

03;04;10;12

Определение эффективности влияния начального участка инжекции на устойчивость сильноточного РЭП, распространяющегося в газовом объеме плазмохимического реактора

© Н.А. Кондратьев, В.И. Сметанин

Научно-исследовательский институт ядерной физики при Томском политехническом университете,
634050 Томск, Россия
e-mail: alex@npi.tpu.ru

(Поступило в Редакцию 15 декабря 2002 г.)

Представлены экспериментальные результаты по определению эффективности влияния условий начального участка инжекции на устойчивость сильноточного релятивистского электронного пучка (РЭП), распространяющегося в газовой среде плазмохимического реактора (ПР). Генерируемый ускорителем „Тонус“, РЭП с энергией электронов $E_e = 1 \cdot 10^6$ eV, током пучка $I_b = 10\text{--}22 \cdot 10^3$ А и длительностью импульса $t = 60 \cdot 10^{-9}$ с инжектировался в заполненный воздухом реактор диаметром 0.1 м. Реактор состоял из двух секций, имеющих соответствующие длины $L_1 = 0.3\text{--}1.0$ м и $L_2 = 1.1\text{--}2.5$ м, при этом общая длина системы не превышала 3.5 м. Первая секция заполнялась воздухом при давлении $P_1 = 0.8\text{--}1.5$ Торг, а давление воздуха во второй секции варьировалось в диапазоне $P_2 = 0.1\text{--}760$ Торг. Регистрация тока сильноточного РЭП (I_b), прошедшего через две секции ПР, осуществлялась секционированным вакуумированным цилиндром Фарадея, а эффективность токопрохождения пучка определялась как отношение I_b/I_{inj} , где I_{inj} — ток пучка, измеренный в месте его инжекции в реактор. Показано, что первая секция реактора, имеющая оптимальные параметры, оказывает стабилизирующее действие на РЭП с плотностью тока до $3 \cdot 10^3$ А/см и позволяет достичь эффективной длины второй рабочей секции реактора, заполненной газом при различных давлениях, до $L_2 = 25\text{--}35 \cdot L_{bet}$, где L_{bet} — бетатронная длина пучка.

Повышенный интерес к прикладному использованию сильноточных релятивистских электронных пучков (РЭП), взаимодействующих с различными газовыми средами, предопределен их уникальными возможностями по передаче энергии высокой плотности газу, проведением целого ряда селективных плазмохимических реакций. Одним из аспектов этих приложений, являющимся в настоящее время объектом многочисленных исследований [1–3], безусловно являются проблемы устойчивости распространения РЭП в газовой среде. Режим и характер взаимодействия сильноточного РЭП с газовой средой определяется из заданных условий работы плазмохимического реактора, при которых в одном случае необходимо обеспечить эффективную объемную рекуперацию энергии РЭП в газ в процессе осуществления ряда отдельных химических реакций и тогда может быть рекомендован режим с крупномасштабной резистивной неустойчивостью пучка [4] или в другом случае накладываются жесткие требования на устойчивость распространения пучка с минимально возможными потерями в процессе его транспортировки в объеме реактора при нормированных параметрах газовой среды (состав, давление, температура и т.д.). Регулирование в таких широких пределах режимов распространения сильноточного РЭП в газовых объемах реакторов, не использующих сильных фокусирующих внешних магнитных полей, на наш взгляд, стало возможным на основе ранее выполненных исследований, обнаруживших достаточно эффективное стабилизирующее действие начального участка инжекции (транспортировки) сильноточного РЭП [5].

Предметом представленной работы стали полученные результаты по определению границ применимости этой эффективной стабилизации РЭП, которые могут быть использованы при практическом определении и выборе режимов работы плазмохимического реактора.

Схема экспериментов была практически аналогична используемой нами в [5], при этом параметры РЭП генерируемого сильноточным ускорителем „Тонус“, были следующие: энергия электронов $E_e = 1 \cdot 10^6$ eV, ток пучка I_b варьировался в пределах $10\text{--}22.5 \cdot 10^3$ А, а использование диафрагм различного диаметра размещенных на выходе из ускорителя за анодной фольгой позволяло добиваться изменения плотности тока в пределах $0.5\text{--}3.0 \cdot 10^3$ А/см², при этом длительность импульса тока пучка оставалась неизменной и составляла $t_e = 60 \cdot 10^{-9}$ с. В ходе экспериментов сильноточный РЭП инжектировался в плазмохимический реактор, выполненный в виде металлической трубы дрейфа диаметром 0.1 м и состоящий из двух секций, имеющих соответствующие длины $L_1 = 0.3\text{--}1.0$ м и $L_2 = 1.1\text{--}2.5$ м, при этом общая длина системы не превышала 3.5 м (рис. 1). Для создания различающихся по давлению условий секции были отделены друг от друга титановой фольгой толщиной $50 \cdot 10^{-6}$ м. Первая секция заполнялась воздухом при давлении $P_1 = 0.8\text{--}1.5$ Торг, при котором, как было показано ранее в [5], эффективность токопрохождения РЭП во второй рабочей секции плазмохимического реактора достаточно высока. В свою очередь давление воздуха во второй секции варьировалось в широком диапазоне давлений $P_2 = 0.1\text{--}760$ Торг.

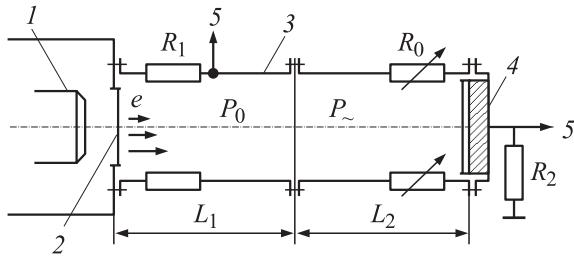


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 — катод, 2 — анод, 3 — труба дрейфа, 4 — цилиндр Фарадея, 5 — к осциллографу.

Известно, что развитие крупномасштабной резистивной неустойчивости сильнооточного релятивистского электронного пучка и прежде всего шланговой неустойчивости приводит к нарушению процесса его распространения. Шланговая неустойчивость (hose instability) пучка в плазме конечной проводимости была рассмотрена в значительном числе работ, например в [6]. Механизм неустойчивости состоит в том, что на частицы, движущиеся в собственном магнитном поле, при малых случайных колебаниях (изгибах) пучка начинает действовать центробежная сила. Смещение РЭП в поперечном направлении под действия этой силы на расстояние порядка собственного радиуса происходит за время, большее времени диффузии магнитного поля в окружающей плазме $t_d = 4\pi\sigma r_e/c^2$, где σ — проводимость плазмы, r_e — радиус пучка. Для РЭП, смещающегося в поперечном направлении относительно оси распространения, смещение его магнитного поля, зависящее от проводимости плазмы, происходит медленнее и отстает по фазе от смещения пучка. Движение же пучка относительно собственного магнитного поля индуцирует в плазме обратный ток I_p , который пространственно разделен с током РЭП I_b , и магнитное расталкивание встречных токов приводит к дальнейшему увеличению амплитуды смещения пучка. Возрастающая амплитуда поперечных колебаний РЭП является следствием развития резистивной шланговой неустойчивости (resistive hose instability) (РШН). Подобные колебания приводят к срыву процесса транспортировки на расстояниях, не превышающих 1–3 бетатронные длины $L_{bet} = \pi r_e (I_A/I_b)^{0.5}$, где I_A — ток Альфвена, I_b и r_e — ток и радиус пучка соответственно [2]. Для РЭП, имеющего параметры, аналогичные используемым нами в данных исследованиях, L_{bet} составляет порядка 0.3–0.35 м. Исходя из этого условия, была выбрана длина первой секции плазмохимического реактора, позволяющая предотвратить процесс развития крупномасштабной неустойчивости РЭП.

В таблице приведены основные параметры сильнооточных релятивистских электронных пучков и режимы генерации, используемые в экспериментах, а также соответствующие этим параметрам величины бетатронных длин (L_{bet1} — 1 бетатронная длина, L_{bet3} — 3 бетатронные длины). Аналогично [5] регистрация

сильноточного релятивистского электронного пучка, прошедшего через две секции плазмохимического реактора, осуществлялась с помощью секционированного вакуумированного цилиндра Фарадея, располагавшегося в конце второй секции и позволяющего определять наряду с амплитудными значениями тока РЭП также и его пространственно-временную динамику в реакторе. Эффективность токопрохождения пучка в реакторе определялась как отношение I_b/I_{inj} , где I_b — ток пучка электронов, зарегистрированных в конце плазмохимического реактора (длина $L = 3\text{--}3.5$ м); I_{inj} — ток РЭП, измеренный в месте его инжекции в реактор (за анодной фольгой ускорителя, длина $L = 0.01$ м). Результаты определения эффективности токопрохождения РЭП в зависимости от давления воздуха во второй секции плазмохимического реактора для различных режимов генерации приведена на рис. 2 и 3, при этом давление воздуха в первой секции составляло $P_1 = 1$ Торр, и оставалось неизменным в ходе проведения всех дальнейших исследований. Данные представленных графиков достаточно наглядно отражают основные характерные особенности распространения сильнооточного РЭП в реакторе для соответствующих условий. При выборе режима взаимодействия РЭП с газовой средой плазмохимического реактора, в котором необходимо обеспечить условия относительно устойчивого распространения пучка электронов на длинах взаимодействия порядка $(20\text{--}30)L_{bet}$, со всей очевидностью должна быть рекомендована схема реактора с первой секцией („газовой ячейкой“), имеющей оптимальное давление газа P_1 и длину L_1 .

Сравнительный анализ эффективности транспортировки РЭП в режимах с „газовой ячейкой“ (рис. 2, режим 1–5; рис. 3, режим 6–8) и режима без первой секции с током РЭП $I_b = 22.5$ кА (рис. 2) и $I_b = 15.5$ кА (рис. 3) соответственно определяет явное преимущество реактора, построенного по первой схеме, при которой эффективность транспортировки РЭП может быть повышена на 40–50%, а при давлениях газовой среды $P_2 > 80$ Торр эта схема становится абсолютно единственным способом, обеспечивающим относительно устойчивое прохождение РЭП в газовом объеме реактора

Основные параметры и режимы генерации РЭП

Режим генерации РЭП	Ток РЭП I_b , 10^3 А	Диаметр РЭП D_b , см	Плотность тока РЭП J_e , 10^3 А/см ²	Бетатронная длина L_{bet1}/L_{bet3} , см
1	22.5	5	1.14	11.5/34.4
2	17.5	5	0.89	13.0/39.0
3	12.8	5	0.65	15.2/45.6
4	18.5	2.8	3.00	7.0/21.5
5	10.1	2.8	1.64	9.8/28.7

Диафрагмы на аноде ускорителя

6	5.0	2.8	0.81	13.62/40.8
7	15.5	2.8	2.52	7.73/23.2
8	5.0	4.0	0.41	19.48/58.45

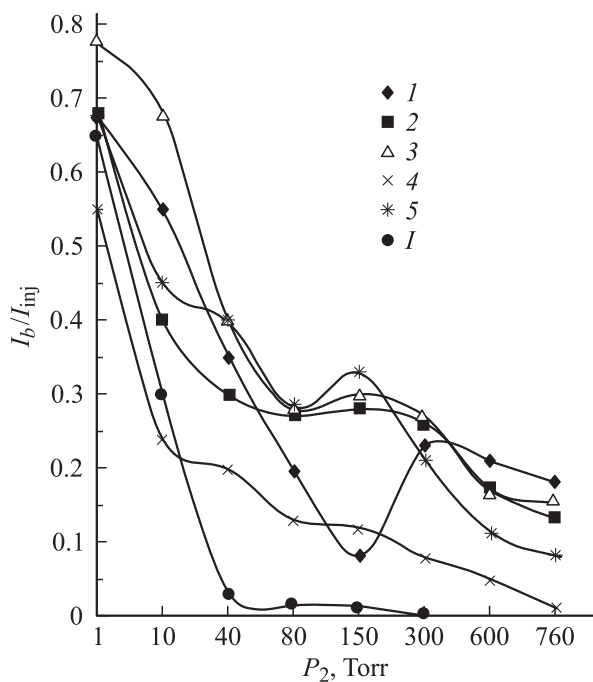


Рис. 2. Зависимость эффективности токопрохождения сильнооточного РЭП в зависимости от давления воздуха во второй секции ПР, для различных режимов генерации. (1–6) давление газа в первой секции $P_1 = 1$ Torr; I — режим без первой секции, ток РЭП=22.5 кА.

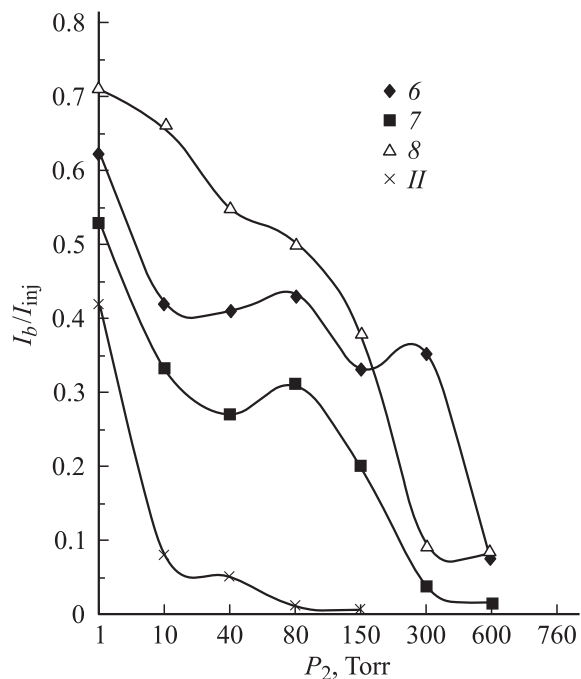


Рис. 3. Зависимость эффективности токопрохождения сильнооточного РЭП в зависимости от давления воздуха во второй секции ПР, для различных режимов генерации. (6–8) давление газа в первой секции $P_1 = 1$ Torr; II — режим без первой секции, ток РЭП=15.5 кА.

на длинах взаимодействия порядка ~ 3 м. Наличие оптимальных условий транспортировки на участке инжекции сильнооточного РЭП в реактор сводит к минимуму влияние плазменных процессов ускоряющего анод-катодного промежутка, на ответственность которых за первоначальную раскачку поперечных колебаний пучка электронов указывалось ранее [5]. В этом случае нарушение процесса транспортировки РЭП в газовой среде плазмохимического реактора обусловлено в основном ионизационными процессами столкновительного характера, хотя при этом нельзя исключать возможного существенного (при определенных условиях) вклада крупномасштабной неустойчивости пучка. Однако если эта неустойчивость и имеет место быть, то со значительно меньшей амплитудой пространственного инкремента, чем это было зафиксировано в режиме без первой секции („газовой ячейки“) реактора. Так, увеличение плотности тока до величин порядка $3 \cdot 10^3$ А/см и более приводит к возникновению поперечных колебаний РЭП, характерных для развивающейся крупномасштабной неустойчивости, и резкому снижению эффективности транспортировки (рис. 2, режим генерации I). Данные же по режимам без первой секции являются достаточно характерными для абсолютно явного проявления действия крупномасштабной резистивной неустойчивости сильнооточного РЭП, рассмотренной подробно в более ранних исследованиях [7].

На рис. 4 и 5 представлены соответствующие таким режимам распределения тока пучка по сечению канала взаимодействия, полученные с помощью секционирован-

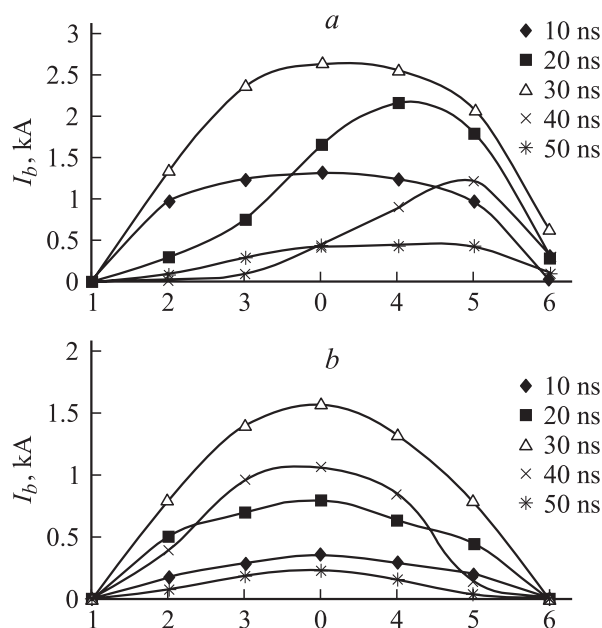


Рис. 4. a, b — распределение тока пучка по сечению канала транспортировки в ПР, при токе инжекции $I_b = 22.5 \cdot 10^3$ А, давление воздуха во второй секции плазмохимического реактора $P_1 = 150$ Torr (a) и $P_2 = 300$ Torr (b), при длине $L_2 = 2.5$ м с использованием первой секции с $P_1 = 1$ Torr и $L_1 = 0.3$ м. Общая длина системы 3 м.

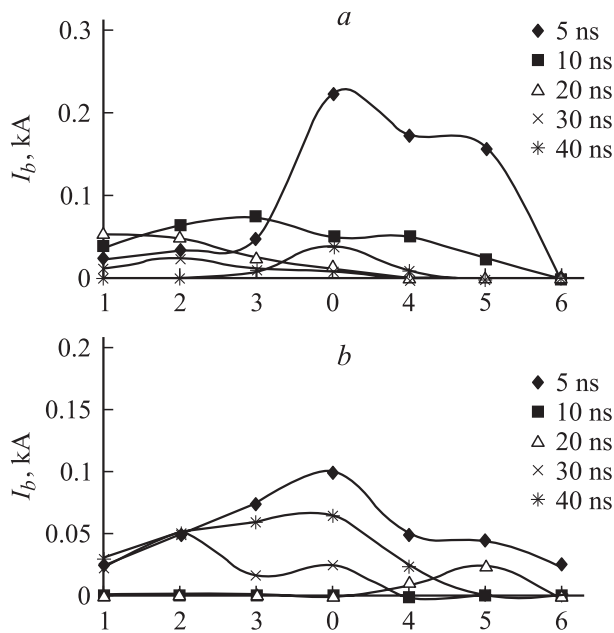


Рис. 5. Распределение тока пучка по сечению канала транспортировки в ПР при токе инъекции $I_b = 22.5 \cdot 10^3$ А. Режим без использования первой секции плазмохимического реактора. Давление воздуха во второй секции ПР при длине $L_2 = 2.5$ м: $P_2 = 40$ (а), 80 Torr (б).

ного цилиндра Фарадея, подтверждающие вышеприведенное сравнение.

Таким образом, проведенный комплекс исследования наглядно показал возможности эффективного регулирования условиями взаимодействия сильноточного релятивистского электронного пучка с газовой средой плазмохимического реактора. К основным закономерностям, выявленным в ходе данной работы, можно отнести следующие.

Устойчивый режим взаимодействия и транспортировки сильноточного релятивистского электронного пучка в газовом объеме плазмохимического реактора может быть обеспечен использованием первой секции реактора, имеющей длину не менее $3L_{bet}$ и заполненной воздухом с оптимальным давлением $P_1 = 1$ Torr.

Стабилизирующее действие первой секции реактора, имеющей такие оптимальные параметры, устойчиво проявляется при плотностях тока РЭП до $3 \cdot 10^3$ А/см, при этом эффективная длина второй рабочей секции плазмохимического реактора, заполненной газом вплоть до атмосферных давлений, может достигать $L_2 = (25-35)L_{bet}$.

Увеличение плотности тока РЭП выше $3 \cdot 10^3$ А/см, равно как и не использование первой секции реактора с оптимальными параметрами, может быть рекомендовано в случае, когда работа плазмохимического реактора должна проходить в условиях действия крупномасштабной неустойчивости с амплитудой поперечных колебаний пучка, значительно превышающих его диаметр и в отдельных случаях приводящих к его выбросу на стенки реактора.

Список литературы

- [1] Rusanov V.D., Fridman A.A. // Phys. Chemically Active Plasma. Moscow, 1984. P. 230–232.
- [2] Norman G.E., Polak L.S., Sopin P.I. et al. // The Synthesis of Compounds in Plasma Containing Hydrocarbons / Ed. L.S. Polak. Moscow, 1985. P. 3–79.
- [3] Hubbard R.F., Fernsler R.F., Slinker S.P. et al. // 5th Intern. Conf. on High Power Particle Beams. San Francisco, 1983. P. 370.
- [4] Кондратьев Н.А., Котляревский Г.И., Сметанин В.И. // ЖТФ. 1988. Т. 58. Вып. 10. С. 1915–1923.
- [5] Kondratiev N.A., Smetanin V.I., Surikov Yu.P. // Nucl. Inst. and Meth. Phys. Res. 1991. Vol. 53. P. 229–231.
- [6] Lauer E.J., Briggs R.J., Fessenden T.J. et al. // Phys. Fluids. 1978. Vol. 21. P. 1344.
- [7] Lee E.P., Brandenburg J.E. // Phys. Fluids. 1988. Vol. 31. P. 3403.