

УДК 621.039.647

ИОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА С БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ ФОКУСИРОВКОЙ МОЩНОГО ИНЖЕКТОРА ПУЧКА АТОМОВ ДЕЙТЕРИЯ ДЛЯ НАГРЕВА ПЛАЗМЫ

*B.X. Амиров¹, A.I. Горбовский¹, V.I. Давыденко¹, P.P. Дейчули¹, A.A. Иванов¹, V.A. Капитонов¹,
V.V. Мишагин¹, A.V. Сорокин¹, I.V. Шиховцев^{1, 2}*

¹*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия*

²*Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

Для нагрева плазмы в токамаке TCV (Лозанна, Швейцария) в ИЯФ СО РАН разработан перезарядный инжектор сфокусированного пучка быстрых атомов дейтерия энергией 30 кэВ, мощностью 1 МВт и длительностью 2 с. В ионном источнике этого инжектора для формирования пучка используется многощелевая трёхэлектродная ионно-оптическая система с электродами сферической формы и эмиссионной областью диаметром 250 мм. Угловая расходимость ионного пучка, сформированного многощелевой ионно-оптической системой, имеет достаточно малую величину в направлении вдоль щелей, что обеспечивает аккуратный вход сфокусированного пучка быстрых атомов в узкий инжекционный порт токамака. Во время формирования ионного пучка электроды ионно-оптической системы нагреваются вторичными частицами и требуется охлаждение электродов. Для повышения прозрачности ионно-оптической системы и простоты изготовления был принят инерционный вариант охлаждения электродов. Во время импульса рост температуры ограничивается теплоёмкостью электродов, а между импульсами тепло передаётся на водоохлаждаемые присоединительные фланцы электродов. Проведённый термомеханический анализ показал, что для достижения приемлемых величин продольных прогибов электродов, возникающих из-за термоупругих напряжений, необходимо снижение жёсткости электродов на периферии области формирования пучка. Такое снижение было достигнуто за счёт введения разрезов — азимутальных для плазменного электрода и радиальных для ускоряющего и заземлённого электродов. В статье представлены особенности конструкции и технологии изготовления многощелевых электродов ионно-оптической системы.

Ключевые слова: инжекторы пучков быстрых атомов, ионно-оптическая система, многоапertureные электроды, термомеханические деформации.

ION-OPTICAL SYSTEM WITH BALLISTIC FOCUSING OF A POWERFUL DEUTERIUM ATOM BEAM INJECTOR FOR PLASMA HEATING

*V.Kh. Amirov¹, A.I. Gorbovskiy¹, V.I. Davydenko¹, P.P. Deychuli¹, A.A. Ivanov¹, V.A. Kapitonov¹,
V.V. Mishagin¹, A.V. Sorokin¹, I.V. Shikhovtsev^{1, 2}*

¹*Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia*

²*Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia*

To heat the plasma in the TCV tokamak (Lausanne, Switzerland), a charge exchange injector of a focused beam of fast deuterium atoms with an energy of 30 keV, a power of 1 MW and a duration of 2 s has been developed at the INP SB RAS. In the ion source of this injector, a multi-slit three-electrode ion-optical system with spherical electrodes and an emission region with a diameter of 250 mm is used to form the beam. The angular divergence of the ion beam formed by the multi-slit ion-optical system is sufficiently small in the direction along the slits, which ensures accurate entry of a focused beam of fast atoms into the narrow injection port of the tokamak. During the formation of the ion beam, the electrodes of the ion-optical system are heated by secondary particles and cooling of the electrodes is required. To increase the transparency of the ion-optical system and ease of manufacture, an inertial version of cooling the electrodes was adopted. During a pulse, the rise in temperature is limited by the heat capacity of the electrodes, and between pulses, heat is transferred to the water-cooled connecting flanges of the electrodes. The performed thermomechanical analysis showed that in order to achieve acceptable values of the longitudinal deflections of the electrodes arising from thermoelastic stresses, it is necessary to reduce the stiffness of the electrodes at the periphery of the beam formation region. This reduction was achieved due to the introduction of cuts - azimuthal for the plasma electrode and radial for the accelerating and grounded electrodes. The article presents the design features and manufacturing technology of multi-slit electrodes of the ion-optical system.

Key words: fast atom beam injectors, ion-optical system, multi-aperture electrodes, thermomechanical deformations.

DOI: 10.21517/0202-3822-2020-43-3-111-117

ВВЕДЕНИЕ

Для нагрева плазмы в токамаке TCV (Лозанна, Швейцария) используется разработанный в Институте ядерной физики СО РАН инжектор пучка атомовдейтерия энергией 30 кэВ, мощностью пучка 1 МВт и длительностью импульса до 2 с [1]. Прямоугольный инжекционный порт токамака TCV имеет относительно небольшую высоту 170 мм и ширину 220 мм, что накладывает довольно жёсткие ограничения на начальный размер пучка и его угловую расходимость. Малый вертикальный размер порта не позволил использовать разработанную ранее триодную ионно-оптическую систему с круглыми отверстиями и баллистической фокусировкой за счёт сферической формы электродов [2]. Поэтому для уменьшения потерь при прохождении пучка через инжекционный порт была разработана многощелевая трёхэлектродная ионно-оптическая система с баллистической фокусировкой. Угловая расходимость пучка вдоль вертикально расположенных щелей достаточно мала, и в результате сфокусированный пучок быстрых атомов с эллиптическим сечением проходит через инжекционный порт с приемлемыми потерями. В статье представлена конструкция многощелевых электродов ионно-оптической системы инжектора, приведены результаты моделирования термомеханических деформаций электродов и кратко описана технология их изготовления.

ЭЛЕКТРОДЫ ИОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Общий вид перезарядного инжектора мощного пучка быстрых атомов дейтерия для нагрева плазмы в токамаке TCV показан на рис. 1. Ионный источник формирует сфокусированный пучок ионов дейтерия с током до 45 А и энергией до 30 кэВ. Сформированный пучок ионов далее перезаряжается в атомы в газовой мишени нейтрализатора. Неперезарядившиеся ионы отклоняются магнитом и попадают в водоохлаждаемый приёмник. Откачка инжекторного бака производится четырьмя крионасосами. Для измерения мощности полученного пучка быстрых атомов на выходе инжекторного бака пристыкован раздвижной калориметр.

В ионном источнике, показанном на рис. 2, плазменный эмиттер создаётся индукционным ВЧ-разрядом. Для формирования пучка дейтерия используется многощелевая трёхэлектродная ионно-оптическая система со сферическими электродами. В результате численных расчётов и экспериментальных исследований [3, 4]

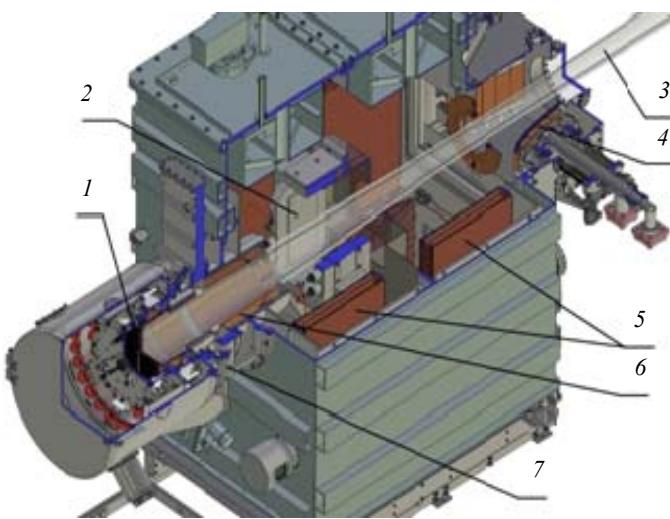


Рис. 1. Инжектор мощного пучка быстрых атомов дейтерия для нагрева плазмы в токамаке TCV: 1 — ионный источник; 2 — поворотный магнит; 3 — пучок быстрых атомов; 4 — калориметр; 5 — крионасосы; 6 — нейтрализатор; 7 — узел прицеливания

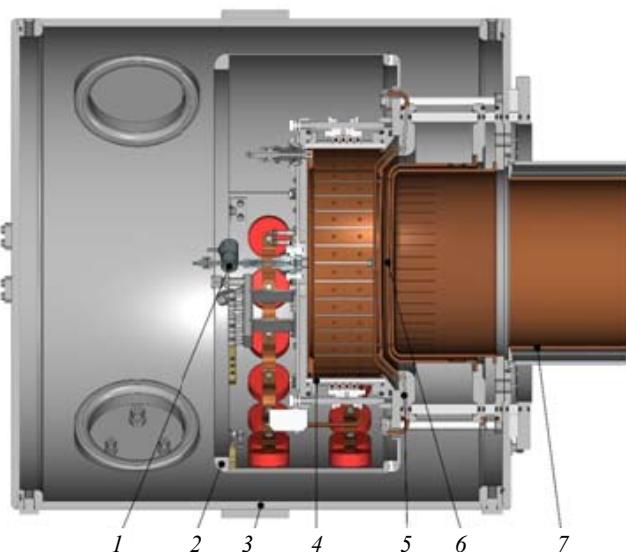


Рис. 2. Схема ионного источника: 1 — газовый клапан; 2 — внутренний магнитный экран; 3 — внешний магнитный экран; 4 — плазменный ВЧ-эмиттер; 5 — изоляторный узел ионно-оптической системы; 6 — электроды ионно-оптической системы; 7 — нейтрализатор

была выбрана показанная на рис. 3 геометрия ячейки ионно-оптической системы с эмиссионной щелью шириной 3 мм и длиной 47 мм. Измеренная угловая расходимость отдельного пучка, сформированного щелевой ячейкой, составляет 10 мрад в направлении вдоль щели и 22 мрад в направлении поперёк щели. Щели расположены с шагом 6 мм в круге с диаметром 250 мм. Общая прозрачность плазменного электрода имеет величину 45%. Фокусное расстояние ионно-оптической системы составляет 4,1 м.

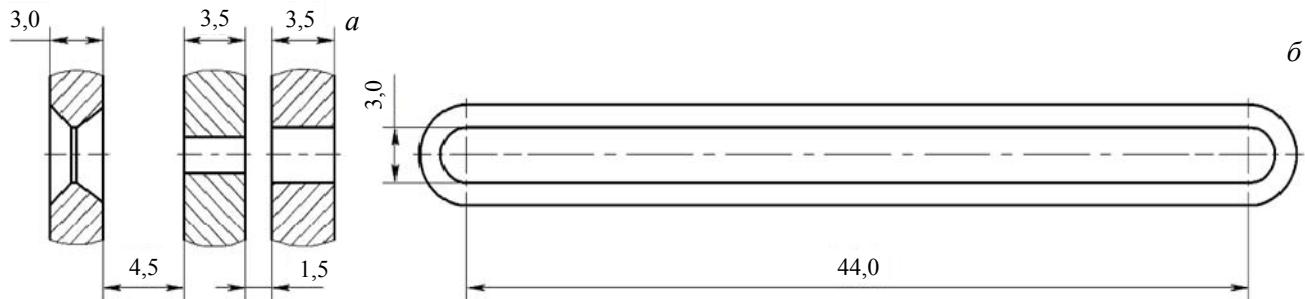


Рис. 3. Отдельная щелевая ячейка ионно-оптической системы: *а* — разрез ячейки, *б* — вид щели плазменного электрода со стороны плазменного эмиттера

Плазменный электрод является наиболее сложным для изготовления, поскольку имеет небольшую толщину сеток и щели с фасками. Электрод изготовлен из хромоциркониевой бронзы марки БрХЦр. Этот материал имеет высокую твёрдость НВ $1^{0-1} = 110—140$ МПа, теплопроводность $\lambda = 366$ Вт/(м·град) и электропроводность хромоциркониевой бронзы, близкие к меди. Высокая твёрдость материала плазменного электрода необходима для поддержания сферической формы сеток.

Перед началом механической обработки все заготовки проверялись на твёрдость по шкале Бринелля. Если твёрдость какой-либо заготовки оказывалась ниже требуемой величины, то её подвергали дополнительной термической обработке (старению) для получения необходимой твёрдости. После этого производилась токарная обработка заготовки для получения требуемого профиля электрода (рис. 4).

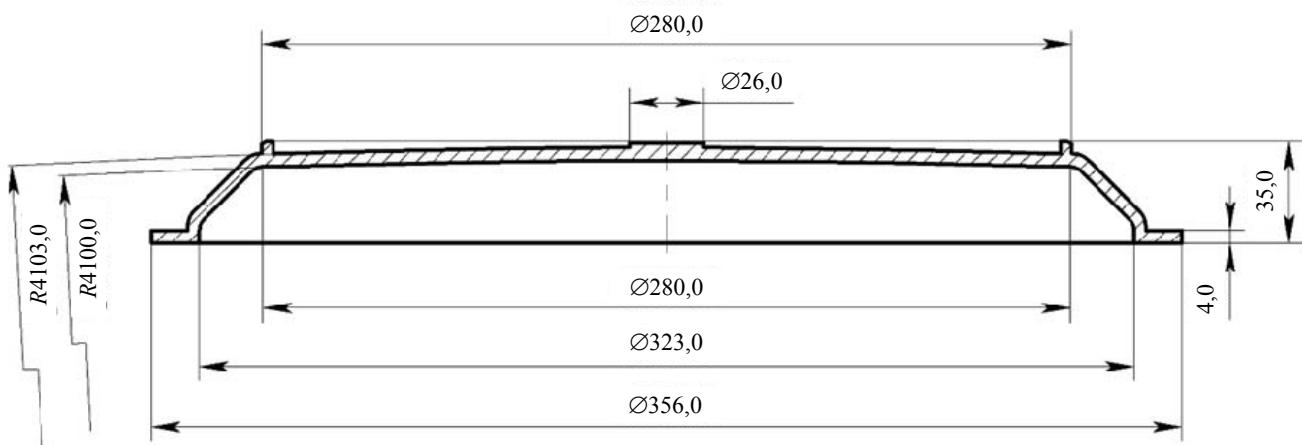


Рис. 4. Заготовка плазменного электрода после токарной обработки

В процессе токарной обработки контроль размеров проводился на измерительной машине «Оптон».

После токарной обработки электрод подвергался фрезерной обработке в специальной алюминиевой оправке с формированием щелевых пазов. В процессе обработки пазов, после определённого количества операций, производился контрольный обмер радиусов внутренней и наружных сфер электрода. Если размеры не соответствовали номинальным, то сетку подвергали терморихтовке в стальной оправке, которая имела размеры, соответствующие номинальным размерам радиусов сфер при температуре не менее 800 °C.

Фрезеровка щелей электрода выполнялась сначала с внутренней стороны электрода, а затем с наружной. После фрезеровки щелей в плазменном электроде электроискровой обработкой прорезались азимутальные пазы нужной геометрии.

Заготовки второго и третьего электродов изготавливались из трёх элементов — диска из бронзы БрХЦр, обечайки и фланца из меди М1 методом пайки в вакууме. Операции по обработке этих электродов проводились в том же порядке, что и для первого.

Во время формирования пучка электроды ионно-оптической системы нагреваются вторичными частицами и требуется охлаждение электродов. Типичное значение мощности нагрева каждого из электродов составляет $\sim 1\%$ от полной мощности пучка. Электроды ионно-оптической системы установлены на фланцах с водяным охлаждением, что обеспечивает отвод тепла от электродов в промежутке между импульсами длительностью 5 мин.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ ЭЛЕКТРОДОВ



Рис. 5. Расположение щелей в начальном варианте плазменного электрода

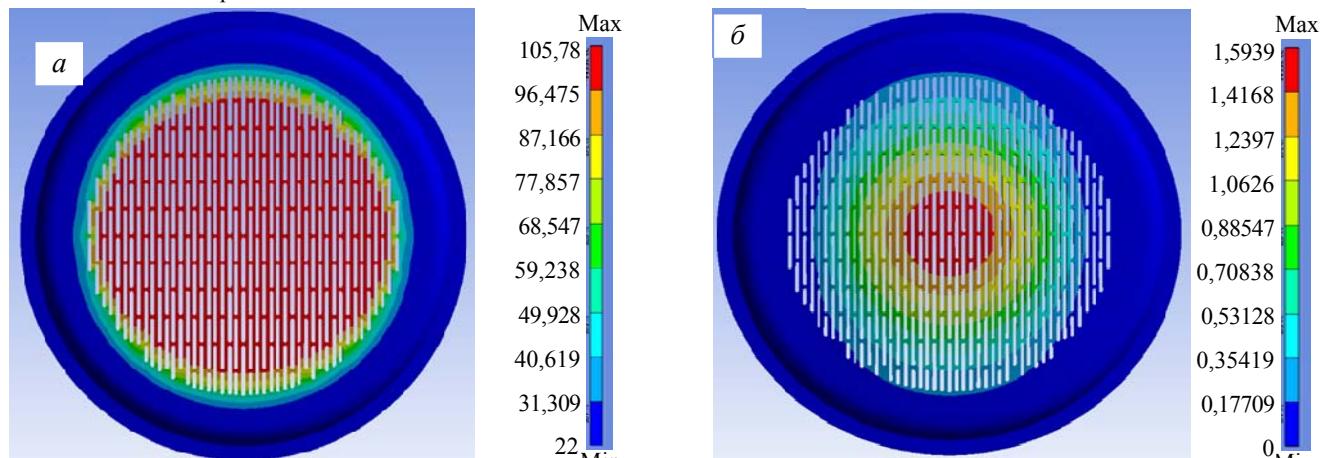


Рис. 6. Распределение температуры (a) и продольная деформация (б) плазменного электрода в конце импульса длительностью 2 с

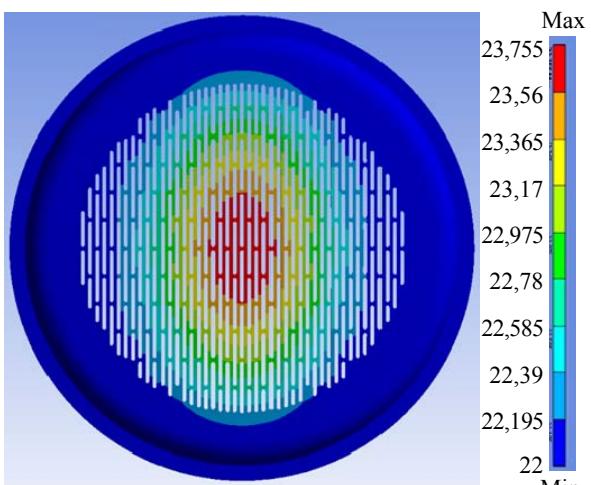


Рис. 7. Профиль температуры плазменного электрода через 300 с после импульса

Расчёты распределений температуры и деформаций в электродах ионно-оптической системы проводились с использованием программного комплекса ANSYS [5]. Расположение щелей в начальном варианте плазменного электрода показано на рис. 5. Результаты расчёта распределений температуры и продольной деформации этого варианта плазменного электрода в конце импульса прогрева длительностью 2 с и мощностью 12 кВт при начальной температуре электродов 22 °C показаны на рис. 6. Максимальная температура достигается в центре электрода в конце импульса прогрева и составляет 105 °C, а через 300 с остыния после импульса (300 с — пауза между импульсами) температура в центре электрода снижается до 23,7 °C. Профиль темпе-

туры электрода через 300 с после рабочего импульса показан на рис. 7. Максимальное смещение вдоль оптической оси в центре электрода имеет величину 1,5 мм. Такая величина смещения является недопустимо большой, поскольку соизмерима с величиной зазора между плазменным и вытягивающим электродами. В этом случае формирование отдельных пучков из элементарных щелевых ячеек будет неоптимальным и они будут иметь значительную угловую расходимость поперёк щелей.

Для уменьшения прогиба плазменного электрода было решено снять термоупругие напряжения за счёт введения на периферии эмиссионной области азимутальных пазов. При этом отвод тепла из центральной части электрода между импульсами затруднён. Для

организации дополнительного теплосъёма в центральной части электрода был введён дополнительный конструктивный элемент — площадка охлаждения, которая механически соединяется с бобышкой, сквозь которую проходит охлаждаемая водой трубка. Трубка закреплена на краях электрода снаружи от разрезов для снижения механической нагрузки на рабочую часть.

Расчётные профили нагрева и продольной деформации окончательного варианта плазменного электрода за импульс длительностью 2 с показаны на рис. 8. Максимальный нагрев электрода за импульс составил 106 °C, температура в центре электрода к следующему импульсу (остывание 300 с) снижается до 37,1 °C (рис. 9), максимальная продольная деформация имеет величину 0,09 мм. Полученные значения температуры и продольного смещения плазменного электрода являются вполне допустимыми.

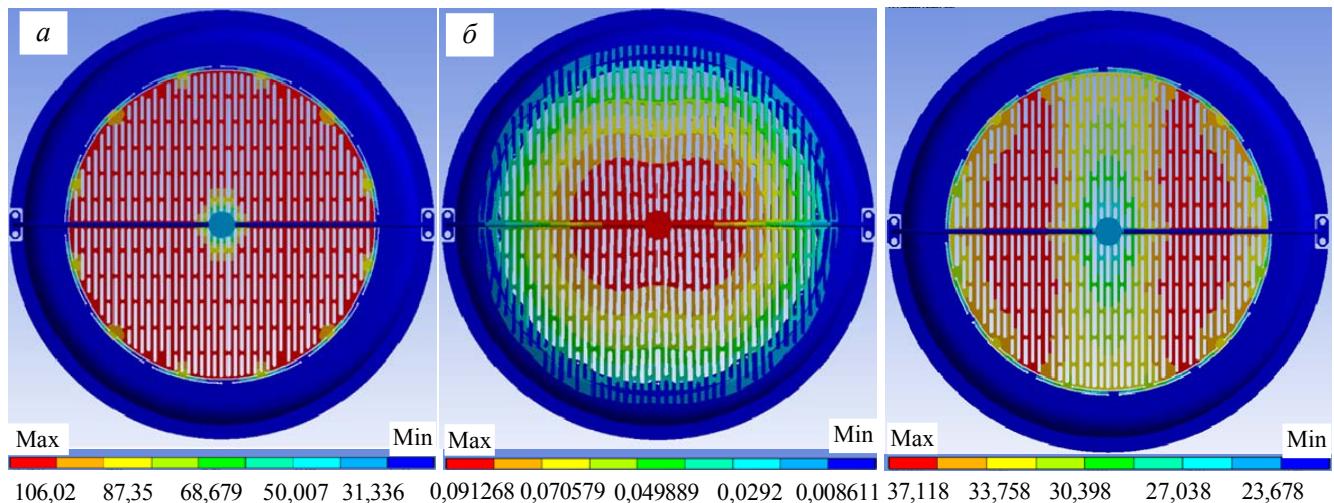


Рис. 8. Профиль нагрева (а) и деформация (б) окончательного варианта плазменного электрода за импульс длительностью 2 с

Рис. 9. Профиль температуры плазменного электрода через 300 с после рабочего импульса

Второй, вытягивающий электрод имеет протяжённую цилиндрическую часть, в конце которой перед присоединительным фланцем расположены отверстия для дополнительной откачки дейтерия из зазоров ионно-оптической системы. Наличие цилиндрической части позволило использовать радиальные разрезы для снижения жёсткости электрода на периферии рабочей области. Радиальные разрезы не препятствуют отводу тепла от рабочей части электрода. Результаты расчёта распределений температуры и продольной деформации варианта вытягивающего электрода в конце импульса прогрева длительностью 2 с и мощностью 12 кВт показаны на рис. 10. Максимальный нагрев электрода за импульс имеет величину

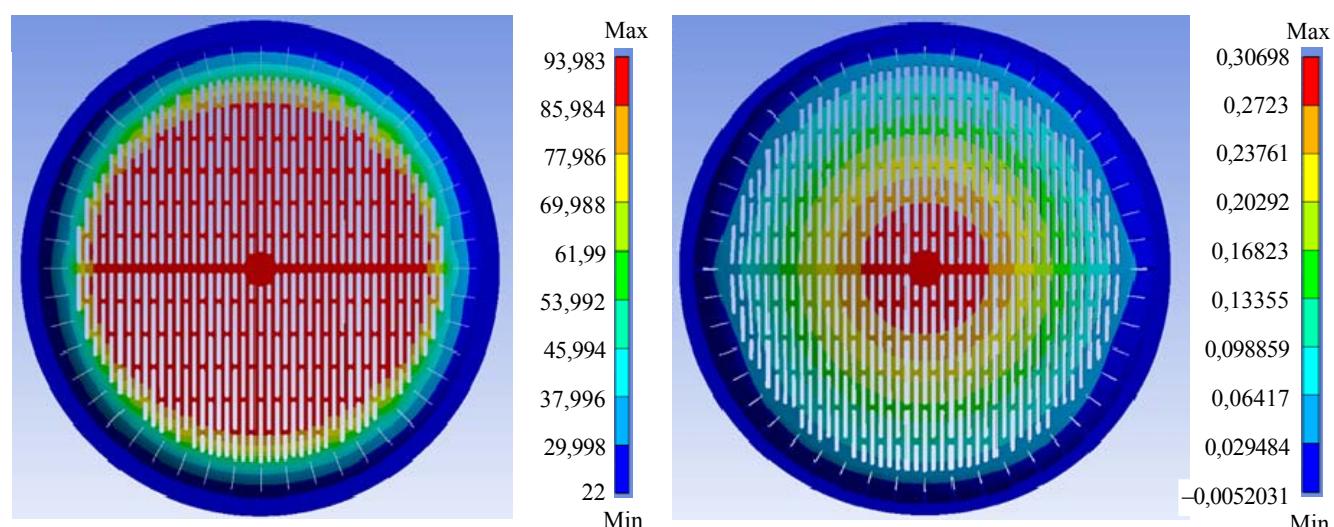


Рис. 10. Распределение температуры (а) и продольная деформация (б) вытягивающего электрода за импульс длительностью 2 с

93,9 °C, температура в центре электрода к следующему импульсу снижается до 27 °C, максимальная продольная деформация имеет величину 0,3 мм (этот вариант вытягивающего электрода был принят для применения в ионно-оптической системе ионного источника инжектора).

Конструкция третьего, заземлённого электрода подобна конструкции второго электрода, и результаты термомеханических расчётов для третьего электрода близки к результатам расчётов для второго электрода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время инжектор пучка быстрых атомов дейтерия с описанной многощелевой ионно-оптической системой успешно используется в экспериментах по нагреву плазмы на токамаке TCV [6]. Решения, принятые для конструкции многощелевых электродов ионно-оптических систем, также могут быть использованы для ионно-оптических систем других инжекторов. В то же время увеличение длительности импульса инжекции пучка быстрых атомов потребует перехода к ионно-оптическим системам с интенсивным охлаждением внутренними водяными каналами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Karpushov A.N., Chavan R., Coda S. et al.** Neutral beam heating on the TCV tokamak. — Fusion Eng. Des., 2017, vol. 123, p. 468.
2. **Sorokin A., Belov V., Davydenko V. et al.** Characterization of 1 MW, 40 keV, 1 s neutral beam for plasma heating. — Rev. Sci. Instrum., 2010, vol. 81, p. 02B108.
3. **Davydenko V., Amirov V., Gorbovsky A. et al.** Multi-slit triode ion optical system with ballistic beam focusing. — Ibid., 2016, vol. 87, p. 02B303.
4. **Sorokin A.V., Akhmetov T.D., Brul A.V. et al.** Update of ion-optical system of neutral beam of tokamak à configuration variable. — Ibid., 2020, vol. 91, p. 013323.
5. <http://www.ansys.com> for ANSYS Workbench Platform.
6. **Karpushov A.N., Alberti S., Chavan R. et al.** Upgrade of the TCV tokamak, first phase: neutral beam heating system. — Fusion Eng. Des., 2015, vol. 96—97, p. 493.



Владислав Харисович
Амиров, ведущий кон-
структор; ИЯФ им.
Г.И. Будкера СО РАН,
630090 Новосибирск, пр.
Лаврентьева 11, Россия
V.Kh.Amirov@inp.nsk.su



Александр Иванович Горбов-
ский, начальник конструктор-
ского бюро; ИЯФ им. Г.И.
Будкера СО РАН, 630090 Но-
восибирск, пр. Лаврентьева 11,
Россия
A.I.Gorbovsky@inp.nsk.su



Владимир Иванович Давы-
денко, г.н.с., д.ф.-м.н.;
ИЯФ им. Г.И. Будкера СО
РАН, 630090 Новосибирск,
пр. Лаврентьева 11, Россия
V.I.Davydenko@inp.nsk.su



Петр Петрович Дейчули, в.н.с.,
к.ф.-м.н.; ИЯФ им. Г.И. Будке-
ра СО РАН, 630090 Новоси-
бирск, пр. Лаврентьева, 11,
Россия
P.P.Deichuli@inp.nsk.su



Александр Александрович
Иванов, заместитель ди-
ректора, д.ф.-м.н., лауреат
премии им. Л.А. Арцимо-
вича; ИЯФ им. Г.И. Будке-
ра СО РАН, 630090 Новоси-
бирск, пр. Лаврентьева
11, Россия
A.A.Ivanov@inp.nsk.su



Валериан Александрович Ка-
питонов, ведущий инженер;
ИЯФ им. Г.И. Будкера СО
РАН, 630090 Новосибирск, пр.
Лаврентьева 11, Россия
V.A.Kapitonov@inp.nsk.su



Валерий Викторович Ми-
шагин, ведущий констру-
ктор; ИЯФ им. Г.И. Будкера
СО РАН, 630090 Новоси-
бирск, пр. Лаврентьева 11,
Россия
V.V.Mishagin@inp.nsk.su



Алексей Валерьевич Сорокин,
н.с.; ИЯФ им. Г.И. Будкера СО
РАН, 630090 Новосибирск, пр.
Лаврентьева 11, Россия
A.I.V.Sorokin@inp.nsk.su



Игорь Владимирович Ши-
ховцев, с.н.с., к.ф.-м.н.;
ИЯФ им. Г.И. Будкера СО
РАН, 630090 Новосибирск,
пр. Лаврентьева 11, Россия
I.V.Shikhovtsev@inp.nsk.su

Статья поступила в редакцию 8 апреля 2020 г.

После доработки 15 июня 2020 г.

Принята к публикации 5 августа 2020 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2020, т. 43, вып. 3, с. 111—117.