

03;04;10;12

Двухимпульсный режим генерации сильноточных релятивистских электронных пучков и их транспортные характеристики в газовой среде 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 двух импульсной генерации и транспортировке сильноточных релятивистских электронных пучков (РЭП) в газовой среде плазмохимического реактора (ПР). Реализованные на ускорителе „Тонус“ модифицированные схемы формирования высоковольтных импульсов позволили осуществить генерацию двух следующих друг за другом сильноточных РЭП длительностью $60 \cdot 10^{-9}$ s. В первом схемном варианте уровень мощности в импульсах был соответственно $2 \cdot 10^9$ и $4-9.6 \cdot 10^9$ W при временной паузе между импульсами до $500 \cdot 10^{-9}$ s. Во втором варианте мощность импульсов соответствовала $1.8 \cdot 10^9$ и $1.6 \cdot 10^{10}$ W, а временная пауза — $160 \cdot 10^{-6}$ s. Исследованы транспортные характеристики РЭП при инжекции в ПР, заполненный газовой смесью $N_2:O_2$ и имеющей длину 1.4 м. Проведены измерения проводимости плазмы образованной пучками. Показано, что в сравнении с одноимпульсными режимами генерации сильноточных РЭП равного уровня мощности и длительности предложенные схемы позволяют более эффективно, на 35-45%, обеспечивать условия сохранения транспортных характеристик РЭП в объеме реактора.

Введение

Полученные к настоящему времени результаты многочисленных исследований и прикладных технологических разработок в области плазмохимических технологий, использующих сильноточные релятивистские электронные пучки (РЭП), свидетельствуют о перспективности данного направления для различных отраслей промышленности [1,2]. Основные проблемы в реализации таких плазмохимических технологий лежат в области управления и контроля протекающих реакций, их стабильной воспроизводимости. Вид приложений накладывает определенные требования не только на условия, при которых протекают плазмохимические реакции: давление, температура и состав среды взаимодействия, но и на сам плазмохимический реактор (ПР): материал стенок, геометрические размеры, элементы диагностики. В свою очередь такая важная характеристика ПР, как его производительность, напрямую зависящая от его геометрических параметров, может быть ограничена развитием различного рода неустойчивостями РЭП, в частности крупномасштабной резистивной неустойчивостью, приводящей к выбросу пучка на стенки реактора на сравнительно коротких длинах распространения РЭП. Целый ряд плазмохимических технологий, используемых в металлургии при утилизации отходов производств и в синтезе углеводородов, требует сохранения транспортных характеристик пучка по всей длине плазмохимического реактора. Этому наиболее важному, на наш взгляд, аспекту и были посвящены проведенные исследования, а именно изучению возможных способов эффективного сохранения транспортных характеристик сильноточного

РЭП, распространяющегося в газовой среде ПР. Здесь и далее под транспортной характеристикой РЭП мы будем понимать отношение тока пучка электронов I_e , прошедших через газовую среду реактора, к току пучка в месте инжекции в ПР I_{inj} , т.е. I_e/I_{inj} . Заметим, что в данных исследованиях фокусирующие внешние магнитные поля не использовались, а были исследованы так называемые „пассивные“ методы повышения эффективности распространения РЭП в газовом объеме ПР. К таким методам в полной мере можно отнести а) газодинамический способ и б) распространение пучка в условиях предварительно созданного плазменного канала.

Суть газодинамического способа распространения сильноточных РЭП в газовом объеме ПР основана на условиях, при которых в плотной газовой среде создается канал пониженной плотности с давлением газовой среды P_1 , много меньшим, чем начальное давление P_0 , окружающее этот канал ($P_1/P_0 < 1$), по которому и будет осуществлено прохождение пучка. В идеальном случае P_1 — это давление газовой среды, при котором сильноточный РЭП распространяется в условиях бессилового дрейфа (для воздуха $P_1 = 1$ Torr). Исследование процессов нагрева и динамики плотности газа при инжекции электронного пучка были ранее выполнены авторами ряда работ [3-5]. Так, в [3] было отмечено, что для РЭП с энергией $E_e = 1 \cdot 10^6$ eV и током пучка $I_b = 8 \cdot 10^3$ A с длительностью импульса $60 \cdot 10^{-9}$ s, создающего энерговклад в газ на уровне $Q = 0.3$ J/cm³, величина уменьшения плотности газа в канале распространения $P_1/P_0 = 0.4$ (где P_0 — давление атмосферного воздуха $= 1.29$ kg/m³, а P_1 — давление в канале). Время достижения такого значения

P_1/P_0 составляла $80\text{--}100 \cdot 10^{-6}$ s. Образование подобного канала пониженного давления возможно при достаточно сильном импульсном нагреве этой области газовой среды вследствие диссипации в ней энергии стороннего источника. Такой энерговклад в газовую среду плазмохимического реактора можно обеспечить следующими способами: электрический взрыв тонкой проволоки, электрический разряд в газовой среде, создание протонной лазерной искры, нагрев газа сильноточным РЭП. Все эти способы характеризуются рядом преимуществ и недостатков, однако оценка их сравнительной эффективности не являлась предметом данного исследования. На наш взгляд, наиболее предпочтительным с технологической точки зрения является последний метод, использующий нагрев газа сильноточным РЭП. В этом случае применяемая система генерации, должна позволять формирование нескольких РЭП, следующих друг за другом через регулируемый временной интервал и далее инжектируемых в канал плазмохимического реактора. Эффективное сохранение транспортных характеристик РЭП в газовом объеме ПР возможно при его распространении по каналам пониженной плотности, создаваемым такими же пучками, а временная пауза между ними будет определяться параметрами РЭП и условиями его энергоклада в газ.

Вторым „пассивным“ методом, позволяющим сохранить транспортные характеристики РЭП по всей длине плазмохимического реактора, является инжекция и распространение электронного пучка в заранее приготовленной плазме (плазменном канале заданной проводимости). В этом случае характер процессов зарядовой нейтрализации и токовой компенсации будет определяться параметрами пучка и плазмы. В первых экспериментальных работах [6,7] отмечалось, что при инжекции пучка в плазму происходит сильная нейтрализация магнитного поля тока пучка, а ток РЭП может намного превосходить предельный альфвеновский. Однако с увеличением плотности плазмы, в которую осуществляется инжекция пучка электронов, происходит уменьшение длины свободного пробега плазменных электронов и увеличивается диссипация обратного тока [8]. В результате этого магнитная компенсация должна прекратиться через определенное время после инжекции пучка. Из этого следует, что для сохранения транспортных характеристик РЭП, распространяющегося в плазмохимическом реакторе, в объеме которого предварительно создана плазма, необходимо найти оптимальное соотношение плотности плазмы и параметров пучка. В [9] на примере численной модели, а затем и в экспериментальных исследованиях [10] такие оптимальные соотношения были найдены, и это позволило более чем в два раза повысить эффективность транспортировки РЭП.

В представленных исследованиях и газодинамический режим распространения РЭП в газовом объеме ПР и режим инжекции пучка в предварительно созданную в реакторе плазму осуществлялся с помощью схемы генерации позволяющей формировать два сильноточных

РЭП, следующих друг за другом. Поиск оптимальных условий распространения РЭП, позволяющих эффективно сохранить его транспортные характеристики, проводился с помощью регулировки мощности пучков и временной паузы между ними.

Экспериментальное оборудование

Исследования были проведены с использованием в качестве основного генератора РЭП сильноточного электронного ускорителя (СЭУ) „Тонус“ [11], работающего по схеме генератор импульсного напряжения (ГИН)–двойная формирующая линия (ДФЛ)–вакуумный диод электронной пушки (ЭП). При срабатывании ГИН запасенная им энергия (максимально до 28 kJ) через зарядную индуктивность передается на зарядку ДФЛ, выполненной по схеме Блюмляйна [12] с волновым сопротивлением, равным $p_1 = p_2 = 12 \Omega$ (рис. 1, а). При срабатывании коммутирующего разрядника (I) на нагрузке $Z = p_1 + p_2$ через время $t = L/V$ (где L — длина линии, V — скорость распространения электромагнитной волны в линии) формируется импульс высокого напряжения длительностью $t_p = 2L/V$ и амплитудой равной величине зарядного напряжения, который и коммутируется на вакуумный планарный диод ЭП. В качестве диэлектрика в ДФЛ используется трансформаторное масло. Катод ЭП был выполнен из нержавеющей стали диаметром 0.025 m. Анодом служила титановая фольга толщиной $50 \cdot 10^{-6}$ m, отделяющая ЭП от газового объема плазмохимического реактора. Вакуум в ЭП поддерживался на уровне $4 \cdot 10^{-5}$ Торг. В ходе проводимых экспериментов параметры генерируемого одноимпульсного РЭП были следующими: энергия электронов $1\text{--}1.2 \cdot 10^6$ eV, ток пучка $I_b = 12\text{--}20 \cdot 10^3$ A, длительность импульса $t_p = 60 \cdot 10^{-9}$ s. Регистрация напряжения на ДФЛ и ускоряющего напряжения на ЭП осуществлялась с помощью емкостных делителей напряжения (6–8). Полный ток диода регистрировался резистивным шунтом обратного тока (ШОТ) (9), а выведенный ток пучка электронов — вакуумированным цилиндром Фарадея (ЦФ). Плазмохимический реактор пристыковывался к аноду ЭП ускорителя и представлял собой металлический цилиндр диаметром 0.092 m, длиной 1.4 m (рис. 1, d), заполнявшийся газовой смесью $N_2 : O_2 = 4 : 1$ при различных давлениях.

Для проведения экспериментов в условиях распространения РЭП через заранее подготовленную плазму оптимальных параметров, которая „нарабатывается“ в плотной газовой среде ПР первым сильноточным пучком электронов, была модифицирована схема генерации на ускорителе „Тонус“ на представленную на рис. 1, с. Принципиальное отличие данной схемы от ранее используемой для одноимпульсной генерации заключается в том, что разрядник P_1 , ранее осуществлявший коммутацию между средней линией ДФЛ и заземленным корпусом ускорителя, теперь коммутирует энергию между средней и внутренней линиями ДФЛ.

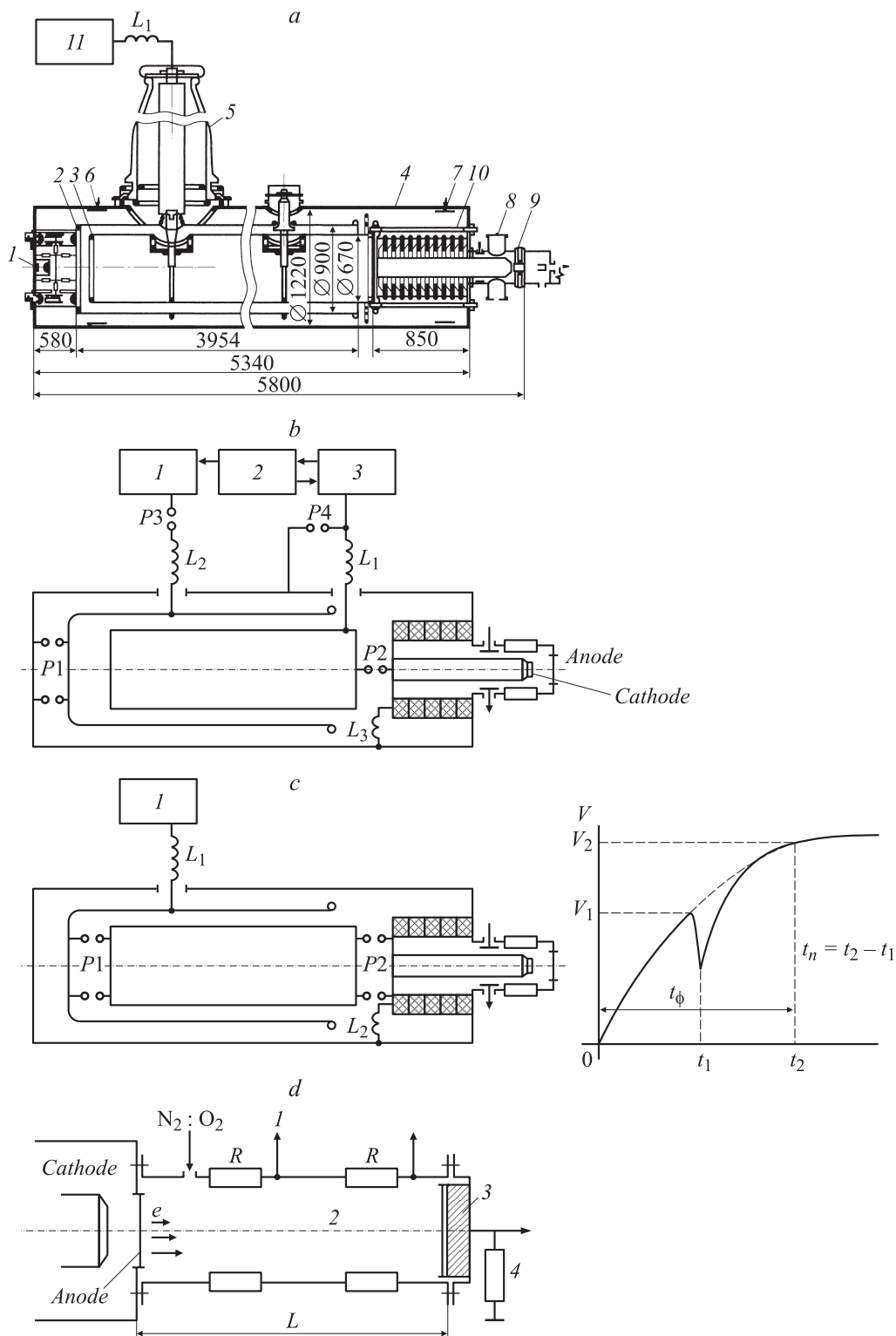


Рис. 1. Схема экспериментального оборудования. *a* — сильноточный ускоритель электронов „Тонус“ для одноимпульсного режима генерации РЭП: 1 — разрядник, 2 — средняя линия ДФЛ, 3 — внутренняя линия ДФЛ, 4 — корпус ускорителя, 5 — высоковольтный изолятор, 6–8 — емкостные делители напряжения, 9 — шунт обратного тока (ШОТ), 10 — электронная пушка, 11 — генератор импульсного напряжения (ГИН₁); *b* — схема для генерации двух сильноточных РЭП следующих друг за другом через временную паузу $t_n = 160 \cdot 10^{-6}$ s; 1 — ГИН₁, 2 — система синхронизации, 3 — ГИН₂; *c* — схема для генерации двух сильноточных РЭП следующих друг за другом через временную паузу t_n до $500 \cdot 10^{-9}$ s; 1 — ГИН₁; *d* — схема плазмохимического реактора и регистрации параметров РЭП: 1 — к осциллографу, 2 — плазмохимический реактор (ПР), 3 — цилиндр Фарадея (ЦФ), 4 — $R_{ЦФ}$.

При этом разрядная индуктивность L_2 отделена от внутренней линии разрядником P_2 и включена между корпусом ускорителя и фланцем катододержателя ЭП. Такая схема позволяет генерировать два сильноточных РЭП в течение времени, равного длительности фронта импульса ГИН $t_f = 1-2 \cdot 10^{-6}$ s. Работа схемы заключается в следующем: при срабатывании (коммутации энергии) ГИН ускорителя через зарядную индуктивность L_1 начинает заряжаться ДФЛ. При достижении амплитуды напряжения, соответствующей первому импульсу, в момент времени t_1 (рис. 1, c) срабатывает разрядник P_2 , при этом на катод ЭП поступает импульс высокого напряжения и в анод-катодном (АК) зазоре осуществляется генерация первого сильноточного РЭП. При коммутации разрядника P_2 внутренняя линия ДФЛ оказывается подключенной к корпусу ускорителя через индуктивность L_2 .

Регулировка амплитуды первого импульса напряжения U_1 выполняется подбором времени момента коммутации t_1 в разряднике P_2 , что в свою очередь достигается изменением давления газовой смеси ($N_2 + 10\%SF_6$) в этом разряднике. Далее, первый сильноточный РЭП через анодную фольгу инжектируется в газовый объем ПР.

При достижении на средней линии максимума напряжения U_2 от ГИН в момент времени t_2 происходит коммутация разрядника P_1 и через разрядник P_2 , электрическая прочность которого не успевает восстановиться, второй импульс высокого напряжения прикладывается к АК зазору, где и формируется второй сильноточный РЭП, также инжектируемый в ПР. Амплитуда второго высоковольтного импульса напряжения U_2 может также регулироваться моментом коммутации t_2 разрядника P_1 , изменением давления его газового наполнения.

Данная схема генерации позволяет формировать два импульса высокого напряжения как одинаковой амплитуды (если коммутация P_1 относительно P_2 осуществляется через временную паузу $t_n = t_2 - t_1 = 10-100 \cdot 10^{-9}$ s, так и с увеличением амплитуды второго импульса напряжения, что достигается увеличением времени t_n в максимуме до $500 \cdot 10^{-9}$ s. Увеличение временной паузы между импульсами $t_n > 500 \cdot 10^{-9}$ s переводит вакуумный диод ускорителя в режим, близкий к короткому замыканию, из-за заполнения всего АК зазора плотной взрывоэмиссионной плазмой, образующейся во время формирования первого РЭП. В исследованиях транспортных характеристик РЭП, генерируемых по данной схеме и распространяющихся в газовом объеме ПР, были использованы сильноточные электронные пучки следующих параметров. Первый РЭП: энергия электронов $E_e = 0.5-0.6 \cdot 10^6$ eV, ток пучка $I_e = 3-4 \cdot 10^3$ А при длительности импульса $t_p = 60 \cdot 10^{-9}$ s; второй РЭП: энергия электронов $E_e = 0.5-0.6 \cdot 10^6$ eV, ток пучка $I_e = 8-16 \cdot 10^3$ А при длительности импульса $t_p = 60 \cdot 10^{-9}$ s. Временная пауза между импульсами изменялась в пределах $t_n = 60-500 \cdot 10^{-9}$ s. В ходе экспериментов определялась зависимость эффективности токопрохождения второго сильноточного РЭП,

определяемая как отношение тока пучка электронов I_e , прошедшего через ПР при различном давлении в нем газовой смеси $N_2 : O_2$, регистрируемым вакуумированным ЦФ, к току инжекции I_{inj} , измеренному на входе в ПР (за анодной фольгой ускорителя). Эффективность токопрохождения (транспортная характеристика) определялась в зависимости от давления газовой среды в ПР, длины распространения пучка L , а также от величины временной паузы между РЭП.

Разновидностью описанного выше метода генерации или его внешним аналогом по своей сути является вторая модифицированная схема генерации двух сильноточных РЭП, использующая ускоритель „Тонус“ и позволившая исследовать газодинамический режим распространения двух электронных пучков с временной паузой между ними до $300 \cdot 10^{-6}$ s. На рис. 1, b представлена такая схема, в которой был использован дополнительный маслonaполненный ГИН₂ с максимальным выходным импульсным напряжением $U_2 = 0.75 \cdot 10^6$ В, при этом уровень запасаемой в нем энергии соответствовал $W = 18.5$ кДж. ГИН₂ через зарядную индуктивность L_1 был подключен к внутренней линии ДФЛ и обеспечивал ее зарядку. Совместная работа двух генераторов импульсного напряжения ГИН₁ и ГИН₂ по зарядке ДФЛ обеспечивалась используемой системой синхронизации и управлением временем срабатывания разрядников P_1 , P_2 и P_3 соответственно. При зарядке внутренней линии ДФЛ от ГИН₂ после коммутации разрядника P_2 на ЭП подавался импульс высокого напряжения и в АК зазоре осуществлялась генерация первого РЭП. Через регулирующую систему синхронизации временную паузу последующее срабатывание разрядника P_3 обеспечивало возможность произвести зарядку средней линии ДФЛ от ГИН₁. Далее коммутация управляемого разрядника P_1 позволяла через P_2 подать на ЭП высоковольтный импульс, который и обеспечивал генерацию второго РЭП в АК зазоре. Параметры сильноточных РЭП, генерируемые по такой схеме, были следующие. Первый РЭП: энергия электронов $E_e = 0.7 \cdot 10^6$ eV, ток пучка $I_e = 6-7 \cdot 10^3$ А при длительности импульса $t_p = 60 \cdot 10^{-9}$ s; второй РЭП: энергия электронов $E_e = 0.9-1.0 \cdot 10^6$ eV, ток пучка $I_e = 10-16 \cdot 10^3$ А при длительности импульса $t_p = 60 \cdot 10^{-9}$ s. Временная пауза между импульсами до $500 \cdot 10^{-6}$ s. Однако первоначально исследовать прохождение таких РЭП в газовой среде ПР удалось только при временной паузе между пучками, находящейся в интервале $300 \cdot 10^{-6} < t_n < 500 \cdot 10^{-6}$ s. Сокращению временного интервала между РЭП таких параметров препятствовало наличие плотной взрывоэмиссионной плазмы в АК зазоре, не рекомбинирующей за время, меньшее, чем $300 \cdot 10^{-6}$ s. Проведенные предварительные эксперименты показали, что достигнуть временного интервала между импульсами до $t_n < 300 \cdot 10^{-6}$ s позволяет введение ограничения на количественный (как следствие, и на концентрационный уровень) взрывоэмиссионной плазмы образуемой в диоде при формировании первого сильноточного РЭП. Это

ограничение достигалось некоторым уменьшением мощности в первом импульсе с $4.8 \cdot 10^9$ до $1.8 \cdot 10^9$ W. Таким образом, для повышения эффективности исследований газодинамического метода распространения РЭП была достигнута пауза между пучками на уровне $160 \cdot 10^{-6}$ s. Эта временная пауза является соразмерной с оптимальным временем, за которое достигается максимальное уменьшение плотности газовой среды в канале ПР после прохождения в нем сильноточного электронного пучка, обнаруженное авторами [3]. В целом как для первой модифицированной схемы генерации РЭП, так и для второй регулировка временной паузы между пучками была ограничена предельными частотными характеристиками вакуумного диода ускорителя, использующего взрывоэмиссионный катод.

Для получения дополнительной информации о параметрах плазмы, образованной первым и вторым РЭП в объеме плазмохимического реактора, в данных исследованиях было использовано устройство, подробно описанное в [13], которое позволяло определять уровень проводимости плазменных каналов, включая время распада плазмы.

Полученные результаты и их обсуждение

На рис. 2 и 3 представлены результаты определения транспортных характеристик второго сильноточного РЭП, для схемы реализующей метод с предварительно созданным плазменным каналом. Эффективность сохранения транспортных характеристик пучка определялась как отношение тока пучка I_e , прошедшего через ПР и регистрируемого вакуумированным цилиндром Фарадея, к току инжекции I_{inj} , измеренному на входе в ПР за анодной фольгой ускорителя. Данная характеристика исследовалась в ПР на различных расстояниях от места инжекции в зависимости от давления газовой смеси $N_2 : O_2$ в ПР и значения временной паузы между пучками. Эти результаты можно разделить на три условные группы, соответствующие временным диапазонам пауз между РЭП: $t_n =$ до $100 \cdot 10^{-9}$ s, $100-250 \cdot 10^{-9}$ s и $250-500 \cdot 10^{-9}$ s соответственно. Использование такого широкого диапазона временных интервалов между сильноточными РЭП преследовало цель определить оптимальные условия распространения второго РЭП при изменяющихся в этом случае параметрах плазмы, образованной первым пучком в газе. Изменение времени t_n позволяло изменять концентрацию плазмы и ее пространственную однородность на пути распространения второго сильноточного пучка электронов за счет процессов разлета и рекомбинации этой плазмы в объеме реактора. Как следует из приведенных данных, наиболее высокая эффективность транспортировки РЭП для достаточно широкого диапазона давлений газа $P = 10-400$ Торг для условий наших экспериментов сохраняется при временной паузе между импульсами уровня $t_n = 100-250 \cdot 10^{-9}$ s (рис. 2, b). Так, при длине

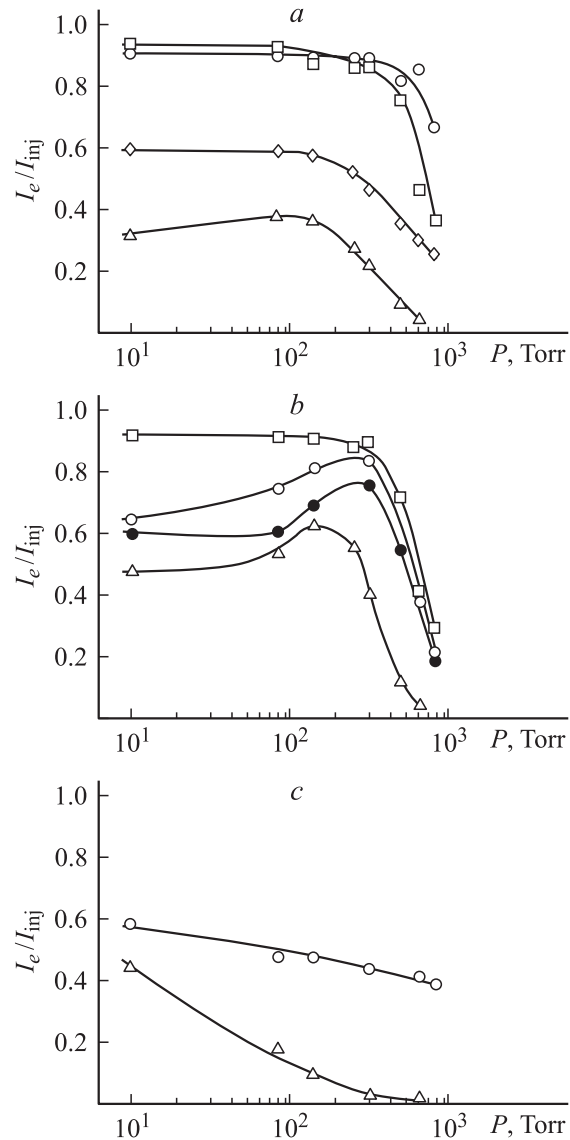


Рис. 2. Зависимость эффективности распространения второго сильноточного РЭП от величины временной паузы (t_n) между импульсами и длины транспортировки L : *a* — $t_n =$ до $100 \cdot 10^{-9}$ s; \circ — $L = 0.4$, \square — 0.75 , \diamond — 1.2 , \triangle — 1.4 m; *b* — $t_n = 100-250 \cdot 10^{-9}$ s; \square — 0.75 , \circ — 0.85 , \bullet — 1.2 , \triangle — 1.4 m; *c* — $t_n = 250-500 \cdot 10^{-9}$ s; \circ — $L = 0.4$, \triangle — 1.0 m.

распространения в реакторе $L = 1.2$ m и давлении газовой смеси $P = 300$ Торг эффективность составляет $I_e/I_{inj} = 0.75$. Характерные для данного режима осциллограммы ускоряющего напряжения и токов РЭП представлены на рис. 4. Полученная в двухимпульсном режиме для столь высоких значений давления газовой среды транспортная характеристика пучка значительно превосходит ранее полученные результаты, в том числе и для одноимпульсного режима распространения РЭП с энергией электронов $E_e = 1 \cdot 10^6$ eV. На рис. 3 представлены сравнительные характеристики эффективности для таких различных режимов генерации и распространения РЭП. Исследование транспортных характеристик

сильноточных РЭП проводилось при давлении газовой смеси в реакторе вплоть до атмосферного. Из результатов, представленных на рис. 3, *b*, следует, что двухимпульсный режим с оптимальной временной паузой между РЭП обеспечивает увеличение эффективности транспортировки пучка на 35–45% в сравнении с одноимпульсным режимом генерации с энергией электронов $E_e = 0.6 \cdot 10^6$ eV. При этом дистанция транспортировки увеличивается на 50%. Безусловно, что эти результаты могут быть использованы и весьма полезны при определении конструкции промышленных плазмохимических реакторов повышенной производительности.

В ходе экспериментальных исследований по определению транспортных характеристик двух сильноточных РЭП с временной паузой между ними t_n до $500 \cdot 10^{-9}$ s были осуществлены также измерения проводимости плазмы, нарабатываемой пучками в газе с использованием ранее апробированной методики и измерительного устройства [13]. Результаты этих измерений приведены

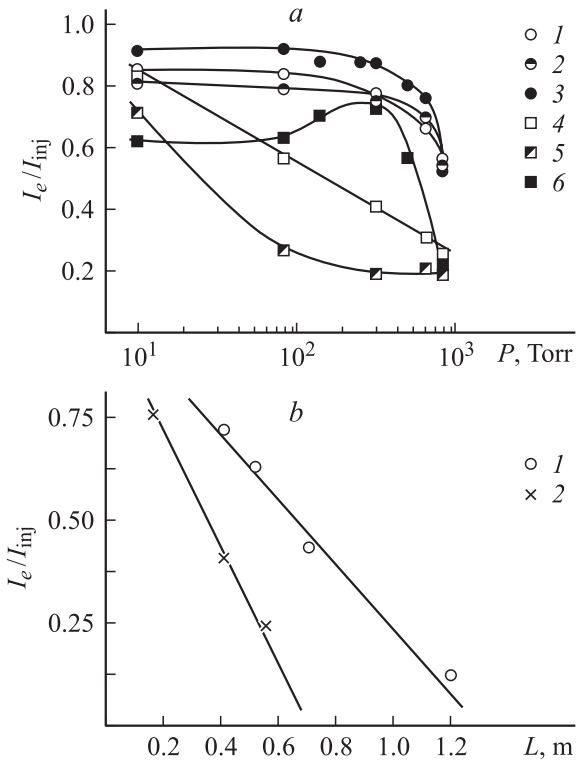


Рис. 3. *a* — транспортные характеристики одноимпульсного и двухимпульсного режимов генерации и распространения сильноточных РЭП: E — энергия электронов, I_{inj} — ток инъекции. $L = 0.6$ m: 1 — $E = 1 \cdot 10^6$ eV, $I_{inj} = 17 \cdot 10^3$ A; 2 — $E = 1 \cdot 10^6$ eV, $I_{inj} = 24 \cdot 10^3$ A; 3 — $E = 2$ импульса по $0.5 \cdot 10^6$ eV, I_{inj} второго РЭП = $15 \cdot 10^3$ A; $L = 1.4$ m: 4 — $E = 1 \cdot 10^6$ eV, $I_{inj} = 17 \cdot 10^3$ A; 5 — $E = 1 \cdot 10^6$ eV, $I_{inj} = 24 \cdot 10^3$ A; 6 — $E = 2$ импульса по $0.5 \cdot 10^6$ eV, I_{inj} второго РЭП = $15 \cdot 10^3$ A. *b* — транспортные характеристики одноимпульсного и двухимпульсного режимов генерации и распространения сильноточных РЭП в реакторе с атмосферным давлением газовой смеси $N_2 : O_2 = 4 : 1$. 1 — двухимпульсный режим $E = 2$ импульса по $0.5 \cdot 10^6$ eV, I_{inj} второго РЭП = $8 \cdot 10^3$ A; 2 — одноимпульсный режим $E = 0.6 \cdot 10^6$ eV, $I_{inj} = 10 \cdot 10^3$ A.

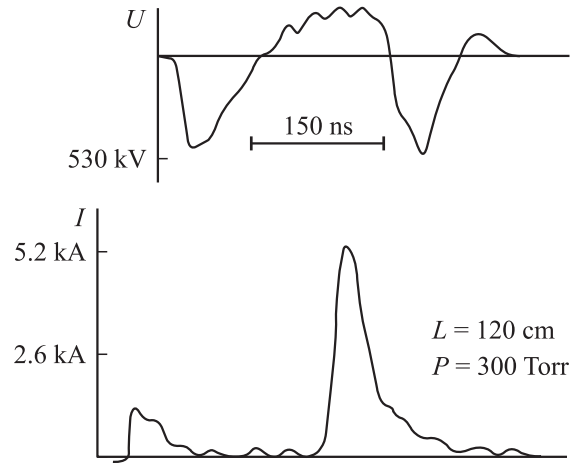


Рис. 4. Осциллограммы тока и напряжения для временной паузы между импульсами $t_n = 150 \cdot 10^{-9}$ s при давлении газовой смеси $P = 300$ Torr в ПР и длины распространения $L = 1.2$ m. Ток инъекции второго РЭП $I_{inj} = 8 \cdot 10^3$ A.

на рис. 5 для длины распространения РЭП $L = 0.3$ m. Полученные данные о проводимости плазмы в реакторе, а также зарегистрированные транспортные характеристики РЭП для соответствующих временных пауз дают основание предположить следующий процессный механизм для пучка и плазмы.

При временной паузе между двумя сильноточными электронными пучками в диапазоне $t_n =$ до $100 \cdot 10^{-9}$ s уровень концентрации плазмы, нарабатываемой первым пучком, в газе достаточно высок. Это обстоятельство может обуславливать значительное возрастание величины плазменного тока пучка, что в свою очередь может являться причиной возникновения неустойчивостей РЭП (вероятнее всего, резистивной шланговой [14]). Так как расталкивающее действие магнитных полей встречных и пространственно разделенных тока пучка и индуцируемого им обратного плазменного тока в этом случае усиливается, в конечном итоге это и может быть основной причиной возникновения поперечных колебаний пучка, в дальнейшем приводящих к его выбросу на стенки реактора. Подобные колебания приводят к срыву процесса транспортировки пучка на длинах, не превышающих ($I-3$) бетатронные длины [11] ($L_{bet} = nr_e(I_A/I_b)^{0.5}$, где I_A — ток Альфвена, I_b и r_e — ток и радиус пучка соответственно). Для пучков, имеющих параметры, аналогичные используемым нами в данных исследованиях, L_{bet} составит не более 0.1–0.15 m. Тем не менее взаимодействие второго сильноточного РЭП с плазмой высокой концентрации обеспечивает полную зарядовую компенсацию пучка и сокращает время достижения его полной токовой компенсации. Однако развитие неустойчивости РЭП может существенно снижать эффективность его транспортировки.

Для временной паузы между импульсами, равной $t_n = 100-250 \cdot 10^{-9}$ s, характерны условия, когда уровень концентрации плазмы, нарабатываемой первым РЭП,

значительно снижается, так как плазма за время этой паузы претерпевает рекомбинацию и разлет под действием градиентов температуры и концентрации. Для достаточно широкого диапазона давлений газовой смеси в плазмохимическом реакторе $P = 100\text{--}400$ Torr устанавливается оптимальное соотношение между концентрацией электронов пучка n_e и концентрацией частиц плазмы n_i подобно тому, которое имело место в работе [10] и приводило к значительному повышению эффективности транспортировки второго РЭП. Увеличение давления газовой смеси в реакторе до $P > 400$ Torr приводит к нарушению этого оптимального соотношения из-за изменения скорости рекомбинационных процессов в плазме, созданной первым пучком. Результаты измерения проводимости плазмы, представленные на рис. 5, свидетельствуют о том, что для давлений газа $P > 100$ Torr время распада плазмы, генерируемой первым РЭП, не превышает $200 \cdot 10^{-9}$ s. Соответственно для временной паузы между пучками в диапазоне $250\text{--}500 \cdot 10^{-9}$ s эта плазма не может оказать существенного влияния на процесс распространения второго пучка. Это и подтверждают транспортные характеристики РЭП, полученные

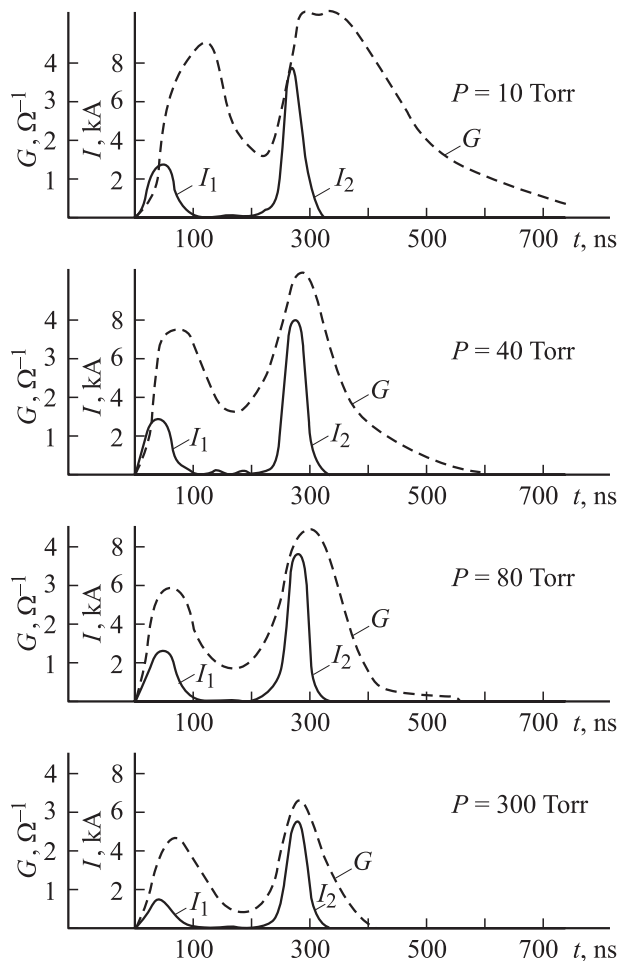


Рис. 5. Осциллограммы импульсов тока: I_1 — первого РЭП, I_2 — второго РЭП и проводимости плазмы σ для $L = 0.3$ m, при различном давлении газа в ПР.

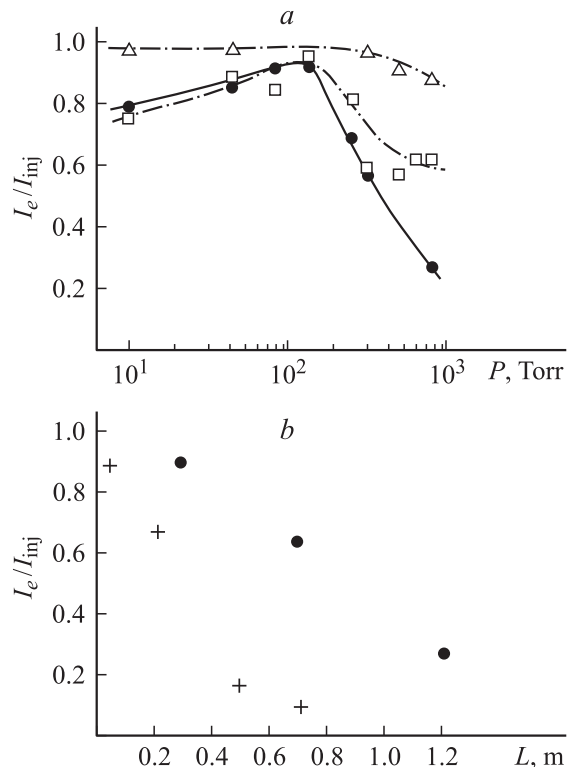


Рис. 6. *a* — зависимость транспортных характеристик второго сильноточного РЭП от давления газовой среды P в ПР и длины распространения L для временной паузы между импульсами $t_n = 160 \cdot 10^{-6}$ s: Δ — $L = 0.3$, \square — 0.7 , \bullet — 1.4 m; *b* — зависимость транспортных характеристик второго сильноточного РЭП от длины распространения L при атмосферном давлении газовой смеси в ПР. Временная пауза между импульсами: $+$ — $t_n = 500 \cdot 10^{-6}$ s, \bullet — $160 \cdot 10^{-6}$ s.

для данного временного диапазона пауз. В этом случае распространение в газовой среде плазмохимического реактора второго сильноточного электронного пучка подобно одноимпульсному режиму генерации и транспортировке этого РЭП.

Результаты определения транспортных характеристик двух РЭП при газодинамическом способе их распространения, основанного на создании первым электронным пучком в газовой среде ПР канала пониженной плотности и дальнейшей транспортировкой по этому каналу следующего сильноточного электронного пучка, представлены на рис. 6. Исследовались транспортные характеристики двух сильноточных РЭП, распространявшихся в плазмохимическом реакторе, заполненном газовой смесью $N_2 : O_2 = 4 : 1$ различной плотности, с временной паузой между импульсами $t_n = 160 \cdot 10^{-6}$ s. Несомненно интересным экспериментальным фактом является достаточно высокая эффективность токопрохождения второго РЭП, зарегистрированная в диапазоне давлений газа $P = 80\text{--}150$ Torr для длины распространения $L = 0.7$ и 1.2 m, а также плавное увеличивающееся значение I_e/I_{inj} от 0.8 до 0.95 в области давлений P от 10 до 150 Torr соответственно (рис. 6, *a*). Возможно

предположить, что на начальном участке распространения ($L =$ до 0.5 м), когда энерговклад в газ от первого электронного пучка достаточно высок, а ионизационные потери второго РЭП незначительны, из-за формирования канала пониженной плотности транспортная эффективность I_e/I_{inj} второго РЭП находится на уровне $0.95-0.98$ в области давления газа $P = 10-250$ Торг. Лишь с увеличением давления газа в ПР до $500-700$ Торг эффективность незначительно снижается до 0.9 за счет возрастания потерь на ионизацию. Эти потери на ионизацию становятся определяющими при длине распространения РЭП до $L = 0.7-1.2$ м и в целом обуславливают снижение транспортной эффективности до 0.8 уже при давлении $P = 10$ Торг. Несомненно, что возрастание потерь РЭП на ионизацию может быть напрямую связано и со значительным уровнем понижения плотности газовой среды в канале распространения, созданного первым электронным пучком при таких давлениях P . Дальнейшее повышение давления газовой смеси в ПР до диапазона $P = 10-150$ Торг приводит к установлению оптимального уменьшения плотности газа в канале от первого пучка, что и позволяет достичь эффективности 0.96 для второго РЭП. При давлениях газовой смеси в объеме ПР на уровне $P > 150$ Торг и длине распространения РЭП, равной длине реактора ($L = 1.2$ м), уровень энерговклада в газ от первого пучка таков, что не может обеспечить необходимое уменьшение плотности газовой среды, тем самым значительно увеличивая потери второго РЭП. Это незамедлительно отражается на его транспортной эффективности. Тем не менее данные, полученные для газодинамического способа распространения РЭП в условиях давления газовой среды атмосферного уровня, свидетельствуют о возрастании транспортной эффективности второго РЭП на $40-45\%$ в сравнении с одноимпульсным режимом генерации и распространения (рис. 6, б). При этом эти сильноточные электронные пучки были одного уровня мощности. Безусловно, возможное увеличение эффективности распространения второго электронного пучка, а в целом и повышение производительности плазмохимического реактора, связано с дальнейшим увеличением мощности первого РЭП, т.е. с увеличением уровня энерговклада в газ от первого электронного пучка на длинах распространения $L > 1$ м.

Заключение

Проведенный комплекс экспериментальных исследований двух импульсного режима генерации сильноточных релятивистских электронных пучков и определения их транспортных характеристик в газовой среде плазмохимического реактора позволяет сделать следующие выводы.

1. Осуществлена генерация и исследована эффективность распространения в газовой среде различной плотности двух сильноточных РЭП с уровнем мощности в импульсах $2 \cdot 10^9$ и $4-9.6 \cdot 10^9$ Вт соответственно,

длительностью $60 \cdot 10^{-9}$ с, следующих друг за другом через временную паузу t_n до $500 \cdot 10^{-9}$ с. Показано, что при давлении газовой смеси $N_2:O_2 = 4:1$ в объеме плазмохимического реактора атмосферного уровня транспортная эффективность такого способа превосходит на $35-45\%$ одноимпульсный режим генерации и транспортировки с равным уровнем мощности в импульсе. Для электронных пучков используемого уровня мощности максимальная транспортная эффективность исследуемого способа генерации и распространения достигается при временной паузе между пучками в диапазоне $100 \cdot 10^{-9} < t_n < 250 \cdot 10^{-9}$ с и может составлять $I_e/I_{inj} = 0.75$ при давлении газа в реакторе $P = 300$ Торг и длине распространения $L = 1.2$ м.

2. Осуществлена генерация и исследована эффективность распространения в газовой среде различной плотности двух сильноточных РЭП с уровнем мощности в импульсах $1.8 \cdot 10^9$ и $1.6 \cdot 10^{10}$ Вт соответственно, длительностью $60 \cdot 10^{-9}$ с, следующих друг за другом через временную паузу $t_n = 160 \cdot 10^{-6}$ с. Показано, что при давлении газовой смеси $N_2:O_2 = 4:1$ в плазмохимическом реакторе, равном атмосферному, эффективность данного способа превосходит на $40-45\%$ транспортную эффективность одноимпульсного РЭП равного уровня мощности в импульсе. Установлено, что при этом уровне мощности в импульсах на длине распространения $L = 1.4$ м в диапазоне давлений газовой среды $P = 80-150$ Торг транспортная эффективность второго сильноточного РЭП составляет $I_e/I_{inj} = 0.95$.

По мнению авторов, полученные результаты найдут практическое применение и будут полезны при конструировании плазмохимических реакторов и определении их возможных уровней эффективной производительности.

Список литературы

- [1] *Норманн 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] *Kondratiev N.A., Krasilnikov V.A., Medvedev Yu.A.* et al. // Proc. 14th Intern. Conf. Chemical Reactors. Tomsk, 1998. Vol. 1. P. 191-192.
- [3] *Ипатов А.А., Кабанов С.Н., Королев А.А.* и др. // Письма в ЖТФ. 1984. Т. 10. Вып. 3. С. 162-165.
- [4] *Murphy D.P., Raleigh M., Pechacek R.E.* et al. // Phys. Fluids. 1987. Vol. 30. N 1. P. 232-238.
- [5] *Picone J.M., Boris S., Gardner J.H.* et al. // Proc. 5th Intern. Conf. High Power Part. Beams. BEAMS-83: San Francisco, 1983. P. 384-389.
- [6] *Roberts T.G., Bennet W.H.* // Plasma Phys. 1968. Vol. 10. P. 381.
- [7] *Graybill S.E., Uglum I.R.* // J. Appl. Phys. 1970. Vol. 41. P. 236.
- [8] *Рухадзе А.А., Рухлин В.Г.* ЖЭТФ. 1971. Т. 61.
- [9] *Ginzburg S.L., Khodataev K.V.* // Proc. 15th Intern. Conf. on Phenomena in Ionized Gases. Minsk, 1981. P. 237.

- [10] Коренев С.А., Рубин Н.Б., Ходатаев К.В. // Тез. докл. Совещания по проблемам коллективных методов ускорения: Дубна, 1982. С. 161–163.
- [11] Глейзер И.З., Диденко А.Н., Дронова Л.П. и др. // Атомная энергия. 1974. Т. 36. С. 378–380.
- [12] Blumlein A.D. Patent USA 589127. 1941.
- [13] Kondratiev N.A., Kotlyarevsky G.I., Smetanin V.I. et al. // Phys. Lett. A. 1990. Vol. 14. N 1. P. 89–94.
- [14] Аранчук Л.Е., Вихарев В.Д., Горев В.В. и др. // ЖЭТФ. 1984. Т. 86. Вып. 4. С. 1180–1199.