

Перспективный источник мощных широкополосных СВЧ-импульсов с изменяемой до двух октав частотой излучения

© С.Е. Ернылева,^{1,2} В.О. Литвин,¹ О.Т. Лоза,^{1,2} И.Л. Богданкевич²

¹ Российский университет дружбы народов,
117198 Москва, Россия

² Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН,
119991 Москва, Россия
e-mail: oleg.loza@list.ru

(Поступило в Редакцию 14 мая 2013 г. В окончательной редакции 13 января 2014 г.)

В численной модели предложен источник СВЧ-импульсов, основанный на взаимодействии сильноточного релятивистского электронного пучка с плазмой. Источник представляет собой усилитель собственных шумов с длительностью импульса менее 3 ns, не допускающей возникновения обратной связи и автогенерации. Зависящий от концентрации плазмы коэффициент усиления волны позволяет управлять частотой излучения в диапазоне 4–17 GHz, в пределах которого сохраняются ширина спектра ~ 2 GHz, мощность ~ 150 MW и эффективность по энергии до 15%. Рассмотрена возможность применения существующего малогабаритного источника высоковольтных импульсов с большой частотой повторения.

Введение

Генерация мощного, $\sim 10^6$ W и более, широкополосного сверхвысокочастотного (СВЧ)-излучения традиционно осуществляется с помощью так называемых сверхширокополосных (СШП) генераторов, формирующих короткий импульс высокого напряжения, как правило, биполярный. Спектр излучения СШП-генераторов определяется формой импульса, а характерная частота — его длительностью. Преимуществами такого метода получения широкополосного СВЧ-излучения являются простота его реализации и высокая эффективность преобразования электроэнергии в излучение. К недостаткам можно отнести малую энергию отдельных импульсов, уменьшающуюся с ростом характерной частоты, а также сравнительно узкую полосу частот, обычно не превышающую октавы и не поддающуюся изменению от импульса к импульсу в пачке.

Наиболее широкополосным источником мощных СВЧ-импульсов является плазменный релятивистский генератор СВЧ-излучения (ПРГ). В экспериментах [1] была продемонстрирована генерация импульсов с мощностью до 50 MW, длительностью 20 ns и электронной перестройкой частоты от импульса к импульсу в диапазоне от 4 до 28 GHz. Полная ширина спектра отдельного импульса ПРГ может превышать две октавы [2]. С этой точки зрения конкурентом ПРГ не может быть, например, плазменный релятивистский СВЧ-усилитель [3]. Во-первых, для такого усилителя экспериментально продемонстрирована электронная перестройка частоты его излучения всего в 1.5 раза и, во-вторых, нет экспериментальных и расчетных данных об усилении внешнего сигнала на нескольких частотах одновременно.

Экспериментальные исследования [4] и численное моделирование [5] показали, что спектр излучения ПРГ состоит из одной или нескольких сравнительно узких линий. Интервал между соседними частотами спектра зависит от длины генераторной секции и равен

0.1–1 GHz, а смена частот осуществляется дискретно. Эксперимент [6] и расчет [7] показали также и возможность непрерывной электронной перестройки частоты, но лишь в сравнительно узком диапазоне вокруг одной из частот, поэтому в некоторых интервалах частот ПРГ с заданной геометрией вообще не излучает.

Частоты спектра излучения ПРГ соответствуют различным продольным модам плазменно-пучкового резонатора и определяются наличием обратной связи, возникающей при отражениях волны от границ. Если длительность импульса достаточно мала, то обратная связь в ПРГ возникнуть не успевает. Источники высоковольтных импульсов с малой длительностью ~ 1 ns существуют [8], и на их основе созданы СВЧ-генераторы, например, релятивистская лампа обратной волны [9].

В настоящей работе с помощью численного моделирования исследована возможность создания широкополосного плазменного источника СВЧ-излучения с непрерывной перестройкой частоты за счет малой длительности импульса и отсутствия обратной связи. Все параметры устройства, кроме длины генераторной секции и длительности импульса тока, совпадают с параметрами экспериментальных ПРГ [5,10], это сделано для корректности сравнения предлагаемого СВЧ-источника с ПРГ, подробно исследованными в экспериментах и расчетах. Кроме того, для оценки возможности практической реализации предлагаемого устройства рассчитаны характеристики излучения при использовании существующего сильноточного ускорителя с малой длительностью импульса, который применялся в эксперименте [9].

Численная модель

Моделирование проводилось с помощью электродинамического кода Карат [11] — полностью электромагнитного нестационарного вычислительного кода. Использовалась 2.5-мерная версия кода, при которой учитывалась

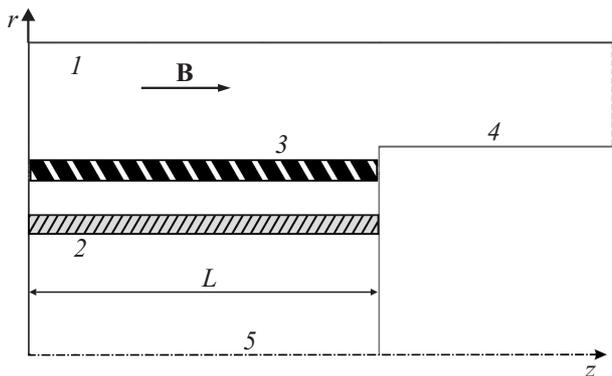


Рис. 1. Схема расчета: 1 — стенка волновода, 2 — РЭП, 3 — плазма, 4 — коллектор, 5 — ось симметрии.

наличие всех трех компонент полей и скоростей частиц, но распределения частиц и полей изменялись только по радиусу r и длине z , оставаясь однородными по азимуту. Схема расчетной модели ПРГ показана на рис. 1, ее параметры почти полностью совпадают с параметрами экспериментальных устройств [1,6,10] и расчетов [5,7]. Система аксиально-симметрична, однородное магнитное поле с индукцией 2Т направлено вдоль оси. В камеру с проводящими стенками и радиусом 1.8 см слева инжектируется трубчатый релятивистский электронный пучок (РЭП) со средним радиусом 0.75 см и толщиной стенки 0.1 см. Трубчатая плазма со средним радиусом 1.05 см и толщиной стенки 0.1 см расположена коаксиально РЭП. Проводящий коллектор с радиусом 1.2 см, на котором оседает РЭП, электрически соединен с камерой торцевой стенкой на правой границе. СВЧ-излучение выходит через правую границу, где и регистрируются его мощность и спектральный состав. Длина L плазменно-пучкового взаимодействия от левой границы до коллектора выбиралась разной, как это описано ниже.

Релятивистские электроны с энергией 500 keV инжектировались через левую проводящую границу и исчезали по достижении коллектора или любой другой границы. Были исследованы различные формы импульса тока при полной длительности, не превышающей 4 ns. Особое внимание уделялось крутизне фронта, определяющей начальный шум, который и должен усиливаться по мере движения к правой границе. Оказалось, что форма импульса тока не сильно влияет на спектр и эффективность излучения, поэтому все приведенные ниже результаты получены при условиях, когда ток РЭП линейно нарастал от 0 до 2 кА за 0.5 ns, оставался постоянным в течение 1 ns и затем спадал до нуля еще за 0.5 ns. Модель, в которой ток меняется вместе с напряжением на катоде, например, как в магнитоизолированном диоде (ток Федосова), также рассматривалась, но такая модель в данном случае менее адекватна эксперименту именно по причине малой длительности импульса. При развитии взрывной эмиссии на катоде ток появляется с небольшой задержкой относительно напряжения, и эта задержка по

порядку величины совпадает с длительностью фронта тока, указанного выше.

Моделирование частиц плазмы и электронов релятивистского пучка проводилось с использованием метода крупных частиц (particle-in-cell, PIC-метод). Предыдущие результаты [5] показали, что при длительностях импульса ~ 50 ns и более в ПРГ существенно меняется геометрия плазмы, и возникает эффект укорочения СВЧ-импульса, т.е. падение мощности излучения до нуля. Чтобы вывести подобные эффекты из рассмотрения в настоящей работе, длительность импульса тока для моделирования ПРГ выбиралась равной 20 ns при длительности фронта 2.5 ns.

В отличие от ПРГ, в дальнейшем для определенности будем называть СВЧ-источник с малой длительностью импульса усилителем шума (УШ). Сравнение ПРГ с длительностью импульса тока ~ 20 ns и УШ с длительностью ~ 2 ns проводилось по двум основным параметрам: эффективности и спектру излучения. Эффективность (КПД) рассчитывалась как отношение энергий СВЧ-импульса и импульса тока электронов. Такая характеристика наиболее близка эксперименту, где полная энергия импульса излучения измеряется с помощью широкоапертурного широкополосного калориметра. В описанной модели энергия импульса тока релятивистских электронов в УШ равна 1.5 J, а энергия импульса тока ПРГ равна 17.5 J.

Спектр излучения оценивался с помощью быстрого преобразования Фурье, используемого в коде Карат.

Результаты расчетов

Для корректного сравнения функционирования двух плазменных мазеров — ПРГ и УШ — были проведены расчеты энергии импульса излучения в зависимости от длины плазменно-пучкового взаимодействия L . Для ПРГ подтвердились полученные ранее результаты, послужившие основой создания экспериментальных образцов. Максимальная энергия излучения при различных концентрациях плазмы наблюдалась для СВЧ-генератора с длиной $L = 23$ см, которая и использовалась в дальнейших расчетах.

Эффективность УШ меняется в зависимости от длины, как показано на графике рис. 2. Здесь приведены данные только для двух значений концентрации плазмы, но результаты для других ее значений не меняют вывод об оптимальном значении длины УШ: $L = 50$ см. С увеличением длины до этого значения эффективность излучения растет для всех значений концентрации плазмы, после чего для некоторых из них начинает уменьшаться.

Типичная „осциллограмма“ мощности излучения УШ, т.е. полный поток вектора Пойнтинга на выходе в зависимости от времени, показана на рис. 3. Общая длительность излучения равна ~ 2 ns и совпадает с длительностью тока РЭП, средняя за период мощность достигает 200 MW. Спектр этого излучения представлен на рис. 4, такой характер распределения спектральной

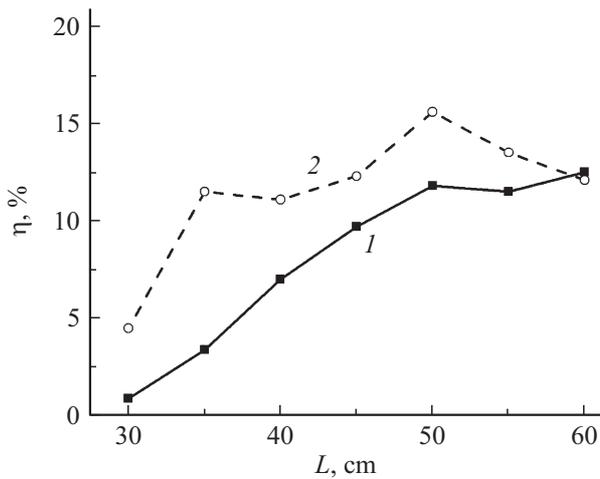


Рис. 2. Эффективность УШ в зависимости от длины L для двух значений концентрации плазмы: 1 — $0.7 \cdot 10^{13}$, 2 — $1.4 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$.

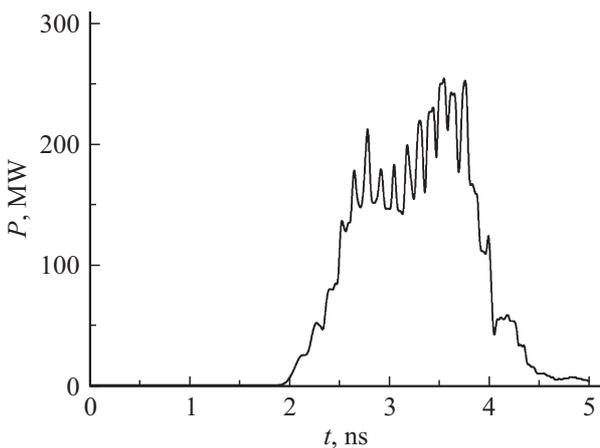


Рис. 3. Поток вектора Пойнтинга на выходе УШ при концентрации плазмы $1.4 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$.

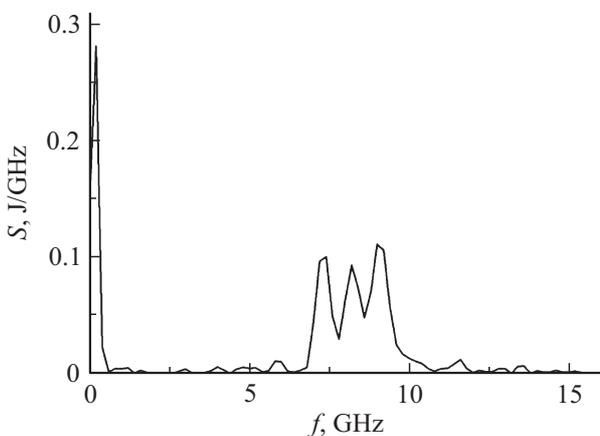


Рис. 4. Спектр излучения на выходе УШ при концентрации плазмы $1.4 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$.

мощности по частотам сохраняется для всех концентраций плазмы. Спектр полного потока вектора Пойнтинга всегда состоит из двух отдельных фракций: низкочастотной и высокочастотной. Первая фракция спектра с частотами до ~ 1 GHz определяется длительностью импульса тока как у известных сверхширокополосных (СШП) генераторов. Частоты второй фракции определяются плазменно-пучковым взаимодействием и меняются при изменении концентрации плазмы. Обратим внимание, что излучение только этой фракции учитывалось в результатах, представленных в настоящей работе. Эффективность всего излучения доходила до 20%, но показанные на графиках значения для второй, управляемой по частоте фракции излучения в СВЧ-диапазоне, не превышали 15%.

Подтвержденная в экспериментах [1,10] способность плазменных мазеров менять частоту излучения в широком диапазоне при изменении концентрации плазмы продемонстрирована на рис. 5. Спектр излучения ПРГ состоит из дискретных частот, соответствующих различным продольным модам плазменно-пучкового резонатора [5], эти частоты обозначены на графике крестиками. Спектр излучения УШ имеет конечную ширину, которой соответствует длина вертикальных линий на графике рис. 5. Частоты излучения обоих мазеров меняются приблизительно одинаково от 4 до 17 GHz при 5-кратном изменении концентрации плазмы.

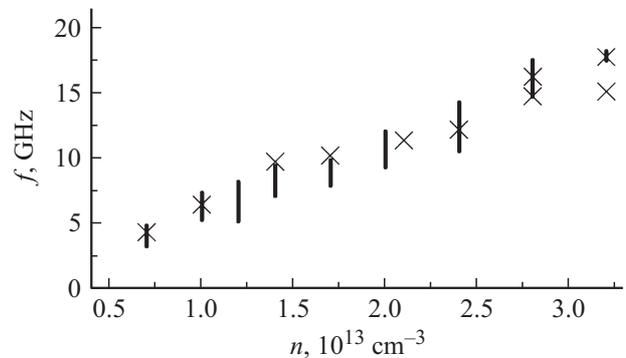


Рис. 5. Частоты излучения в зависимости от концентрации плазмы: вертикальные линии — УШ, крестики — ПРГ.

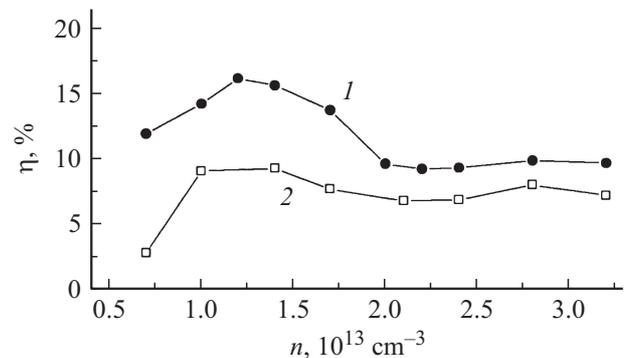


Рис. 6. Эффективность излучения в зависимости от концентрации плазмы: 1 — УШ, 2 — ПРГ.

Отличие УШ от ПРГ демонстрируют зависимости, показанные на рис. 6. При изменении концентрации плазмы эффективность ПРГ остается почти постоянной на уровне 8%. Это меньше эффективности УШ, которая в области низких частот превышает указанную почти вдвое, а при увеличении частоты фиксируется на уровне $\sim 10\%$. В пересчете на длительность СВЧ-импульса 1.5 ns средняя мощность управляемого по частоте излучения УШ равна 100 MW.

Возможности повышения мощности излучения УШ за счет увеличения тока электронного пучка ограничены примерно так же, как и для ПРГ [12]. На рис. 7 показано, что при двукратном увеличении тока РЭП от исходного значения 2 kA энергия СВЧ-импульса растет до 0.4 J при неизменной эффективности. Дальнейшее увеличение тока не приводит к росту энергии СВЧ-импульса, а эффективность заметно падает.

Проведенное сравнение двух близких по устройству плазменных мазеров, ПРГ и УШ, позволяет заключить, что частота их излучения одинаково зависит от концентрации плазмы, но эффективность УШ несколько выше, чем ПРГ. Можно сравнить также рассчитанную здесь эффективность ПРГ с экспериментальными данными: мощностью СВЧ-излучения 50 MW при указанных выше параметрах РЭП: 500 keV, 2 kA, т.е. мощности 1 GW. Экспериментальное значение КПД = 5% менее чем в два раза отличается от рассчитанной эффективности ПРГ, показанной на рис. 6. Можно предположить, что и расчеты УШ имеют примерно такую же точность, т.е. мощность экспериментального УШ может быть больше, чем мощность ПРГ.

Практическое применение УШ возможно на базе существующих генераторов высоковольтных импульсов наносекундной длительности. Для примера можно рассмотреть параметры сильноточного ускорителя [9], который генерировал пакеты импульсов продолжительностью до 1 s с частотой повторения 1–3.5 kHz. Импульсы напряжения 270 kV на катоде ускорителя имели передний фронт 0.2 ns, плато 0.9 ns и задний фронт 2 ns. Охлаждаемый соленоид обеспечивал магнитное поле с

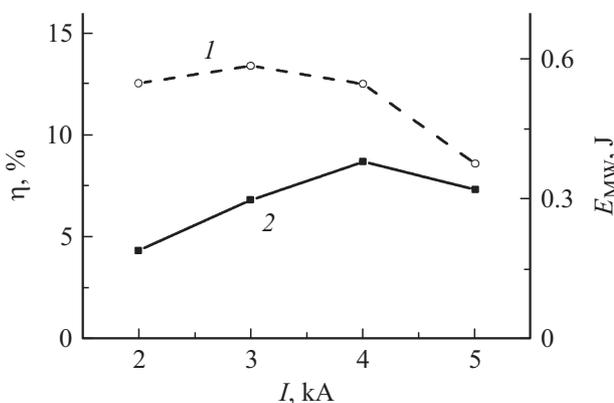


Рис. 7. Параметры излучения УШ в зависимости от тока при концентрации плазмы $1.4 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$: 1 — эффективность η ; 2 — энергия импульса E_{MW} .

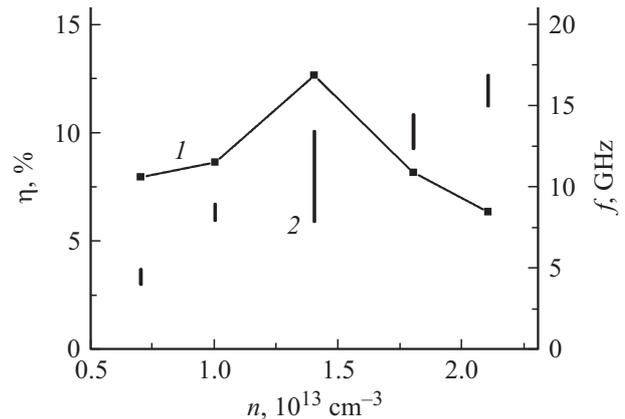


Рис. 8. Параметры излучения УШ в зависимости от концентрации плазмы при использовании ускорителя [9]: 1 — эффективность η , 2 — частота f .

индукцией 2 Т, такой же, как в представленных выше расчетах. Ток электронного пучка ускорителя [9] достигал 2 kA.

Для широкого диапазона концентраций плазмы были проведены расчеты оптимальной длины УШ, аналогичные проиллюстрированным на рис. 2. Отличной была лишь взаимозависимость тока и энергии электронов: по причине длинного заднего фронта импульса расчет тока электронного пучка проводился в соответствии с напряжением на катоде, т.е. по формуле Федосова. Расчеты показали, что с уменьшением энергии электронов длина плазменно-пучкового взаимодействия также уменьшилась до $L = 20 \text{ cm}$ вследствие роста пространственного коэффициента усиления. Результаты моделирования работы УШ с оптимальной длиной при использовании ускорителя [9] показаны на рис. 8. Можно заметить, что по сравнению с аналогичными результатами, показанными выше на рис. 5, частота излучения при той же концентрации плазмы увеличилась. Этот результат понятен, поскольку при снижении энергии от 500 до 270 keV уменьшилась скорость электронов и, соответственно, возросла частота их черенковского резонанса с медленной плазменной волной. Понятно также и снижение эффективности излучения: увеличился коэффициент отражения волны от коллектора, поскольку возросло отличие скорости плазменной волны от скорости ТЕМ-волны в выходном металлическом коаксиальном волноводе.

Заключение

Проведенное численное моделирование показывает, что можно создать новый источник СВЧ-импульсов с широкой перестройкой частоты излучения, основанный на взаимодействии релятивистского электронного пучка с заранее созданной плазмой. Достоверность проведенных расчетов подтверждается адекватностью расчетной модели условиям эксперимента и многочисленны-

ми исследованиями плазменных релятивистских СВЧ-генераторов (ПРГ).

Сокращение длительности импульса сильноточного электронного пучка до ~ 2 ns создает ситуацию, когда обратная связь в ПРГ исчезает. В результате плазменный мазер работает как усилитель собственных шумов (УШ), спектр излучения которого не связан с продольными модами плазменно-пучкового резонатора, а определяется только зависимостью коэффициента усиления волны от частоты. Вместо одной или нескольких фиксированных частот, присутствующих в импульсе ПРГ, спектр излучения УШ имеет ширину ~ 2 GHz, а центральная частота может меняться непрерывно при изменении концентрации плазмы.

Расчеты показали, что при изменении концентрации плазмы частота излучения УШ может меняться так же, как и частота ПРГ, т.е. по крайней мере, в 4 раза. Поскольку 4-кратное (и более) изменение частоты излучения ПРГ было продемонстрировано в эксперименте, можно предположить то же самое и для возможного эксперимента с УШ. При всех частотах излучения эффективность УШ превышает рассчитанную по той же модели эффективность ПРГ, которая в эксперименте равна 5%, поэтому можно обоснованно ожидать не меньшего значения эффективности экспериментального УШ.

Важным достоинством ПРГ с периодическим режимом следования импульсов является способность генерации в очередном СВЧ-импульсе любой частоты рабочего диапазона. Это свойство ПРГ было ранее продемонстрировано в экспериментах [10] с частотой импульсов ускорителя 50 Hz. Поскольку устройство УШ ничем, кроме длины и длительности импульса тока, не отличается от ПРГ, возможность излучения на любой выбранной частоте в очередном импульсе должна реализоваться и в эксперименте с УШ. Напомним, что ширина полосы частот отдельного импульса излучения УШ имеет порядок 1 GHz. Как следствие, возможность с помощью УШ генерации пачки СВЧ-импульсов, равномерно и многократно перекрывающих частотный диапазон в две октавы и более, представляется вполне реализуемой.

Параметры пачки, как и каждого импульса, определяются сильноточным ускорителем электронов. УШ на основе ускорителя [9] способен формировать СВЧ-импульсы с частотой 1 kHz, длительностью 3 ns и средней мощностью за импульс 60 MW в диапазоне частот от 4 до 16 GHz. Это означает, что в течение секунды может быть получено СВЧ-излучение с однородным распределением спектральной плотности энергии в диапазоне 3 см длин волн на уровне 0.1 J/GHz.

Авторы признательны В.П. Тарakanову за помощь в использовании кода KARAT.

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 РФФИ, гранты № 12-08-00638-а и 13-08-00414-а.

Список литературы

- [1] Стрелков П.С., Ульянов Д.К. // Физика плазмы. 2000. Т. 26. № 4. С. 329.
- [2] Loza O.T., Shkvarunets A.G., Strelkov P.S. // IEEE Trans. on Plasma Sci. 1998. Vol. 26. № 3. p. 615.
- [3] Стрелков П.С., Иванов И.Е., Шумейко Д.В. // Физика плазмы. 2012. Т. 38. № 6. С. 536.
- [4] Богданкевич И.Л., Иванов И.Е., Лоза О.Т. и др. // Физика плазмы. 2002. Т. 28. № 8. С. 748.
- [5] Богданкевич И.Л., Лоза О.Т., Павлов Д.А. // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2010. № 2. С. 16.
- [6] Ульянов Д.К., Баранов Р.В., Лоза О.Т. и др. // ЖТФ. 2013. Т. 83. № 9. С. 113.
- [7] Богданкевич И.Л., Лоза О.Т., Павлов Д.А. // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. № 15. С. 1.
- [8] Яландин М.И., Шпак В.Г. // ПТЭ. 2001. № 3. С. 5.
- [9] Гришин Д.М., Губанов В.П., Коровин С.Д. и др. // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. Вып. 19. С. 24.
- [10] Богданкевич И.Л., Гришин Д.М., Гунин А.В. и др. // Физика плазмы. 2008. Т. 34. № 10. С. 926.
- [11] Tarakanov V.P. User's Manual for Code KARAT, Springfield, VA: Berkley Research Associates, Inc, 1992. P. 137.
- [12] Беховская К.С., Богданкевич И.Л., Стрелков П.С. и др. // Прикладная физика. 2010. № 5. С. 54.