

Научная статья
УДК 533.9.082.76
DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-3-5-11

Исследование высокочастотного генератора плазмы с многосекундной длительностью работы

Вадим Александрович Воинцев¹, Даниил Юрьевич Гаврисенко²
Алексей Анатольевич Кондаков³, Олег Захарович. Сотников⁴
Роман Андреевич Финашин⁵

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
Новосибирск, Россия

¹v.vointsev@alumni.nsu.ru

²d.gavrisenko@g.nsu.ru

³A.A.Kondakov@inp.nsk.su

⁴Sotnikov@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0001-5029-3161>

⁵romanfinashindoc@mail.ru

Аннотация

Приведены результаты испытаний мощного высокочастотного генератора плазмы, разработанного для инжектора высокоэнергетичных атомов. Для работы в многосекундных импульсах в генератор введен охлаждаемый щелевой экран. Описывается стабильная работа генератора в импульсах длительностью 20 секунд при ~38 кВт входной мощности, подаваемой на антенну. Проведены измерения плотности ионного тока плазмы на выходе генератора. Исследован нагрев элементов генератора в течении рабочего импульса. Определены основные факторы, влияющие на потерю подаваемой мощности. Снижены потери мощности, вызванные вихревыми токами в кольцевых фланцах.

Ключевые слова

высокочастотный генератор плазмы, защитный экран, инжектор высокоэнергетичных нейтралов

Для цитирования

Воинцев В. А., Гаврисенко Д. Ю., Кондаков А. А., Сотников О. З., Финашин Р. А. Исследование высокочастотного генератора плазмы с многосекундной длительностью работы // Сибирский физический журнал. 2022. Т. 17, № 3. С. 5–11. DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-3-5-11

Investigation of a Radiofrequency Plasma Generator for Multi-Second Pulse Operation

Vadim A. Vointsev¹, Daniil Yu. Gavrisenko², Alexey A. Kondakov³,
Oleg Z. Sotnikov⁴, Roman A. Finashin⁵

Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

¹v.vointsev@alumni.nsu.ru

²d.gavrisenko@g.nsu.ru

³A.A.Kondakov@inp.nsk.su

⁴Sotnikov@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0001-5029-3161>

⁵romanfinashindoc@mail.ru

Abstract

This paper presents the test results of a radiofrequency (RF) plasma generator, developed for neutral beam injectors. A water cooled faraday screen is installed into the generator for multi-second pulse operation. Consistent operation achieved for 20-second long pulses with input power of 38 kW is described. The density of the ion current was measured.

© Воинцев В. А., Гаврисенко Д. Ю., Кондаков А. А., Сотников О. З., Финашин Р. А., 2022

The experiments were conducted to measure the density of the ion current at the driver's output and to evaluate the heating of the driver's elements. Main factors affecting the power losses were determined. The power loss caused by the eddy currents in the driver's clamping flanges were reduced.

Keywords

radiofrequency plasma generator, faraday screen, neutral beam injectors

For citation

Vointsev V. A., Gavrisenko D. Yu., Kondakov A. A., Sotnikov O. Z., Finashin R. A. Investigation of a Radiofrequency Plasma Generator for Multi-Second Pulse Operation. *Siberian Journal of Physics*, 2022, vol. 17, no. 3, pp. 5–11. DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-3-5-11

Введение

Инжекторы быстрых атомов широко используются в крупных термоядерных установках для нагрева и диагностики плазмы. Инжекторы, разработанные в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН успешно используются на различных установках с магнитным удержанием плазмы [1; 2]. Пучки высокоэнергетичных атомов получают за счет ускорения положительных или отрицательных ионов и их последующей нейтрализации в специальной мишени. Для современных термоядерных установок требуются инжекторы, способные работать с пучками с многосекундной длительностью работы [2; 4]. Для работы в многосекундных режимах перспективно использовать источники отрицательных или положительных ионов на основе высокочастотного (ВЧ) индукционного разряда, создаваемого с помощью внутренней или внешней ВЧ-антенн [3].

Целью представленной работы было исследование мощного индукционного ВЧ генератора плазмы с многосекундным режимом работы, разработанного для инжектора на основе отрицательных ионов водорода [5]. Исследовались режимы работы генератора при входной мощности до 55 кВт и продолжительности рабочего импульса до 20 секунд.

1. Конструкция ВЧ генератора плазмы с многосекундной длительностью работы

Схема индукционного ВЧ генератора плазмы представлена на рисунке 1. Индукционный ВЧ разряд поддерживается внутри цилиндрического объема (7) при давлении водорода 0,3–2 Па и подаче ВЧ напряжения на внешнюю трехвитковую антенну (9). Плазма создается внутри цилиндра, сделанного из Al_2O_3 керамики с внутренним диаметром 200 мм, длиной 111 мм и толщиной стенки 7 мм. Внешняя антенна изготовлена из медной трубки диаметром 6 мм, на которую надета термоусаживаемая изоляционная трубка. С торцов плазма ограничена верхним фланцем с мультипольным магнитным полем (4) и нижним фланцем с проходным диаметром 200 мм (11). В центре верхнего фланца расположен узел напуска газа и искрового поджига ВЧ разряда (1–3). Вакуумное уплотнение керамики к торцевым фланцам осуществляется с помощью резиновых колец, прижимаемых фланцами (6 и 10).

Для предотвращения перегрева керамики и ее эрозии плазмой в генератор вставлен защитный цилиндрический экран с Z-образными щелями для проникновения ВЧ поля (рис. 2a) [6]. Z-образные жалюзи экрана сформированы из сплюснутых нержавеющей трубок с исходным диаметром 8 мм и припаянным к ним молибденовых пластин толщиной 0,5 мм и шириной 17 мм (рис. 2b).

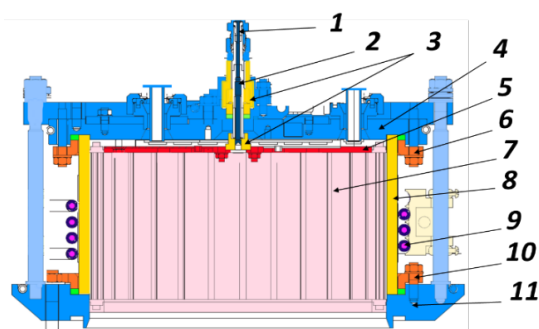


Рис. 1. Схема индукционного ВЧ генератора плазмы: 1 – дозатор водорода, 2 – канал напуска водорода, 3 – изоляторы узла поджига, 4 – верхний фланец, 5 – цилиндрический щелевой экран, 6 – верхний прижимной фланец, 7 – объем плазмы, 8 – керамика Al_2O_3 , 9 – трехвитковая антенна, 10 – нижний прижимной фланец, 11 – нижний фланец

Fig. 1. Scheme of the inductive RF plasma generator: 1—hydrogen dispenser, 2—hydrogen inlet channel, 3—ignition unit insulators, 4—upper flange, 5—faraday screen, 6—upper clamping flange, 7—plasma volume, 8— Al_2O_3 ceramics, 9—three-turn antenna, 10—bottom clamping flange, 11—bottom flange

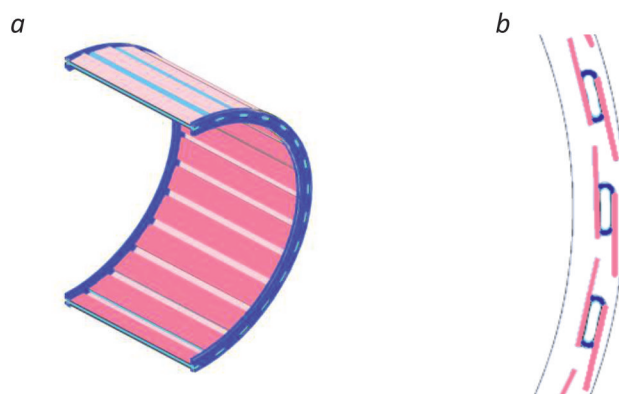


Рис. 2. Молибденовый экран с Z-образными щелями: а) 3D-рисунок половины экрана, б) поперечное сечение Z-образных жалюзи экрана
Fig. 2. Molybdenum faraday screen with Z-shaped slots: a) 3D drawing of half of the screen; b) cross-section of the screen's Z-louver

2. Тепловой режим ВЧ генератора плазмы

Для обеспечения работы генератора в режимах с большой мощностью и длительностью импульсов его основные компоненты (защитный экран, антенна, узел поджига, торцевые фланцы) охлаждаются посредством прокачки дистиллированной воды. Остальные элементы охлаждаются внутри путем отведения тепла через прижимные контакты, а снаружи – за счет конвекции воздуха. Основными источниками нагрева элементов генератора являются потоки оседающей на стенки плазмы, омические потери в ВЧ антенне и потери на вихревые токи, возбуждаемые ВЧ полем в кольцевых электродах (защитном экране, торцевых и уплотнительных фланцах). Численное моделирование теплового режима контактирующего с плазмой защитного экрана было произведено при помощи пакета COMSOL. Расчетные распределения температуры по поверхности экрана и по поверхности защитных жалюзи приведены на рисунке 3.

Максимальная температура жалюзи экрана в стационарном режиме при равномерной нагрузке мощностью 20 кВт и охлаждении экрана водой (20 °С, 10 л/мин) не превышает 140 °С (рис. 3). Расчетная температура спаия молибденовых пластин с нержавеющей трубками (область X от 0 до 7 мм на рис. 3) не превышает 55 °С, в то время как максимальная температура торца молибденовых пластин не превышает 140 °С. Пониженная температура экрана в зоне пайки принципиально важна для обеспечения его устойчивой работы при циклической тепловой нагрузке (нагрев – охлаждение), которая была подтверждена последующими успешными испытаниями генератора с описываемым экраном в импульсах мощностью до 38 кВт и длительностью до 20 с.

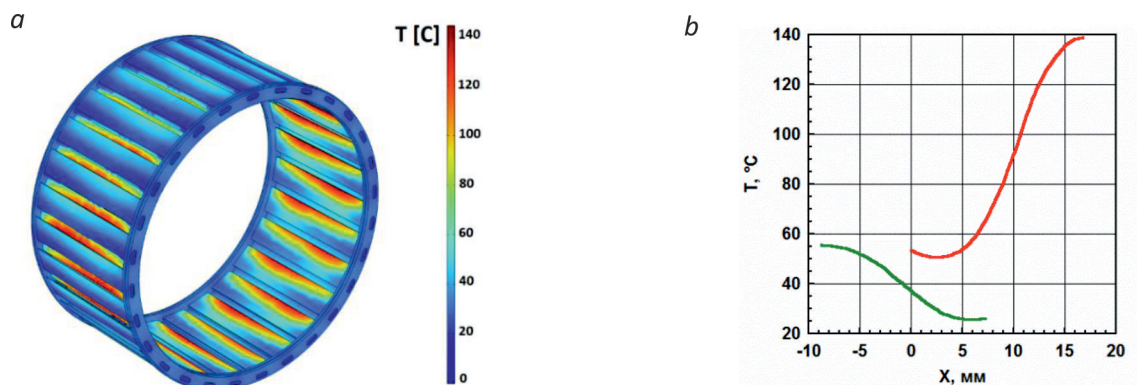


Рис. 3. Распределение температуры по поверхности экрана (а) и по поверхности защитных жалюзи (b: зеленая линия – внешняя пластина, красная – внутренняя) при равномерной нагрузке мощностью 20 кВт на внутреннюю поверхность экрана

Fig. 3. Temperature distribution over the surface of the screen (a) and over the surface of the protective Z-louver (b: green—outer plate, red—inner plate) with a uniform 20 kW load on the inner surface of the screen

Потери ВЧ мощности на вихревые токи, возбуждаемые в элементах конструкции, оценивались следующим образом. ВЧ поле генератора возбуждалось параллельным колебательным контуром с собственной частотой контура 4 МГц, индуктивностью которого является антенна генератора, а емкость состоит из набора внешних конденсаторов. В отсутствие плазмы мощность вихревых потерь P в контуре обратно пропорциональна эквивалентному «параллельному» сопротивлению контура R : $P = \frac{U^2}{2R}$, где U – амплитуда напряжения на антенне. Само эквивалентное параллельное сопротивление R можно найти, измеряя исходную добротность колебательного контура Q и его добротность Q^* с внешним сопротивлением r , добавленным параллельно исходному ВЧ контуру. В этом случае R определяется по формуле:

$$R = r \left(\frac{Q}{Q^*} - 1 \right)$$

Определенное таким образом параллельное сопротивление ВЧ генератора без защитного экрана составило $R = 6,5$ кОм, что при напряжении на антенне $U = 10$ кВ дает потери $P = 7,7$ кВт.

Аналогичным образом с помощью измерения добротностей контуров было определено влияние различных элементов ВЧ генератора на их вихревые потери. Установлено, что наибольший вклад в потери ВЧ мощности дают нержавеющие прижимные фланцы (6 и 10 на рис. 1). При нанесении медного покрытия на эти фланцы эквивалентное параллельное сопротивление контура (без экрана) было увеличено до 9,4 кОм, а вихревые потери снижены до $P \sim 5,3$ кВт (при $U = 10$ кВ).

Параллельное сопротивление контура с Z-образным защитным экраном и омедненными прижимными фланцами составило 5,6 кОм, что соответствует потерям $P = 8,9$ кВт при $U = 10$ кВ. Для дальнейшего снижения вихревых потерь ВЧ генератора с Z-образным экраном предлагается нанести тонкий слой меди толщиной 30 мкм с внешней стороны экрана.

3. Зондовые измерения плазмы

Плотность тока положительных ионов вытекающей плазмы измерялась плоским сеточным зондом [7], который устанавливался на выходе ВЧ генератора плазмы. Для измерения распределения плотности тока зонд перемещался вдоль диаметра генератора плазмы. Ионы плазмы вытягивались с помощью напряжения 2,5 кВ, прикладываемого между двумя электродами

зонда. На рисунке 4 показаны распределение плотности тока положительных ионов на зонд вдоль диаметра генератора с экраном с Z-образными щелями (a) и зависимость мощности ВЧ генератора $P_{ВЧ}$ и тока на зонд от напряжения на антенне (b). Ширина профиля на полувысоте составляет 170 мм, полный ток ионов на выходе из генератора плазмы диаметром 180 мм составил 46 А. Как видно на рисунке 4, плотность тока положительных ионов возрастает квадратично с напряжением на антенне и пропорциональна ВЧ мощности. При мощности 55 кВт плотность ионного тока составила 250 мА/см².

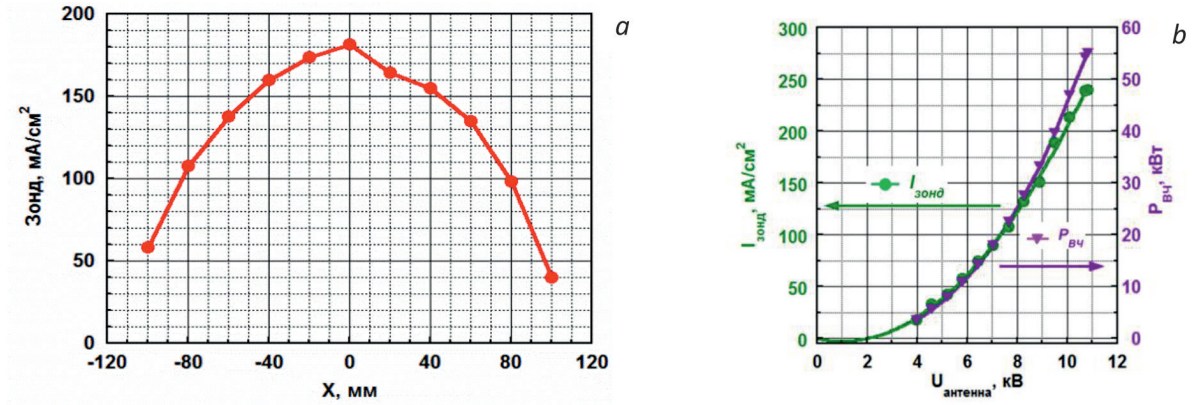


Рис. 4. Зондовые измерения: a – распределение плотности тока на сеточный зонд при мощности ВЧ генератора $P_{ВЧ} = 34$ кВт; b – зависимость выходной мощности ВЧ генератора $P_{ВЧ}$ и плотности тока положительных ионов на выходе генератора плазмы от напряжения на антенне $U_{антенна}$

Fig. 4. Probe measurements: a—distribution of the positive ion current density on the grid probe with the output power of 34 kW; b—the dependency of the output power of the RF driver and the current density from the voltage on the antenna

4. Работа ВЧ генератора плазмы в длинных импульсах

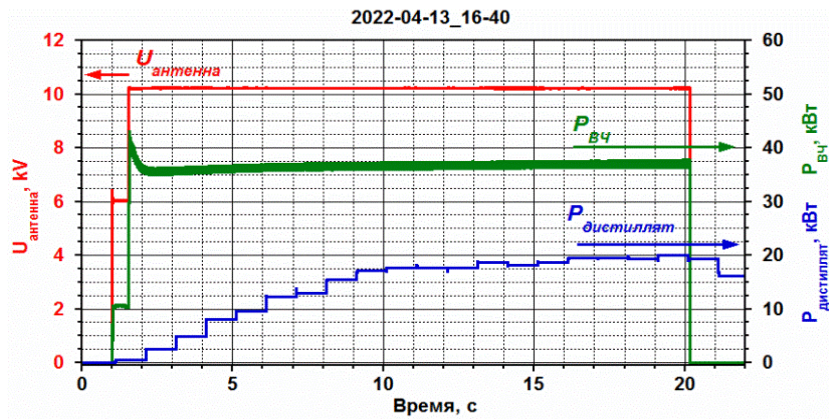


Рис. 5. Осциллограммы напряжения на антенне U_A и входной мощности $P_{ВЧ}$ в 20-секундном импульсе

Fig. 5. Antenna voltage and input power oscillograms during a 20-second pulse

Осциллограммы напряжения на ВЧ антенне, мощности ВЧ на выходе генератора и мощности, уносимой водой в импульсе ВЧ разряда длительностью 10 секунд, показаны на рисунке 5. Мощность, уносимая с ВЧ генератора водой, характеризует нагрев экрана и задней крышки. Характерное время нагрева экрана составляет 10 секунд, далее уносимая мощность выходит на стационар. Температура воды в стационарном режиме составила ~ 10 °С при потоке 20 л/мин.

Результаты испытаний генератора в режиме длинных импульсов показали, что защитный экран обеспечивает необходимую защиту керамики: видимых деформаций экрана или эрозии керамики не наблюдалось. Измерения показали, что при входной мощности 38 кВт потери и оседание плазмы в ВЧ генераторе составили 20 кВт, а оставшиеся 18 кВт проходили в виде плазмы в вакуумный объем. С учетом плазмы, падающей на экран, эффективность передачи ВЧ мощности в плазму составляет около 60 %. Основным источником потерь (~9 кВт) являются вихревые токи.

Заключение

В данной работе приведены результаты исследования генератора с Z-образным защитным экраном и его вихревых потерь. Экран с Z-образными щелями позволяет стабильно работать в режимах многосекундных импульсов с входной мощностью антенны 38 кВт и вкладываемой в разряд мощностью 23 кВт. Достигнута плотность тока на зонд 250 мА/см² при мощности 55 кВт. Эффективность передачи мощности плазме при мощности ВЧ генератора 38 кВт составляет около 60 %, значительная доля ВЧ мощности уходит на нагрев экрана. Омеднение фланцев привело к снижению потерь мощности на 5,5 %. Дальнейшее увеличение плотности тока плазмы возможно за счет установки внешних ферритов, увеличения мощности ВЧ генератора, а также нанесения на экран медного покрытия с внешней стороны для уменьшения вихревых потерь.

Список литературы

1. **Ivanov A. A. et al.** Radio frequency ion source for plasma diagnostics in magnetic fusion experiments // *Rev. Sci. Instrum.* 2000. No. 71. Pp. 3728–3735.
2. **Бельченко Ю. И., Давыденко В. И., Дейчули П. П. и др.** Исследования по физике и технике ионных и атомарных пучков в ИЯФ СО РАН // *Успехи физических наук.* 2018. № 188. С. 595–650.
3. **Brown I. G.** *The Physics and Technology of Ion Sources.* Wiley-VCH, 2004. 30 p.
4. **Belchenko Yu. et al.** Possible Scheme of Atomic Beam Injector for Plasma Heating and Current Drive at the TRT Tokamak // *Plasma Physics Reports.* 2021. No. 47(11). Pp. 1151–1157.
5. **Sotnikov O. et al.** Development of high-voltage negative ion based neutral beam injector for fusion devices // *Nuclear Fusion.* 2021. No. 61. P. 116017.
6. **Тиунов М. А.** Полный расчет трехмерных квазистационарных электромагнитных полей в приближении сильного скин-эффекта методом граничных интегральных уравнений // *Вестник НГУ. Серия: Физика.* 2014. № 9.
7. **Shikhovtsev I. V. et al.** Inductive RF drivers for neutral beam injectors at BINP. *AIP Conf. Proc.* 2018. No. 2052. P. 040016.

References

1. **Ivanov A. et al.** Radio frequency ion source for plasma diagnostics in magnetic fusion experiments. *Rev. Sci. Instrum.* 2000, vol. 71, pp. 3728–3735.
2. **Belchenko Yu., Davydenko V., Deichuli P. et al.** Research in physics and technology of ion and atomic beams at the INP SB RAS. *Advances in the physical sciences*, 2018, vol. 188, pp. 595–650.
3. **Brown I. G.** *The Physics and Technology of Ion Sources.* Wiley-VCH, 2004, vol. 30.
4. **Belchenko Yu. et al.** Possible Scheme of Atomic Beam Injector for Plasma Heating and Current Drive at the TRT Tokamak. *Plasma Physics Reports*, 2021, vol. 47(11), pp. 1151–1157.
5. **Sotnikov O. et al.** Development of high-voltage negative ion based neutral beam injector for fusion devices. *Nuclear Fusion*, 2021, vol. 61, p. 116017.

6. **Tiunov M.** Complete calculation of three-dimensional quasi-stationary electromagnetic fields in the strong skin-effect approximation by the method of boundary integral equations. *Vestnik NSU. Series: Physics*, 2014, vol. 9.
7. **Shikhovtsev I. et al.** Inductive RF drivers for neutral beam injectors at BINP. *AIP Conf. Proc.*, 2018, vol. 2052, p. 040016.

Информация об авторах

Олег Захарович Сотников, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН (Новосибирск, Россия)

Вадим Александрович Воинцев, аспирант, инженер-исследователь, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН (Новосибирск, Россия)

Даниил Юрьевич Гаврисенко, магистрант Новосибирского Государственного Университета, старший лаборант, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН (Новосибирск, Россия)

Алексей Анатольевич Кондаков, научный сотрудник, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН (Новосибирск, Россия)

Роман Андреевич Финашин, научный сотрудник, кандидат технических наук, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН (Новосибирск, Россия)

Information about the Authors

Oleg Z. Sotnikov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation)

Vadim A. Vointsev, Graduate Student, Researcher-Engineer, Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation)

Daniil Yu. Gavrisenko, Master Student of Novosibirsk State University, Senior Assistant, Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation)

Alexey A. Kondakov, Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation)

Roman A. Finashin, Researcher, Candidate of Technical Sciences, Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation)

*Статья поступила в редакцию 30.06.2022; одобрена после рецензирования 13.09.2022;
принята к публикации 13.09.2022*

*The article was submitted 30.06.2022; approved after reviewing 13.09.2022;
accepted for publication on 13.09.2022*