

10; 04

ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ СИЛЬНОТОЧНОГО РЭП В ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ПЛОТНЫЕ ГАЗОВЫЕ СМЕСИ

Н. А. Кондратьев, Г. И. Котляревский, В. И. Сметанин

Представлены результаты экспериментов на ускорителе «Тонус» по взаимодействию РЭП с газовыми средами ($N_2 : O_2$, SF_6 , He, Ar), которые рассматриваются как реагенты плазмохимических систем. Прослеживается динамика взаимодействия РЭП с этими газами. На основе большого числа экспериментов делается вывод о том, что при развитии неустойчивости в таких плотных газовых смесях РЭП смещается как единое целое. Развивающаяся с ростом давления неустойчивость является ответственной за срыв тока.

Сильноточные релятивистские электронные пучки (РЭП), характеризующиеся высокой плотностью мощности в импульсе, при инжекции в газовую среду могут стать источником сильной ионизации и средством создания неравновесной плазмы, причем степень неравновесности при этом существенно выше, чем при возбуждении другими способами. Поэтому представляется целесообразным использование таких пучков для возбуждения рабочего объема неравновесного плазмохимического реактора, осуществления синтеза окислов азота, разложения углекислого газа и воды, получения порошков тугоплавких соединений и ряда других приложений, необходимых в различных технологиях и промышленном производстве [1]. Однако при реализации задачи инициирования плазмохимических реакций с помощью сильноточных РЭП могут возникать некоторые особенности, связанные с развитием неустойчивости пучка в газовой среде. Необходимо отметить, что на наличие таких особенностей было указано ранее в работе [2] в исследованиях по взаимодействию РЭП с нейтральным газом. Взаимодействие пучка с наводящимися в среде индукционными токами может привести к ухудшению характеристик плазмохимического реактора на РЭП за счет развития неустойчивостей различных типов. Наводящийся на фронте импульса плазменный ток направлен навстречу току пучка, а расталкивающее действие этих двух противоположно направленных токов может привести к выбросу пучка на стенки камеры, ограничивающей рабочий объем реактора. Поэтому в данной работе основное внимание было уделено исследованию особенностей динамики сильноточного РЭП при его взаимодействии с газовой смесью $N_2 : O_2 = 4 : 1$ в режимах устойчивого и неустойчивого распространения, так как именно эта смесь рассматривается в качестве исходной в работе плазмохимического реактора, в синтезе окислов азота NO и т. п.

Работа проводилась на ускорителе «Тонус-1» [3]. Визуальное наблюдение за поведением пучка проводилось нами по схеме, аналогичной использованной в [4]. Пучок инжектировался в трубу дрейфа длиной $L = 0.6$ м, к концу которой вакуумноплотно стыковалась камера диаметром 0.8 м, основания которой были параллельны направлению распространения РЭП. Через прозрачное основание камеры проводилось фотографирование открытыми затворами плазменного канала, образуемого РЭП. Характерный вид фотографий при различных давлениях смеси в системе взаимодействия приведен на рис. 1. По интегральным фотографиям свечения плазмы, вызываемого РЭП, было установлено, что

в диапазоне давлений 20—750 Тор наблюдается вероподобный след «развала» пучка. Из анализа большого количества фотографий следует, что местоположение и характер развала пучка не изменяются в диапазоне давлений $P = 50—750$ Тор. С уменьшением давления от 50 до 1 Тор наблюдается стабилизация пучка при удлинении участка стабильного распространения, и при $P = 1$ Тор пучок распространяется устойчиво. При высоких давлениях ($P > 50$ Тор) возникающая неустойчивость приводит к резкому изменению траектории электронного пучка на расстоянии $L = 0.8—1$ м от анода ускорителя. Срыв трансформировки РЭП в плотной газовой смеси (рис. 1) можно представить или как симметричное смещение частиц пучка в радиальном направлении, подобное сильной расфокусировке, или как колебание РЭП в качестве единого целого. С целью выяснения этого в камере разместились 4 токовых датчика $\varnothing 120$ мм в плоскости, перпендикулярной направлению распространения РЭП, один из которых размещался строго по оси РЭП, а три других — со смещением под углом 120° . Проведенные измерения показали, что в каждый момент времени ток пучка регистрировался только одним из приборов, входящих в комбинацию, что убедительно доказывает смещение пучка относительно направления распространения как целого, а вид фотографий (рис. 1) является результатом интегральной фотографии большого количества раскачиваний пучка. В работе [6] также наблюдалось смещение пучка от прямолинейной траектории при его распространении в трубах дрейфа в газе высокого давления. Отклонение пучка как целого, наблюдаемое с помощью ЭОП, авторы [6] связывают с развитием резистивной неустойчивости пучка. Нами было установлено, что к устранению «развала» и стабилизации РЭП в диапазоне давлений 20—750 Тор ведет размещение за анодом металлической сетки прозрачностью 70—80%. Отметим, что размещение проводящей сетки за анодом ускорителя могло приводить к стабилизации пучка в наших экспериментах за счет изменения

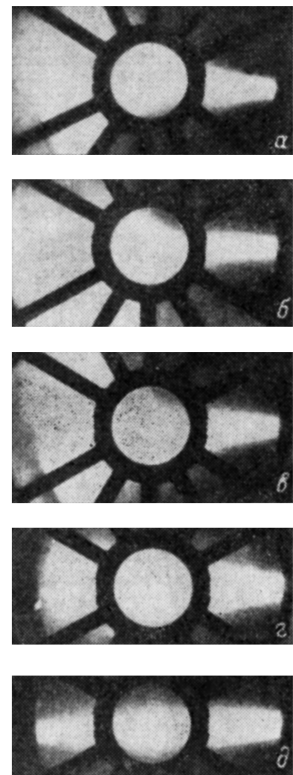


Рис. 1. Свечение газа при взаимодействии РЭП с газовой смесью $N_2 : O_2 = 4 : 1$.

Р, Тор: а — 700, б — 300, в — 70, г — 10, д — 1.

целого ряда параметров пучка, например поперечного разброса пучка по энергиям, либо за счет простого снижения величины инжектируемого тока на 20%. Дальнейшие исследования были связаны с измерениями характеристик пучка, осуществляющего взаимодействие с газовой смесью в трубах дрейфа для обоих случаев. В первом случае пучок электронов ускорителя с энергией электронов 1 Мэв и током пучка $I_b = 20$ кА инжектировался в трубу дрейфа с внутренним диаметром 92 мм. Во втором случае условия инъекции были те же, только за анодом на расстоянии 10 мм устанавливалась металлическая сетка прозрачностью 80%. Такой режим классифицирован нами как устойчивый. На различных расстояниях от анода ускорителя измерялись ток пучка электронов и полная энергия пучка. Соответствующие зависимости (рис. 2) наглядно показывают различие в процессах взаимодействия в двух указанных выше режимах. В случае устойчивого распространения пучка зависимость тока от давления имеет монотонный характер. В этом режиме наблюдается уменьшение величины транспортируемого тока в области малых ($P < 1$ Тор) и больших ($P > 200$ Тор) давлений. В области малых давлений основные потери пучка связаны с его неполной зарядовой нейтрализацией и, как следствие этого, «эрозией» фронта импульса тока. Вследствие «эрозии» происходит затягивание фронта импульса тока и уменьшение амплитуды вихревого поля. Это приводит к отсутствию то-

новой нейтрализации и, следовательно, к дополнительным потерям тока пучка. При повышении давления (в диапазоне 0.3—1 Тор) время пробоя (т. е. появления заметной токовой компенсации) сокращается и становится значительно

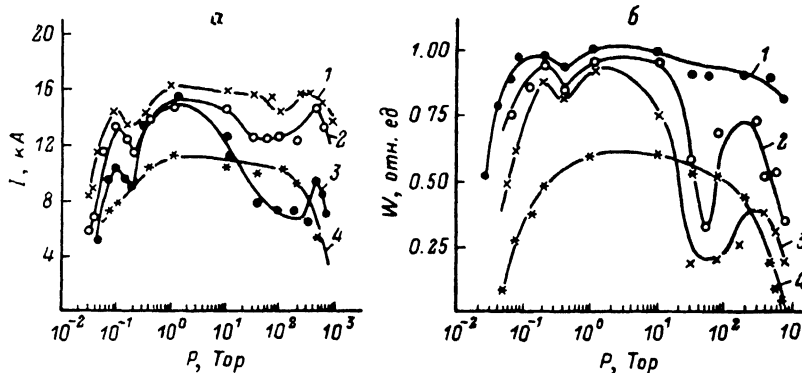


Рис. 2. Зависимость тока пучка (а) и его полной энергии (б) на расстоянии L от давления газовой смеси.

L , м: 1 — 0.8, 2 — 1.05; 3, 4 — 1.65 (4 — устойчивый пучок).

меньше длительности фронта тока пучка. Это приводит к силовой компенсации на всей длине пучка, и потери тока уменьшаются. Очевидно, что оптимальные условия устанавливаются при $P \approx 1$ Тор. В области больших давлений ($P \gg \gg 1$ Тор) наблюдаемое уменьшение транспортируемого тока связано с сильным рассеянием пучка на нейтральных атомах.

Осциллограммы тока пучка (рис. 3) подтверждают приведенные рассуждения. При малых давлениях смеси $N_2 : O_2$ в камере дрейфа потери пучка происходят на передней части импульса тока. При давлении $P=1$ Тор импульс тока в конце взаимодействия полностью повторяет форму инжектируемого импульса.

Описанный ход зависимости наблюдается при устойчивом распространении пучка. Появление неустойчивости пучка проявляется в виде резких изменений характера зависимостей (рис. 2) с ярко выраженными максимумами потерь. Характерно, что при появлении указанных неустойчивостей наблюдаются потери задней части пучка и сокращение длительности тока (рис. 3, б). Указанные неустойчивые режимы распространения пучка в больших объемах наблюдались в [4] при инжекции РЭП в камеру, характерные размеры которой значительно больше диаметра пучка. В области низких давлений наблюдались длинно-

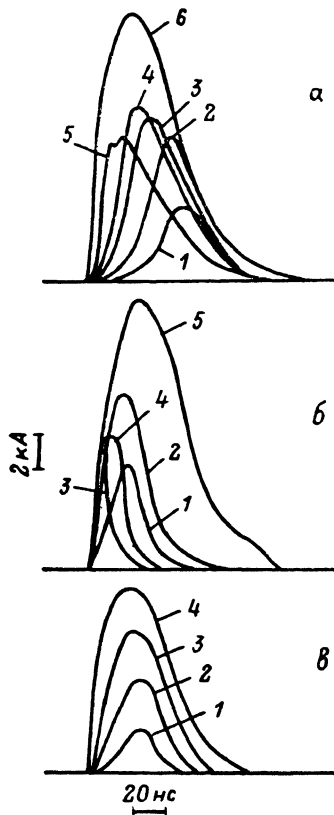


Рис. 3. Осциллограммы тока пучка на расстоянии 1.65 м при различных давлениях газовой смеси.

а: 1 — $P=0.04$, 2 — 0.06, 3 — 0.1, 4 — 0.13, 5 — 0.2, 6 — 1 Тор; б: 1 — $P=750$, 2 — 200, 3 — 80, 4 — 95, 5 — 1 Тор; в: 1 — 760, 2 — 530, 3 — 200, 4 — 10 Тор (устойчивый пучок).

волновые неустойчивости типа «змейка» с поперечным смещением пучка порядка диаметра. При взаимодействии пучка с плотным газом при давлении порядка 100 Тор в этой же работе наблюдалась быстроразвивающаяся неустойчивость, которая приводила к полному «развалу» пучка. Авторы, отмечая хорошую пов-

торияемость развития этой неустойчивости, связывают ее появление с прохождением электронного пучка в больших объемах. Сопоставление результатов наблюдения неустойчивости в больших объемах и в трубах дрейфа позволяют сделать однозначный вывод об одинаковом характере неустойчивости в обоих случаях. А сокращение длительности импульса тока при $P > 1$ Тор и прохождении пучка в трубах дрейфа, диаметр которых сравним с диаметром пучка, связано с выбросом части пучка на стенки трубы при нарушении прямолинейности его распространения на некотором расстоянии от его переднего фронта. Размещение за анодом металлической сетки стабилизирует пучок, как и в больших объемах. Об этом свидетельствуют результаты рис. 2, 3, на которых такой режим классифицирован как устойчивый. Характерной особенностью устойчивого режима взаимодействия является сравнительно монотонный ход зависимостей $I_b = f(P)$ (рис. 2, а) и $W = f(P)$ (рис. 2, б), а сокращение длительности

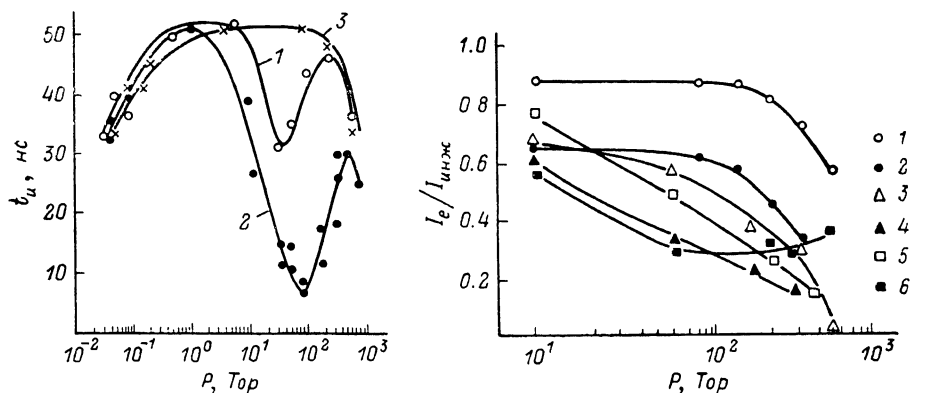


Рис. 4. Зависимость длительности импульса тока РЭП на полувысоте от давления газовой смеси в трубе дрейфа длиной L .

L , м: 1 — 1.05; 2, 3 — 1.65 (3 — устойчивый пучок).

Рис. 5. Зависимость отношения тока пучка, прошедшего через ТД (I_e) к току, инжектируемому в начале ТД I_{inj} , от давления различных газов и длины ТД.

1, 2 — аргон ($L=70, 140$ см соответственно); 3, 4 — SF_6 ($L=70, 105$ см соответственно); 5 — He ($L=165$ см); 6 — $N_2 : O_2$ ($L=165$ см).

импульса идет как со стороны переднего, так и со стороны заднего фронтов (рис. 3, в), максимум тока практически не сдвигается во времени относительно максимума инжектируемого тока.

Таким образом, при взаимодействии пучка с плотной газовой смесью существуют диапазоны давлений, в которых нарушается токопрохождение пучка в результате возникновения неустойчивости. Развивающаяся неустойчивость приводит как к уменьшению амплитуды тока, так и к сокращению его длительности. Зависимость длительности импульса тока пучка от условий взаимодействия с $N_2 : O_2=4 : 1$ приведена на рис. 4. Измерение длительности производилось на полувысоте импульса тока. Длительность, показанная на рис. 4, фактически соответствует моменту начала развития неустойчивости, т. е. уходу пучка из апертуры цилиндра Фарадея. В режиме сильной неустойчивости ($P > > 100$ Тор, большие расстояния) иногда можно было наблюдать появление последующих колебаний, соответствующих раскачиванию пучка. Максимальное сокращение длительности тока на всех длинах взаимодействия наблюдается при давлении смеси $P \sim 100$ Тор. Сокращение длительности при больших давлениях $P > 1$ Тор происходит из-за прекращения прохождения задней части пучка и сильно зависит от длины взаимодействия. В области малых давлений сокращение длительности выражено слабее. Наряду со смесью $N_2 : O_2$ нами были исследованы и другие газы, которые также могут являться исходными в работе плазмохимического реактора на сильноточных РЭП. Инжекция РЭП осуществлялась в те же трубы дрейфа (ТД), что и для смеси $N_2 : O_2$, заполняемые одним из газов: аргон, SF_6 или гелием. Ток пучка регистрировался ва-

куумированным цилиндром Фарадея, расположенным в конце ТД. На рис. 5 приведена зависимость эффективности транспортировки для указанных газов от давления среды и длины ТД. Эффективность транспортировки определялась в виде отношения тока пучка, прошедшего через ТД, к току, инжектируемому в начале ТД. Зависимости на рис. 5 качественно показывают влияние среды на эффективность транспортировки. По-видимому, эффективность транспортировки определяется параметрами плазменного канала, нарабатываемого РЭП, особенно временная зависимость проводимости канала. В свою очередь эти параметры зависят от большого числа атомных и молекулярных процессов, включая и химию каналов. Этим объясняется зависимость эффективности транспортировки от среды (т. е. сорта газа). Детальное изучение временной зависимости проводимости плазменного канала и его химической эволюции может объяснить влияние среды на эффективность транспортировки. Выбор сорта газа для использования в качестве рабочего может определяться необходимой длиной взаимодействия (L) РЭП с этим газом, а также давлением газовой среды, необходимой для этих целей. С этих позиций можно рассматривать полученные результаты. Так, для проведения химических реакций или создания неравновесной плазмы на сравнительно малых длинах взаимодействия и при давлениях газовой среды до 400 Тор перспективным может являться SF_6 , где на длине в 70 см и давлении 420 Тор токопрохождение полностью нарушается, тогда как для тех же длин и давлений токопрохождение в аргоне составляет 65 % от инжектируемого тока.

В заключение необходимо отметить, что проведенный комплекс исследований по изучению неустойчивости РЭП в газовых смесях, рассматриваемых в качестве исходных для плазмохимического реактора, позволяет определить условия взаимодействия и параметры пучка, при которых действие неустойчивости будет оказывать минимальное влияние на режим работы реактора. Определение же возможного механизма нарушения токопрохождения для других газов будет являться объектом дальнейших исследований в этом направлении.

Литература

- [1] *Норман Г. Э., Полак Л. С., Сопин П. И., Сорокин Г. А.* // Синтез соединений в плазме, содержащей углеводороды / Под ред. Л. С. Полака. М., 1985. С. 33—79.
- [2] *Валлис Г., Зауэр К., Зюндер Д.* и др. // УФН. 1974. Т. 113. Вып. 3. С. 435—462.
- [3] *Глейзер И. З., Диденко А. Н., Дронова Л. П.* и др. // Атомная энергия. 1974. Т. 36. С. 378—380.
- [4] *Петров А. В., Рябчиков А. И., Тузов В. А.* и др. // Изв. вузов. Физика. 1978. Вып. 7. С. 144—146.
- [5] *Аранчук Л. Е., Вихарев В. Д., Горев В. В.* и др. // ЖЭТФ. 1984. Вып. 4. С. 1180—1199.

Научно-исследовательский
институт ядерной физики
при Томском политехническом
институте им. С. М. Кирова

Поступило в Редакцию
13 июля 1987 г.

В окончательной редакции
30 сентября 1988 г.