. Ситников,<sup>1</sup> В.К. Пашнев,<sup>1</sup> М.А. Лытова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики плазмы ННЦ „Харьковский физико-технический институт“, 61108 Харьков, Украина

<sup>2</sup> Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, 61077 Харьков, Украина  
e-mail: itarasov@ipp.kharkov.ua

(Поступило в Редакцию 13 января 2015 г. В окончательной редакции 9 июня 2015 г.)

В экспериментальных работах по удержанию и нагреву плазмы в торсатроне Ураган-3М используется метод высокочастотного пробоя рабочего газа, при этом в условиях относительно стабильного магнитного поля в камеру установки вводится высокочастотная мощность на частоте, близкой к ионно-циклотронной. Такой метод пробоя в газе далеко не всегда является достаточно надежным. В рамках наших работ для стабилизации пробоя использовалась предварительная ионизация рабочего газа потоком убегающих электронов. Настоящая работа содержит результаты экспериментальных исследований по усилению потока убегающих электронов, а также взаимодействию потока убегающих электронов в торсатроне Ураган-3М с электромагнитным полем высокочастотной накачки. Это позволяет представить ряд рекомендаций по использованию самопроизвольно формирующихся потоков ускоренных частиц для стимуляции высокочастотного пробоя. Полученные результаты подтверждают возможность пробоя газа убегающими электронами.

### Введение

В настоящей работе рассмотрено новое решение вопроса предварительной ионизации рабочего газа в камерах малых термоядерных установок с помощью усиления потока убегающих электронов, который возникает в замкнутых магнитных ловушках на фронтах импульса магнитного поля [1–3]. В сущности, омический нагрев чаще всего является основным источником потока ускоренных электронов в стеллараторной конфигурации. Однако, как оказывается, в некоторых случаях эту роль могут играть иные факторы, такие как нестационарность удерживающего магнитного поля. Как известно, в ряде тороидальных установок и, в том числе стеллараторах, подача тока на катушки магнитного поля осуществляется в импульсном режиме. В качестве примера можно привести работы, проведенные на стеллараторе ТЖ-II, где, как и в большинстве тороидальных установок, убегающие электроны проявляли себя, порождая жесткое рентгеновское излучение. В отличие от предыдущих работ формирование потока убегающих электронов в этом случае было обусловлено не омическим нагревом, а возникающим на фронтах импульса напряженности магнитного поля ускоряющего электрического поля.

Следует отметить, что по своей физической сути результаты исследований являются еще одним подтверждением идеи пробоя газа в атмосфере с помощью убегающих электронов, высказанной А.В. Гуревичем с коллегами в 1991 г.

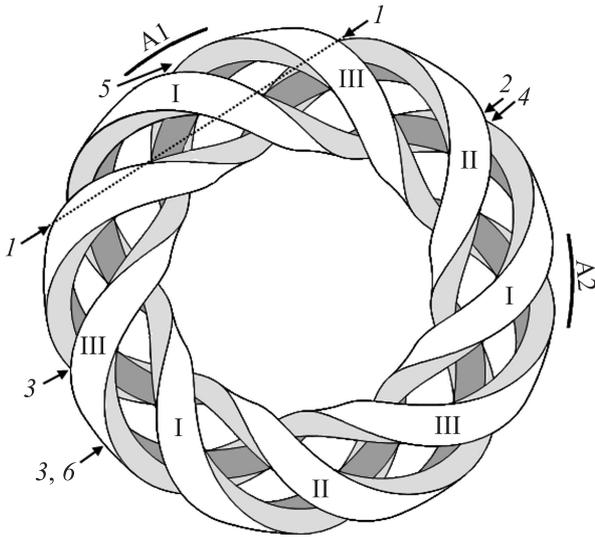
Пробой на убегающих электронах связан с генерацией вторичных электронов, появляющихся вследствие ионизации нейтральных молекул быстрыми убегающими

частицами. Хотя подавляющее большинство вторичных электронов имеет малые энергии, но могут родиться и электроны с достаточно большой энергией. Такие электроны тоже станут убегающими, т. е. будут ускоряться полем. Они могут, в свою очередь, при ионизации генерировать частицы с большой энергией. В результате появляется экспоненциально нарастающая лавина убегающих электронов. Вместе с ними генерируется и огромное количество медленных электронов, что в итоге и приводит к электрическому пробоя вещества. Важно, что пробой на убегающих электронах происходит в относительно слабом поле, которое на порядок меньше поля обычного электрического пробоя [4]. Теоретическая трактовка пробоя в грозových облаках нашла экспериментальное подтверждение в ходе работ на модельных и технологических установках [5–7].

Следует отметить, что и ранее предпринимались попытки усиления потока убегающих электронов в тороидальных ловушках за счет увеличения напряжения на обходе тора с целью дальнейшего взаимодействия релятивистского пучка с плазмой и турбулентного ее нагрева [8].

Настоящая работа содержит первые результаты экспериментального исследования взаимодействия потока убегающих электронов в торсатроне У-3М с электромагнитным ВЧ-полем и начальной плазмой (возникающей на ранней стадии пробоя). Ранее о взаимодействии убегающих электронов с ВЧ-полями речь шла в работе [9].

Результаты работы могут позволить описать некоторые закономерности и представить ряд рекомендаций по использованию самопроизвольно формирующихся потоков ускоренных частиц в замкнутых ловушках для стимуляции ВЧ-пробоя.



**Рис. 1.** Торсатрон Ураган-3М (A1 — антенна 1, A2 — антенна 2). I — оптическая спектроскопия, 2 — СВЧ-рефлектометрия и интерферометрия, 3 — ленгмюровский зонд, 4 — ЕСЕ (радиометрия), 5 — тороидальная петля, 6 — жесткое рентгеновское излучение.

## Схема экспериментальной установки

Эксперименты проводились на малой термоядерной установке, торсатроне Ураган-3М (У-3М) (рис. 1). Торсатрон У-3М имеет большой радиус  $R = 100$  см, удерживающее магнитное поле  $B_0 \leq 1$  Т, малый радиус винтовой обмотки  $r = 27$  см, заходность винтовой обмотки  $l = 3$ , число периодов поля  $m = 9$ , угол вращательного преобразования на крайней неразрушенной магнитной поверхности  $\iota = 0.4$ , угол вращательного преобразования на оси  $\iota_0 = 0.18$ .

Питание обмоток удерживающего магнитного поля осуществлялось с помощью генератора постоянного тока. Ток подавался на обмотки в импульсном режиме. Длительность импульса магнитного поля составляла  $\sim 4$  с. При этом стадия стационарного магнитного поля длилась около 2 с, а фронты спада и нарастания напряженности магнитного поля в камере У-3М длились порядка 1 с.

Создание и нагрев плазмы в торсатроне осуществлялся ВЧ-методом, при этом ВЧ-мощность вводилась в объем удержания на альфвеновской частоте  $\omega = 0.8 \cdot \omega_{ci}$ . ВЧ-комплекс торсатора У-3М предназначен для генерирования мощных высокочастотных колебаний в импульсном режиме. Он представляет собой два однотипных модуля „Каскад-1“ и „Каскад-2“, каждый из которых является генератором высокочастотных колебаний с выходной мощностью до 2 МВт в импульсе длительностью до 100 мс рабочий диапазон частот генераторов  $f = 1 \dots 20$  МГц.

Непосредственно ввод ВЧ-мощности в объем удержания осуществлялся с помощью двух неэкранированных

антенн, расположенных на противоположных секторах тора со стороны слабого магнитного поля [10,11].

## Диагностические методики

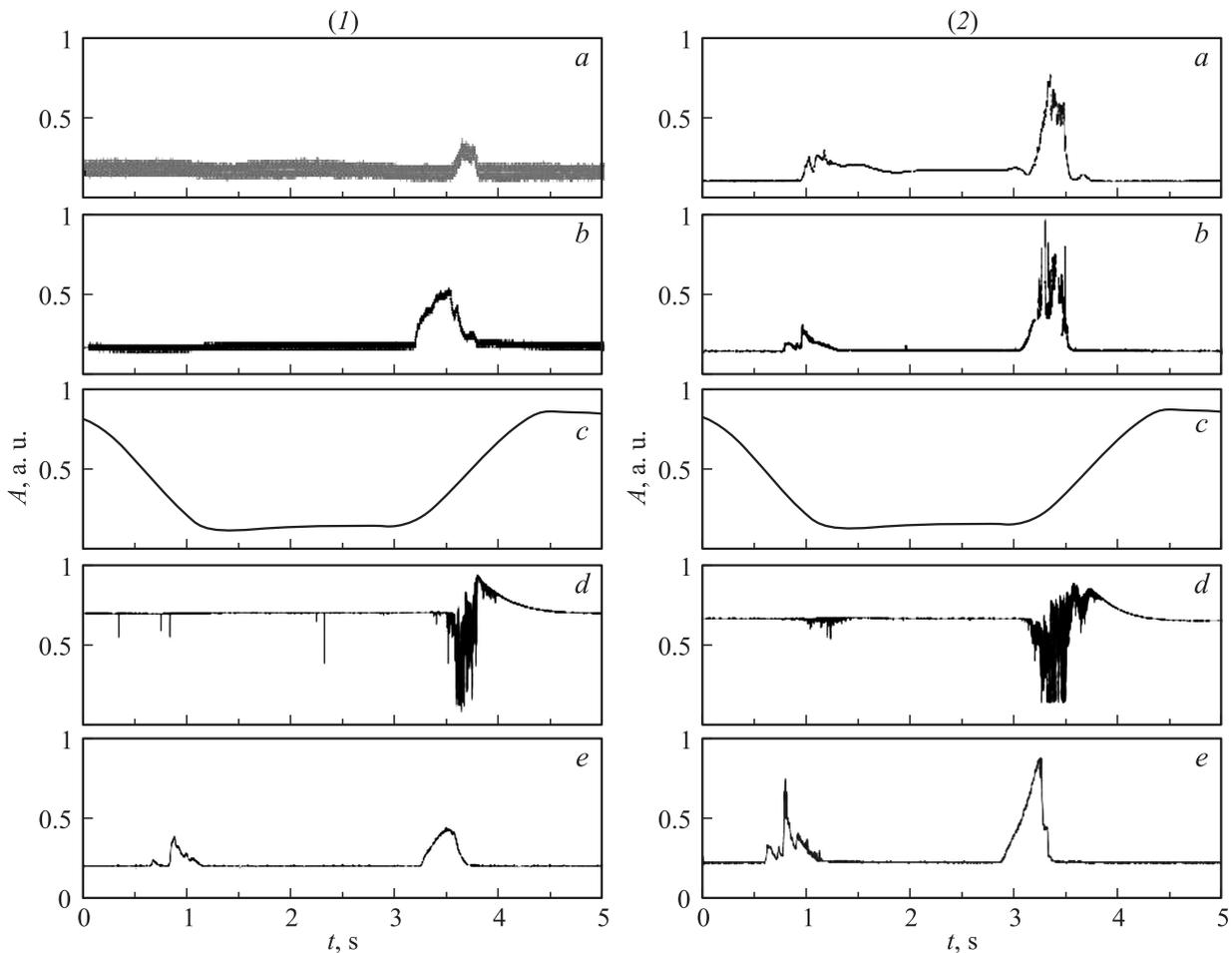
Для изучения динамики потоков заряженных частиц, формирующихся при подаче импульса магнитного поля, использовался комплекс зондовой диагностики (рис. 1), состоящий из подвижных (в радиальном направлении) вертикальных и горизонтальных ленгмюровских зондов, а также размещенных в периферийной области неподвижных зондов с развитой поверхностью. Подвижные зонды активно использовались в экспериментах по изучению убегающих электронов, проводившихся, в частности, и в отсутствие ВЧ-нагрева. В этом случае зонды могли вводиться непосредственно в центральную область камеры. При введении ВЧ-мощности в объем удержания измерения подвижными зондами производились исключительно в периферийной области во избежание их повреждения при непосредственном контакте с плазмой.

Потоки заряженных частиц, так же как и высокотемпературная плазма, являются источником электромагнитного излучения в различных частотных диапазонах. Анализ такого рода излучения может дать дополнительную информацию о параметрах потока, его максимальной энергии и распределении частиц по скоростям. По этой причине во время экспериментов на торсатроне У-3М проводились измерения разного рода излучений.

В частности, активно использовался комплекс рентгеновской диагностики, представлявший собой детектор в виде сцинтиллятора, последовательно соединенного с ФЭУ (ФЭУ-29), сигнал с которого после предварительного усиления поступал на аналого-цифровой преобразователь (АЦП) для дальнейшей обработки. Детектор устанавливался таким образом, чтобы излучение из объема удержания могло попадать через диагностическое окно на вход сцинтиллятора. Для отсеки мягкого рентгена вход сцинтиллятора в ряде экспериментов прикрывался вставкой из алюминия ( $d = 0.8$  см) или комбинированной вставки из алюминия ( $d = 0.8$  см) и свинца ( $d = 0.8$  см, тормозное излучение электронов с энергией 300 keV ослабляется в 10 раз).

Помимо рентгеновского регистрировалось также и сверхвысокочастотная (СВЧ) компонента излучения. В частности, средствами СВЧ-радиометрии исследовалась активность на частоте второй и третьей гармоник (для рабочего магнитного поля) электронных циклотронных колебаний. Полученные данные также попадали на АЦП, где происходила их оцифровка и обработка.

Измерения активности в оптическом диапазоне ограничивались регистрацией излучения линии  $H_\alpha$ . Наличие заметного уровня интенсивности излучения в этой спектральной области служило четким признаком возбуждения, а также ионизации частиц рабочего газа.



**Рис. 2.** Сигналы СВЧ-излучения (40 GHz) (a), ленгмюровского (b) и магнитного зондов (c), жесткого рентгеновского излучения (d) и  $H_{\alpha}$  (e) без использования ВЧ-инжекции для двух значений давления рабочего газа (1 —  $P = 3.5 \cdot 10^{-6}$  Pa; 2 —  $P = 7 \cdot 10^{-7}$  Pa).

Усредненная величина плотности плазмы в объеме удержания определялась с помощью методов СВЧ-рефлектометрии и СВЧ-интерферометрии.

### Описание эксперимента

Необходимость предварительной ионизации в торсатроне У-3М возникла в связи с затруднением ВЧ-пробоя рабочего газа. Это выражалось как в нестабильности промежутка времени от подачи ВЧ-напряжения на антенну до момента пробоя от импульса к импульсу, так и в отсутствие пробоя в течение ВЧ-импульса. Обычно при ВЧ-пробое в магнитном поле эффективность ионизации нейтрального газа зависит от энергии электронов, ускоряемых вдоль магнитных силовых линий продольной электрической компонентой ВЧ-поля, излучаемой антенной. Кроме того, плотность нейтрального газа, в котором происходит ускорение электронов, должна быть такова, чтобы в интервале между соударениями электронов с атомами электроны могли снова набирать энергию, достаточную для ионизации. Эти физические

процессы являются основой для осуществления ВЧ-пробоя и создания начальной плазмы и в значительной степени влияют на длительность всей стартовой стадии ВЧ-создания плазмы, в течение которой происходит наращивание плотности плазмы.

В настоящей работе представлены результаты экспериментов, посвященных оптимизации ВЧ-пробоя рабочего газа в области удержания торсатрона У-3М. Исследовались возможности стимулирования пробоя путем внесения в объем удержания плазмы дополнительной СВЧ-мощности на частотах, близких электронной циклотронной, за несколько сотен миллисекунд до непосредственного создания и нагрева основной плазмы.

СВЧ-мощность вводилась в объем удержания в момент времени, когда магнитное поле имело значение порядка 0.8 kG на переднем фронте импульса магнитного поля. Как показали предыдущие исследования природы убегающих электронов в торсатроне У-3М, именно на этой стадии в камере торсатрона возникает плазма, являющаяся источником потоков ускоренных заряженных частиц. Ранее неоднократно указывалось на то,

что причиной появления высокоэнергетических частиц в объеме удержания является вихревое электрическое поле, возникающее в результате временной вариации напряженности магнитного поля (полоидальной составляющей).

В нашем случае введение дополнительной мощности в период активного формирования потоков слабостолкновительных ускоренных частиц в объеме удержания плазмы значительным образом усиливает поток ускоренных частиц, который существует в течение всего импульса магнитного поля и при взаимодействии с ВЧ-полем и начальной плазмой облегчает пробой рабочего газа.

### Предварительные результаты, подтверждающие существование убегающих электронов

Выход жесткого рентгеновского излучения на фронте импульса магнитного поля наблюдался ранее и без введения в объем удержания ВЧ-мощности. Одновременно с этим наблюдается выброс заряженных частиц на зонды, расположенные на периферии системы. Выброс частиц сопровождается выходом  $H\alpha$ - и СВЧ-излучений. В соответствии с этими измерениями был сделан вывод о том, что потоки высокоэнергетических электронов формируются на фронтах импульса магнитного поля. Интенсивность потока убегающих электронов является чувствительной по отношению к изменению давления рабочего газа в камере (рис. 2).

Для изучения процесса формирования потока частиц измерялся ток в области удержания плазмы с помощью пояса Роговского. Ток в области удержания формируется на фронтах импульса магнитного поля. Направление движения частиц потока меняется в зависимости от знака временной производной напряженности магнитного поля.

Измерения, проводимые с помощью периферийных ленгмюровских зондов (потенциал  $-170$  В), показывают, что формирование потока коррелирует с выбросом электронов на периферию объема удержания. Одновременно с этим проводились измерения напряжения на обходе, изменение которого соответствовало фронтам импульса магнитного поля (рис. 3).

### Усиление потока убегающих электронов

В сценарии самостоятельного рождения убегающих электронов имеет место процесс возникновения плазмы, которая является источником ускоряемых частиц (вторичные убегающие электроны) (рис. 2).

Было сделано предположение, что усилить поток убегающих электронов можно увеличением количества частиц на стадии образования плазмы. Для этой цели использовался дополнительный разряд, создаваемый с помощью СВЧ-генератора на частоте  $2.45$  GHz, мощностью  $0.5$ – $1$  kW, включаемый в момент достижения

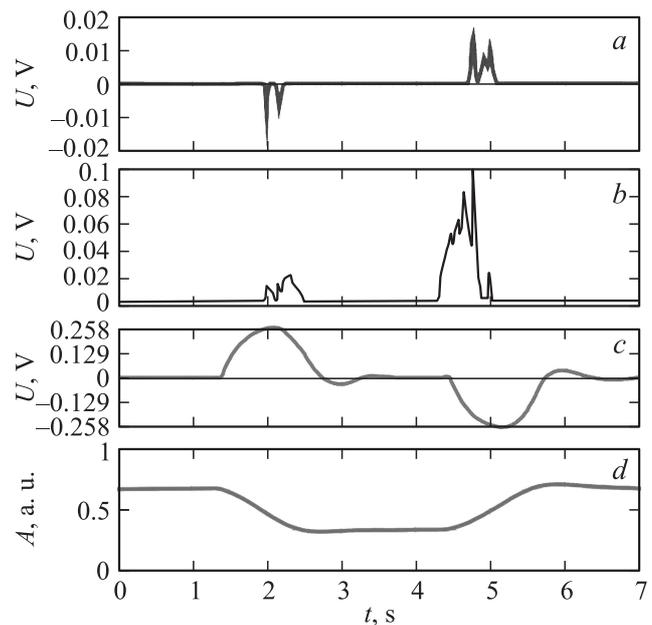


Рис. 3. Сигналы с пояса Роговского (а), ленгмюровского зонда (b), тороидальной петли (c), а также магнитного зонда (d).

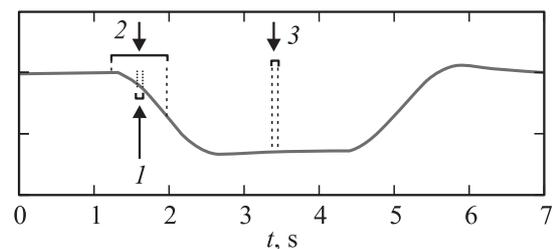
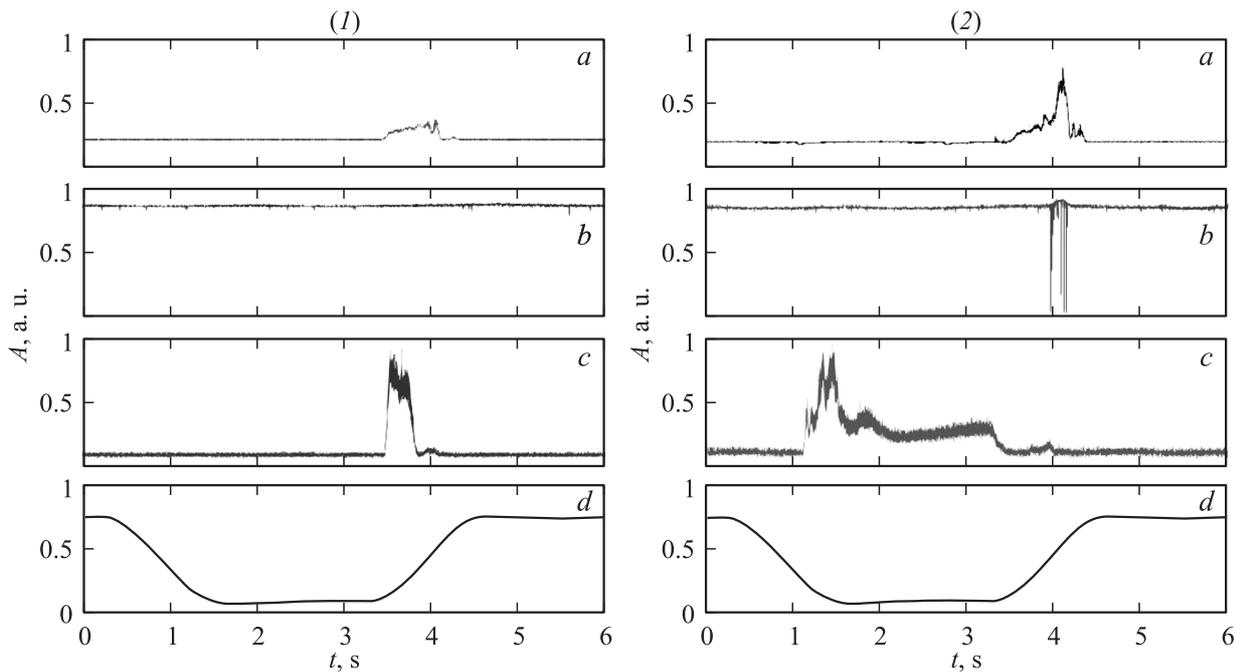


Рис. 4. Сценарий СВЧ-стимуляции потока „убегающих“ электронов. 1 — СВЧ-импульс, 2 — интервал перемещения СВЧ-импульса, 3 — ВЧ-импульс.

напряженности магнитного поля величины  $0.8$  kG (электронный циклотронный резонанс) на время от  $50$  до  $500$  ms. При этом создавалась плазма с плотностью порядка  $n_e = 5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ , которая измерялась микро-волновым интерферометром (рис. 4).

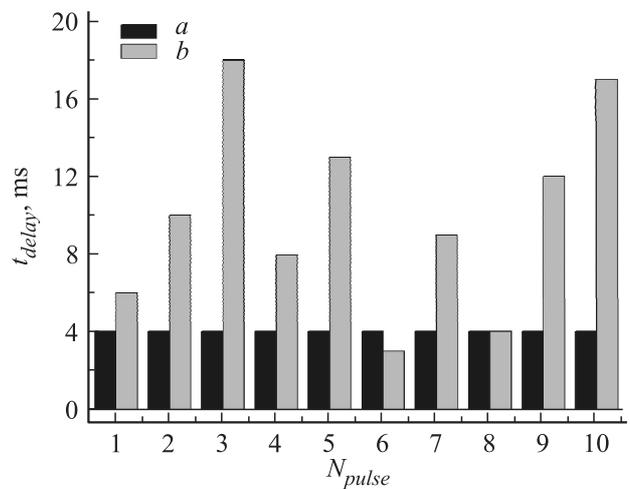
При таком стимулировании потока убегающих электронов СВЧ-ионизацией на электронной циклотронной частоте на переднем фронте импульса магнитного поля наблюдалось увеличение выхода частиц на пристеночный электростатический зонд ( $-170$  В) и усиление жесткого рентгеновского излучения на заднем фронте импульса магнитного поля. Также увеличивалась интенсивность СВЧ-излучения в диапазоне  $60$  GHz (рис. 5).

Также показано изменение амплитуды СВЧ-излучения ( $60$  GHz) при подаче ВЧ-импульса генератора „Каскад-1“ на антенну. Видно уменьшение сигнала СВЧ-излучения при включении ВЧ-импульса. Это изменение зависит от введенной ВЧ-мощности (рис. 6).



**Рис. 5.** Сигналы с зонда Ленгмюра (*a*), датчика жесткого рентгеновского излучения (*b*), СВЧ-излучения (60 GHz) (*c*) и магнитного зонда (*d*), без и с стимулированием потока убегающих электронов (*1* и *2* соответственно) ( $P = 8 \cdot 10^{-5}$  Па).

Усиление потока убегающих электронов на стадии их возникновения позволило стабилизировать пробой рабочего газа в тороиде У-3М при подаче ВЧ-импульса от генератора „Каскад-1“ (рис. 7). На приведенном рисунке демонстрируется стабильность временного промежутка (холостой ход) от начала ВЧ-импульса до момента пробоя при стимулировании потока убегающих электронов. В отличие от этого режим работы без стимулирования убегающих электронов характеризуется

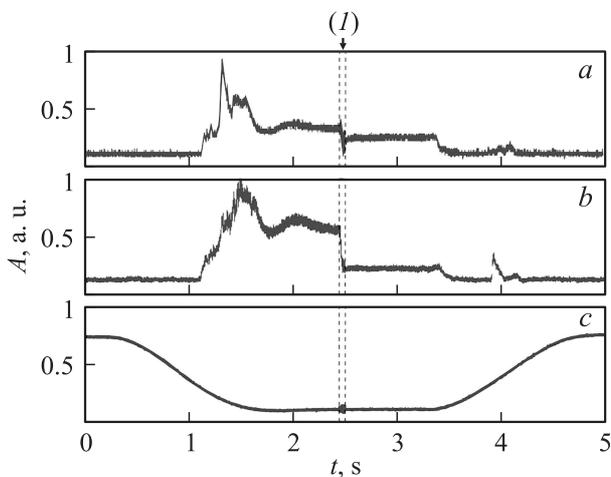


**Рис. 7.** Время задержки между началом импульса инжекции ВЧ-мощности и началом разряда (холостой ход) со стимулированием и без стимулирования потока убегающих электронов: *a* — стимулирование убегающих электронов, *b* — обычный режим.

сильной нестабильностью холостого хода или вообще отсутствием пробоя.

### Выводы

Потоки убегающих электронов возникают на фронтах импульса магнитного поля за счет ускорения фоновых



**Рис. 6.** Взаимодействие потоков убегающих электронов с ВЧ-полем и начальной плазмой (*I* — ВЧ-импульс). *a* — СВЧ-излучение (60 GHz),  $U_{k1} = 3$  kV; *b* — СВЧ-излучение (60 GHz),  $U_{k1} = 5$  kV; *c* — магнитный зонд.

электронов тороидальным вихревым электрическим полем и их размножением с образованием начальной плазмы, которая служит основным источником убегающих электронов.

Поток убегающих электронов может быть усилен (стимулирован) дополнительной инъекцией СВЧ-энергии в область удержания торсатрона У-3М на фронте импульса магнитного поля с частотой, соответствующей электронному циклотронному резонансу, которая позволяет увеличить количество заряженных частиц начальной плазмы.

Усиление потока убегающих электронов позволяет стабилизировать пробой рабочего газа в области удержания при подаче ВЧ-энергии на антенны и тем самым оптимизировать условия создания и нагрева плазмы в торсатроне У-3М.

Рассматриваемое явление говорит о том, что убегающие электроны в торсатроне У-3М могут играть активную роль в процессе пробоя рабочего газа в области удержания как с применением стимулирования потока убегающих электронов, так и без него.

В заключение хотелось бы поблагодарить диагностическую группу в составе Павличенко Р.О., Кулага А.Е., Заманов Н.В., Шаповал А.Н., Славный А.С., Солодовченко С.И., Штань А.Ф., а также всю инженерную группу торсатрона Ураган-3М.

## Список литературы

- [1] *Bernstein W., Chen F.F., Heald M.A., Kranz A.Z.* // The Physics of Fluids. 1958. Vol. 1. N 5. P. 430–437.
- [2] *Rodríguez-Rodrigo L., López-Fraguas A., Gabriel A.* // Rev. Sci. Instrum. 1999. Vol. 70. P. 645.
- [3] *Тарасов М.И.* Потоки заряженных частиц в плазме и их флуктуации в линейных и тороидальных магнитных конфигурациях: канд. дис. 01.04.08. Харьков. 2012. 140 с.
- [4] *Gurevich A.V., Milikh G.M., Roussel-Dupre R.* // Phys. Lett. A. 1992. Vol. 165. P. 463–468.
- [5] *Gurevich A.V., Sergeicev K.F., Sychov I.A., Roussel-Dupre R., Zybin K.P.* // Phys. Lett. A. 1999. Vol. 260. P. 269.
- [6] *Gurevich A.V., Mesyats G.A., Zybin K.P.* et al. // Phys. Lett. A. 2011. Vol. 375. P. 2845.
- [7] *Gochelashvili K.S., Demjanov A.V., Kochetov Y.V.* // Laser Physics. 1993. Vol. 3. P. 140.
- [8] *Бурченко П.Я., Василенко Б.Т., Волков Е.Д., Николаев Р.М., Потапенко В.А., Толок В.Т.* Взаимодействие пучка убегающих электронов с плазмой в стеллараторе. Препринт ФТИ АН УССР № 284/Р-098, Харьков 1966.
- [9] *Красовицкий В.Б., Раздорский В.Г.* // Украинский физ. журн. 1980. Т. 25. № 2. С. 235–243.
- [10] *Lozin A.V., Moiseenko V.E.* et al. // Plasma Phys. Rep. 2013. Vol. 39. N 8. P. 624–631.
- [11] *Залеский Ю.Г., Курилко П.И., Назаров Н.И., Плюснин В.В., Швец О.М.* // Физика плазмы. 1989. Т. 15. Вып. 12. С. 1424–1429.