

04;09;12

# Изменение частоты излучения плазменного релятивистского сверхвысокочастотного генератора в течение импульса наносекундной длительности

© О.Т. Лоза, Д.К. Ульянов, Р.В. Баранов

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН,  
119991 Москва, Россия  
e-mail: loza@gpi.ru

(Поступило в Редакцию 28 июля 2010 г.)

Экспериментально исследован спектр излучения плазменного релятивистского сверхвысокочастотного (СВЧ) генератора с импульсной мощностью 50 MW в диапазоне 10 GHz. В течение СВЧ-импульса длительностью 60 ns частота излучения может оставаться постоянной, но может и меняться более чем на 1.5 GHz. Существенное влияние на изменение частоты излучения оказывает давление газа, который ионизируется в СВЧ-полях и изменяет концентрацию заранее созданной плазмы.

## Введение

Отличительной чертой источников СВЧ-излучения, основанных на черенковском взаимодействии релятивистского электронного пучка с плазмой [1,2], является их широкополосность. Спектр излучения плазменных релятивистских генераторов (ПРГ) СВЧ-импульсов с длительностью порядка нескольких десятков наносекунд может быть сравнительно узким [3], порядка 1% частоты. Спектр отдельного СВЧ-импульса ПРГ может быть и широким, когда верхняя частота превышает нижнюю в несколько раз: в работе [4] эти частоты равны соответственно 38 и 9 GHz. Частоту излучения ПРГ можно изменять произвольно от импульса к импульсу в несколько раз (например, от 4 до 28 GHz [5]) даже в периодическом режиме следования импульсов [6]. Указанные возможности управления частотой ПРГ определяются свойствами плазмы, параметры которой можно изменять в широких пределах.

Изменение частоты излучения ПРГ почти во всех перечисленных работах регистрировалось путем измерения интегрального по времени спектра СВЧ-импульса и его сравнения со спектром следующего импульса. Только в работе [3], где спектр измерялся скоростным осциллографом, было зафиксировано изменение частоты излучения ПРГ в течение микросекундной длительности импульса. Этот факт, однако, был объяснен только изменением свойств релятивистского электронного пучка (РЭП) в течение импульса и в дальнейшем особенного внимания не получал.

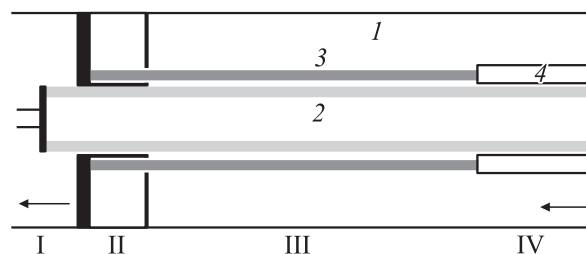
В последнее время моделирование с помощью электродинамического кода Карат [7] позволило объяснить ряд особенностей функционирования ПРГ. В частности, расчеты [8] показали, что концентрация заранее созданной плазмы может уменьшаться в течение СВЧ-импульса, вследствие чего частота излучения также снижается, что может даже привести к срыву процесса СВЧ-генерации. В модели [8], однако, рассматривалась лишь возможность движения существующих частиц

плазмы, их ухода из пространства взаимодействия и „рождения“ электронов на границе расчетной области, но другие механизмы изменения концентрации плазмы не предусматривались.

В настоящей работе сделана попытка регистрации изменения плотности плазмы в ПРГ в течение импульса и понимания причин этого явления. Целью проведения настоящей работы было экспериментальное подтверждение возможности генерации СВЧ-излучения с изменяемой в течение импульса частотой.

## Эксперимент

Схема ПРГ показана на рис. 1. Система аксиально симметрична, однородное магнитное поле  $\sim 1$  Т направлено вдоль оси. В камеру 1 с проводящими стенками и радиусом 1.8 см слева инжектируется трубчатый РЭП 2 с радиусом 0.7 см и толщиной стенки 0.1 см. Трубчатая плазма 3 с радиусом 1.05 см и толщиной стенки 0.1 см расположена коаксиально РЭП. Проводящий коллектор 4 с внешним радиусом 1.2 см, на котором оседает РЭП, электрически соединен с камерой 1 на



**Рис. 1.** Схема плазменного релятивистского СВЧ-генератора: I — диод; II — плазменный источник; III — область плазменно-пучкового взаимодействия; IV — выходное устройство. 1 — камера; 2 — релятивистский электронный пучок; 3 — плазма; 4 — коллектор. Стрелками указано направление потока газа при вакуумной откачке.

правой границе. Длина области плазменно-пучкового взаимодействия III (от плазменного источника II до коллектора 4) равна 20 см. Волны, усиленные в области III и распространяющиеся слева направо по коаксиальному волноводу между стенками коллектора 4 и камеры 1, выходят через рупор за правой границей схемы.

Трубчатая плазма создавалась источником [9] (область II на рис. 1) путем ионизации газа электронными специальным пучком с кольцевого термокатода. Напряжение на термокатоде было равно 600 В, ток достигал 50 А, давление газа (воздуха) в камере имело порядок  $10^{-4}$ – $10^{-3}$  Торр. Постепенная — в течение десятков микросекунд — ионизация газа позволяла инжектировать РЭП наносекундной длительности в плазму с заранее выбранной плотностью. Таким образом, соответствующая синхронизация процессов создания плазмы и инжекции РЭП давала возможность выбрать необходимую частоту СВЧ-излучения в очередном импульсе. Расчеты [10] показали, что для генерации излучения с частотой 10 GHz концентрация плазмы в ПРГ с указанной геометрией должна быть  $\sim 10^{13}$  см $^{-3}$ .

Вакуумная откачка системы осуществлялась насосом, установленным в диоде РЭП (слева от области I на рис. 1), где давление было всегда равно приблизительно  $4 \cdot 10^{-5}$  Торр. В области плазменно-пучкового взаимодействия (область III) давление могло быть изменено с помощью напуска газа в выходной узел (область IV), где давление также измерялось. Таким образом, давление газа в установке увеличивалось по мере удаления от диода, т.е. слева направо на рис. 1. При отсутствии специального напуска газа давление в выходном узле было равно  $4 \cdot 10^{-4}$  Торр, при напуске газа эта величина увеличивалась до  $4 \cdot 10^{-3}$  Торр, одновременно увеличивалось и давление в области плазменно-пучкового взаимодействия.

Конструкция ПРГ не позволяла проводить измерения давления газа непосредственно в области плазменно-пучкового взаимодействия III. Вакуумная откачка этой области через сравнительно узкие отверстия в диоде I и плазменном источнике II была неэффективна. В то же время с выходным устройством IV область III соединялась достаточно широким каналом. В связи с этим, во-первых, изменение давления в выходном узле IV почти не сказывалось на давлении в диоде I, и, во-вторых, давление в области III было немного меньше, чем в выходном узле, но существенно больше, чем в диоде.

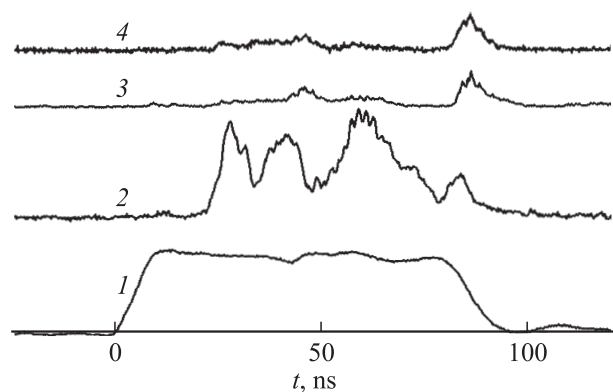
Для генерации СВЧ-излучения использовался ускоритель, формировавший одиночные импульсы напряжения 500 кВ длительностью 80 нс, рабочий ток релятивистских электронов в ПРГ равнялся 2 кА. При взаимодействии РЭП с плазмой возникало СВЧ-излучение, которое регистрировалось детекторами на „горячих носителях“ [11] и широкоапертурным калориметром [12], измерявшим полную энергию СВЧ-импульса. Сопоставление результатов этих измерений показало, что импульсная мощность СВЧ-излучения в среднем равна 50 MW.

В эксперименте одновременно использовались 3 СВЧ-детектора [11], установленные на расстоянии 1 м от выходного рупора с диаметром 24 см. Входные отверстия волноводов  $23 \times 10$  мм всех трех детекторов располагались на расстоянии  $\sim 5$  см друг от друга, так что детекторы принимали почти одинаковое излучение и показывали близкие по форме сигналы. Этот факт был проверен сравнением сигналов со всех детекторов в одинаковых условиях.

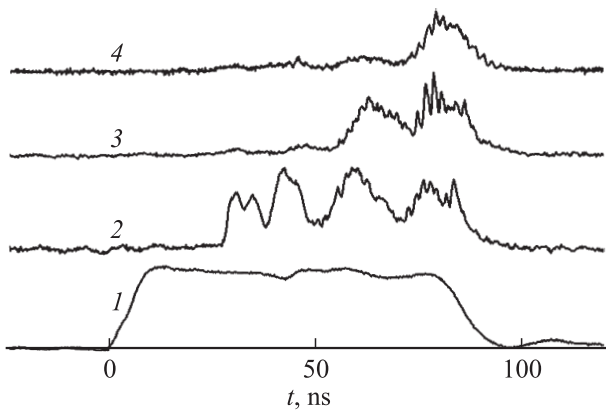
Для регистрации излучения с разными частотами использовались две комбинации СВЧ-детекторов. В одной комбинации первый детектор принимал все волны в волноводе  $23 \times 10$  мм, т.е. все частоты выше 6.5 GHz, во втором детекторе размещался запредельный волновод с частотой отсечки 9.4 GHz, в третьем — аналогичный фильтр частот выше 12 GHz. В другой комбинации детекторы частоты отсечки равнялись соответственно 6.5, 7.9 и 9.4 GHz. Таким образом, сопоставление сигналов с детекторов позволяло оценить изменение спектра СВЧ-излучения во времени. Измерения проводились при различных давлениях воздуха в выходном узле в диапазоне от  $4 \cdot 10^{-4}$  до  $4 \cdot 10^{-3}$  Торр, т.е. при различных давлениях в области плазменно-пучкового взаимодействия.

На рис. 2–5 показаны осциллограммы напряжения на катоде ускорителя и сигналы с трех СВЧ-детекторов. Измерения частоты излучения, проведенные с помощью калориметрического спектрометра [4], и сравнение результатов с показаниями СВЧ-детекторов показали, что для ПРГ с указанными размерами РЭП и плазмы излучения с частотами ниже 6.5 GHz не бывает. Таким образом, один из используемых детекторов, а именно, детектор с частотой отсечки 6.5 GHz, реагировал на все излучаемые частоты.

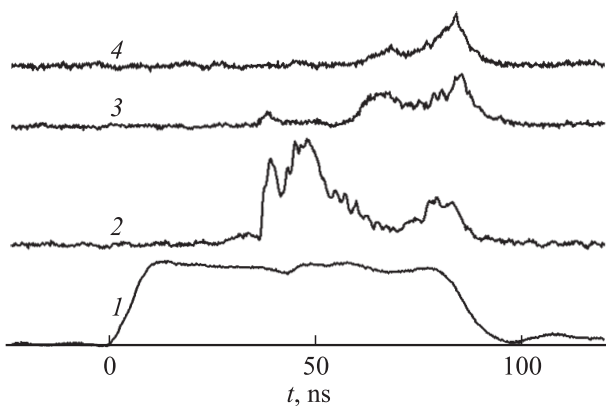
С ростом концентрации плазмы частота СВЧ-излучения увеличивается [1,2]. Подбирая начальную концентрацию плазмы с помощью соответствующей синхронизации начала создания плазмы и инжекции РЭП, при



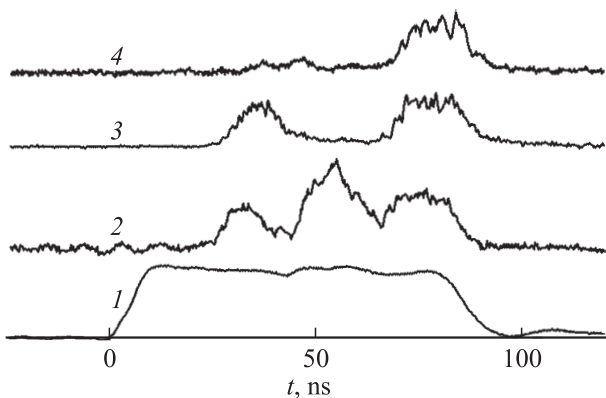
**Рис. 2.** Осциллограммы сигналов: 1 — напряжение на диоде; 2–4 — мощность СВЧ-излучения с частотой (GHz) выше: 2 — 6.5, 3 — 7.9, 4 — 9.4. В течение плато импульса напряжения излучение появляется в полосе частот от 6.5 до 7.9 GHz.



**Рис. 3.** То же, что на рис. 2. Постепенное увеличение частоты излучения — между 6.5 и 7.9 GHz; между 7.9 и 9.4 GHz; выше 9.4 GHz.



**Рис. 4.** Осциллограммы сигналов: 1 — напряжение на диоде; 2–4 — мощность СВЧ-излучения с частотой (GHz) выше: 2 — 6.5, 3 — 9.4, 4 — 12. Резкое увеличение частоты излучения — от меньшей 9.4 GHz к превышающей 12 GHz.



**Рис. 5.** То же, что на рис. 2. Уменьшение частоты излучения в начале импульса ниже 7.9 GHz и дальнейший рост частоты выше 9.4 GHz.

разных значениях давления газа можно было наблюдать СВЧ-излучение с частотами, не выходящими за пределы одного измерительного диапазона. Для примера на рис. 2 показаны осциллограммы сигналов, иллюстрирующие СВЧ-излучение в пределах нижней полосы частот от 6.5 до 7.9 GHz при давлении  $10^{-3}$  Torr. Нетрудно видеть, что излучение заметной мощности на частотах вне полосы 6.5–7.9 GHz наблюдается только на заднем фронте импульса напряжения на катоде, т.е. при низкой энергии электронов. Аналогичные результаты для разных частотных диапазонов были многократно получены и для более низких давлений вплоть до  $4 \cdot 10^{-4}$  Torr, с ростом давления частота появления подобных осциллограмм снижалась.

При всех значениях давления наблюдалось увеличение частоты излучения в течение импульса. На рис. 3 проиллюстрировано постепенное увеличение частоты излучения, по меньшей мере, на 1.5 GHz при давлении  $10^{-3}$  Torr. Подчеркнем, что в данном случае частоты выше 9.4 GHz появляются до заднего фронта импульса напряжения. При меньшем давлении, т.е. при  $4 \cdot 10^{-4}$  Torr, наблюдалось увеличение частоты только в пределах двух соседних диапазонов, т.е. менее чем на 1.4 GHz.

При более высоких значениях давления, например при  $2 \cdot 10^{-3}$  Torr и выше, встречалось также внезапное появление высоких частот. На рис. 4 показано, что излучение с частотой ниже 9.4 GHz прекращается после 55 ns после начала импульса, и начинается излучение с частотой выше 12 GHz.

Справедливости ради нужно заметить, что при давлении  $2 \cdot 10^{-3}$  Torr и выше иногда наблюдалась и обратная картина, т.е. кратковременное уменьшение частоты излучения, за которым, однако, неизбежно следовал ее рост, как это показано на рис. 5.

## Обсуждение результатов

Приведенные результаты экспериментов позволяют заключить, что частота СВЧ-излучения ПРГ увеличивается в течение нескольких десятков наносекунд на величину порядка 1 GHz. Кроме того, с ростом давления в пространстве плазменно-пучкового взаимодействия ПРГ скорость роста частоты СВЧ-излучения также возрастает.

Сам факт изменения частоты излучения ПРГ может объясняться только изменением концентрации плазмы, которая, в свою очередь, может увеличиваться, например, при ионизации газа в сильных СВЧ-полях. На самом деле, важна не столько максимальная плотность плазмы на каком-то радиусе, сколько погонная плотность плазмы, сосредоточенной в пределах стенки плазменного цилиндра (с толщиной, много меньшей длины волны).

Для оценок можно использовать результаты работы [13], в которой проводились экспериментальные исследования СВЧ-пробоя в газах низкого давления, и

изучалась зависимость интервала времени, необходимо для пробоя, от давления и сорта газа. В частности, из результатов [13] следует, что для воздуха с давлением  $10^{-3}$  Торр и частоты СВЧ-излучения  $\sim 10$  GHz интервал времени, в течение которого степень ионизации возрастает в  $e \approx 2.7$  раз, минимален при амплитуде СВЧ-поля  $\sim 70$  kV/cm и равен  $\sim 15$  ns. С ростом или с уменьшением напряженности поля этот интервал времени растет. Заметим, что оценки характерного времени процесса в [13] были получены в предположении достаточного количества нейтральных молекул, обеспечивающих экспоненциальный рост ионов.

При давлении воздуха в выходном устройстве  $4 \cdot 10^{-4}$  Торр концентрация молекул равна  $\sim 1.4 \cdot 10^{13}$  cm $^{-3}$ . В предыдущем разделе было замечено, что немного меньшая концентрация молекул должна быть и в пространстве плазменно-пучкового взаимодействия (область III на рис. 1), т.е. в области ионизации газа и создания плазмы. Поскольку для генерации излучения с частотой 10 GHz концентрация плазмы должна быть  $\sim 10^{13}$  cm $^{-3}$  [10], то для создания необходимой плазмы при низком давлении воздуха ионизация его молекул должна быть почти полной. Влияние СВЧ-полей на степень ионизации в этих условиях будет минимально просто по причине отсутствия нейтралов. Этот результат, т.е. факт почти полной ионизации газа при низком давлении, подтверждается и невозможностью существенного увеличения частоты СВЧ-волны обычным способом, т.е. увеличением продолжительности создания плазмы перед инжекцией РЭП. Таким образом, при полной ионизации газа в канале создания трубчатой плазмы частота СВЧ-колебаний в течение импульса с длительностью 60 ns заметно не меняется.

При более высоком давлении концентрация молекул газа превышает необходимую концентрацию плазмы, и СВЧ-поле имеет возможность дальнейшей ионизации оставшегося в канале плазмы нейтрального газа в течение импульса РЭП. По результатам [10] увеличение плотности плазмы приблизительно в  $e$  раз от  $0.7 \cdot 10^{13}$  до  $2 \cdot 10^{13}$  cm $^{-3}$  приводит к удвоению частоты СВЧ-излучения (от 7 до 15 GHz), и это не может происходить быстрее чем за 15 ns [13]. Представленный на рис. 3 рост частоты излучения на 20% (от менее чем 7.9 до более чем 9.4 GHz) происходил в течение  $\approx 20$  ns, т.е. удвоение частоты потребовало бы характерного времени  $\sim 80$  ns. Напряженность СВЧ-поля далеко не везде равна „оптимальному“ значению 70 kV/cm [13], поэтому характерное время изменения степени ионизации может существенно превосходить указанные выше 15 ns. Даже „резкое увеличение“ частоты излучения на  $\sim 30\%$  (рис. 4) при более высоком давлении газа происходило не быстрее чем за минимально возможные 5 ns. Таким образом, при избыточном — для создания плазмы с нужной концентрацией — давлении газа частота СВЧ-излучения растет в течение импульса. С увеличением давления газа скорость нарастания концентрации плазмы возрастает, что отражается на скорости роста частоты СВЧ-излучения.

Здесь можно напомнить, что наряду с механизмом увеличения концентрации плазмы существует и механизм ее уменьшения [8] в течение первых десятков наносекунд от момента инжекции РЭП. Это уменьшение концентрации плазмы связано с экранировкой электростатического поля инжектированных релятивистских электронов, когда электроны плазмы разлетаются вдоль оси, а оставшиеся ионы компенсируют заряд инжектированного РЭП. Для указанных параметров ПРГ указанный механизм снижает плотность плазмы приблизительно на 10–20%. Продемонстрированный на рис. 5 процесс, по-видимому, является проявлением указанного механизма.

Очень важным представляется вопрос о соответствии описанных результатов данным, полученным ранее. Например, в работе [5] была достигнута перестройка частоты излучения от импульса к импульсу в диапазоне 4–28 GHz при мощности 30–50 MW. Плазма нужной плотности создавалась ионизацией ксенона при давлении  $4.5 \cdot 10^{-4}$  Торр. При длительности СВЧ-импульса всего 20 ns измеренная калориметрическим спектрометром [4] минимальная ширина спектра излучения не превышала 6 GHz. Это не противоречит полученным здесь данным о перестройке частоты более чем на 2.6 GHz (рис. 4). По той же причине нет противоречия и с данными работы [6], где импульсно-периодический ПРГ генерировал СВЧ-излучение с длительностью импульса 30 ns, а измерения также проводились калориметрическим спектрометром [4]. Большая ширина нижней частотной полосы спектрометра 5–9 GHz, в границах которой было зарегистрировано излучение, не позволяла делать выводы об изменении его частоты. Спектр излучения в верхней части частотного диапазона должен быть широким, как и следует из [10], даже при постоянной плотности плазмы.

Впервые эволюция спектра излучения ПРГ в течение импульса экспериментально изучалась в работе [3]. Для этого сигнал с дипольной антенны, установленной перед выходным рупором ПРГ, поступал непосредственно на вход осциллографа с полосой частот 3 GHz. При некоторых условиях было зарегистрировано излучение с постоянной частотой и узким спектром и длительностью до 80 ns, полная длительность СВЧ-импульса доходила до 500 ns. В этом эксперименте диаметр волновода 12 cm (иногда 18 cm) более чем в 3 раза превышал описанный в настоящей работе при той же мощности 50 MW, во столько же раз была меньше напряженность электрического поля СВЧ-волны, ниже была и скорость ионизации. Кроме того, возможность излучения с постоянной частотой в некотором диапазоне изменения концентрации плазмы показана в численном моделировании [14]. В работе [3] плазма нужной концентрации создавалась подбором не только времени ионизации газа электронным пучком, но и его давления. Таким образом, полученные в настоящей работе результаты не противоречат данным, описанным ранее.

## Заключение

Для работы ПРГ с многократной перестройкой частоты излучения от импульса к импульсу, следующих с частотой  $\sim 100$  Hz, необходимо иметь возможность изменения концентрации плазмы в широком диапазоне. Такая возможность появляется при достаточно высоком давлении газа, который ионизируется до нужной степени перед очередным импульсом РЭП. Полученные в настоящей работе результаты показывают, что в подобных условиях частота СВЧ-излучения должна изменяться в течение импульса, причем особенно существенно на низких частотах.

Таким образом, импульсно-периодический ПРГ с указанными параметрами не может генерировать СВЧ-излучение, частота которого существенно отличается от импульса к импульсу, но остается постоянной в течение одного импульса. Этот вывод усугубляет различия между вакуумными и плазменными приборами релятивистской сильноточной СВЧ-электроники, что особенно важно в отношении сфер их применения. С другой стороны, проведенные исследования позволяют обоснованно рассчитывать на возможность построения мощных импульсно-периодических СВЧ-генераторов, частоту излучения которых можно менять по заранее заданному алгоритму не только от импульса к импульсу, но также и в течение каждого импульса.

Авторы благодарны А.А. Рухадзе и П.С. Стрелкову за полезные обсуждения.

Работа выполнена в рамках программы фундаментальных исследований президиума РАН „Проблемы физической электроники, пучков заряженных частиц, генерации электромагнитного излучения в импульсных системах большой мощности“ при поддержке гранта РФФИ № 10-08-00994-а.

## Список литературы

- [1] Кузелев М.В., Лоза О.Т., Рухадзе А.А. и др. // Физика плазмы. 2001. Т. 27. № 8. С. 710.
- [2] Кузелев М.В., Рухадзе А.А., Стрелков П.С. Плазменная релятивистская СВЧ-электроника: Учеб. пособие для вузов / Под ред. А.А. Рухадзе М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 544 с.
- [3] Богданкевич И.Л., Иванов И.Е., Лоза О.Т. и др. // Физика плазмы. 2002. Т. 28. № 8. С. 748.
- [4] Богданкевич И.Л., Стрелков П.С., Тараканов В.П. и др. // ПТЭ. 2000. № 1. С. 92.
- [5] Стрелков П.С., Ульянов Д.К. // Физика плазмы. 2000. Т. 26. Вып. 4. С. 329.
- [6] Богданкевич И.Л., Гришин Д.М., Гунин А.В. и др. // Физика плазмы. 2008. Т. 34. № 10. С. 926.
- [7] Tarakanov V.P. User's Manual for Code KARAT. Springfield, VA: Berkley Research Associates, Inc. 1992. 137 p.
- [8] Богданкевич И.Л., Лоза О.Т., Павлов Д.А. // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2010. Вып. 2. С. 16.
- [9] Лоза О.Т., Пономарев А.В., Стрелков П.С. и др. // Физика плазмы. 1997. Т. 23. № 3. С. 222.
- [10] Богданкевич И.Л., Лоза О.Т., Павлов Д.А. // Физика плазмы. 2009. Т. 35. № 3. С. 211.
- [11] Райзер М.Д., Цонн Л.Э. // РиЭ. 1975. Т. 20. Вып. 8. С. 1691.
- [12] Шкварунец А.Г. // ПТЭ. 1996. Вып. 4. С. 72.
- [13] Цагарейшвили Н.С. // Физика плазмы. 1990. Т. 16. Вып. 11. С. 1389.
- [14] Богданкевич И.Л., Лоза О.Т., Павлов Д.А. // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. Вып. 15. С. 1.