

DOI: 10.17516/1999-494X-0429

УДК 621.78.012.8

**Compact Source of Electron Beam for Facility
of Electron-Beam Welding with the Location
of the Electron Gun and the Source
of High Voltage in a Single Monoblock.
Concept and Bench Tests of the Monoblok Prototype**

**Yuriy I. Semenov^{*a},
Dmitriy Yu. Bolkhovityanov^a, Boris A. Dovzhenko^a,
Igor A. Gusev^a, Tatyana A. Devyataikina^{a, b},
Mikhail Yu. Kosachev^a, Eduard A. Kuper^a,
Pavel V. Logatchov^a, Veronika V. Prokopets^a,
Aleksandr Yu. Protopopov^a, Vladimir V. Repkov^a,
Dmitriy V. Senkov^{a, b, c}, Aleksandr A. Starostenko^{a, b},
Aleksandr S. Tsygunov^a and Aleksandr A. Zharikov^a**

^aBudker Institute of Nuclear Physics of SB RAS

Novosibirsk, Russian Federation

^bNovosibirsk State University,

Novosibirsk, Russian Federation

^cNovosibirsk State Technical University

Novosibirsk, Russian Federation

Received 07.07.2022, received in revised form 07.09.2022, accepted 19.09.2022

Abstract. A prototype of an electron beam compact source for electron-beam welding is presented. The electron gun and a high-voltage source are united in a single monoblock. The placement of the electron gun, the high-voltage source, the beam control electronics and the power supply of the cathode heating of the electron beam source for electron beam welding in a single monoblock housing reduces weight and cost by reducing the amount of materials used, volume and occupied production areas. This significantly expands the possibilities of using the presented type of electron beam sources in various fields of human activity, including space technologies in the open space of space. The purpose of the work is to show the expediency of the concept of arranging the electron beam source in the

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

* Corresponding author E-mail address: Yu.I.Semenov@inp.nsk.su

single monoblock housing as the example of bench tests of the source prototype. The prototype of the monoblock was designed and manufactured. Its preliminary bench tests with laser cathode heating were carried out. Its possible applications are discussed. An electron source current up to 70 mA with an energy of 90 keV was obtained. The result obtained demonstrates the possibility of practical implementation of a new method of arranging an electron beam source.

Keywords: electron beam welding, laser heating of the cathode from the side its emission surface, electron beam profile measurement, compact source of electron beam, new method of arranging an electron beam source, control of the electron beam source current by modulation of the cathode heating laser power, electron beam welding in space environment.

Citation: Semenov, Yu. I. et al. Compact source of electron beam for facility of electron-beam welding with the location of the electron gun and the source of high voltage in a single monoblock. Concept and bench tests of the monoblok prototype. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2022, 15(6), 712–724. DOI: 10.17516/1999-494X-0429

Компактный источник электронного пучка для установок электронно-лучевой сварки с расположением электронной пушки и источника высоковольтного напряжения в едином моноблоке. Концепция и стендовые испытания прототипа моноблока

**Ю. И. Семенов^а, Д. Ю. Болховитянов^а, Б. А. Довженко^а,
И. А. Гусев^а, Т. А. Девятайкина^{а,б}, М. Ю. Косачев^а,
Э. А. Купер^а, П. В. Логачев^а, В. В. Прокопец^а,
А. Ю. Протопопов^а, В. В. Репков^а, Д. Ю. Сеньков^{а,б,в},
А. А. Старостенко^{а,б}, А. С. Цыганов^а, А. А. Жариков^а**

*^аИнститут ядерной физики СО РАН им. Г. И. Будкера,
Российская Федерация, Новосибирск*

*^бНовосибирский государственный университет,
Российская Федерация, Новосибирск*

*^вНовосибирский государственный технический университет
Российская Федерация, Новосибирск*

Аннотация. Представлен прототип компактного источника электронного пучка для установок электронно-лучевой сварки с расположением электронной пушки и источника высоковольтного напряжения в едином моноблоке. Размещение электронной пушки, источника высоковольтного напряжения, электроники управления пучком и питания накала катода источника электронного пучка для электронно-лучевой сварки в едином корпусе-моноблоке снижает вес и стоимость (за счёт уменьшения количества используемых материалов), объём и занимаемые производственные площади. Это существенно расширяет возможности применения представляемого типа источников электронного пучка в разнообразных областях деятельности человека, в том числе в космических технологиях в открытом пространстве космоса. Цель работы – показать целесообразность концепции компоновки источника

электронного пучка в едином корпусе-моноблоке на примере стендовых испытаний прототипа источника-моноблока. Спроектирован и изготовлен прототип источника-моноблока. Проведены его предварительные стендовые испытания с лазерным подогревом катода. Обсуждаются возможные применения. Получен электронный ток источника до 70 мА с энергией 90 кэВ. Данный результат демонстрирует возможность практической реализации нового способа компоновки источника электронного пучка.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, лазерный подогрев катода со стороны его эмиссионной поверхности, измерение профиля электронного пучка, компактный источник электронного пучка, новый способ компоновки источника электронного пучка, управление током источника электронного пучка модуляцией мощности лазера подогрева катода, электронно-лучевая сварка в космическом пространстве.

Цитирование: Семенов, Ю.И. Компактный источник электронного пучка для установок электронно-лучевой сварки с расположением электронной пушки и источника высоковольтного напряжения в едином моноблоке. Концепция и стендовые испытания прототипа моноблока / Ю.И. Семенов, Д.Ю. Болховитянов, Б.А. Довженко, И.А. Гусев и др. // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2022, 15(6). С. 712–724. DOI: 10.17516/1999-494X-0429

Введение

Электронно-лучевая сварка обеспечивает получение высокого качества и прочности соединения металлов независимо от их химического состава при толщине детали от 0,1 мм до 400 мм при сварке за один проход [1]. Данный способ сварки, применяемый в ракетостроении, также обуславливает уменьшение массогабаритных характеристик свариваемых деталей и в целом всего изделия по сравнению с другими [2].

Современный уровень развития элементной базы электроники и опыт разработки, изготовления [3–10] и применения [11–16] источников электронного пучка Институтом ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук позволяет предложить новый способ компоновки компактного источника электронного пучка для электронно-лучевых технологий, в том числе для электронно-лучевой сварки. Существенное улучшение массогабаритных параметров источника даёт экономические выгоды за счёт уменьшения объёма используемых материалов и площадей производственных помещений, исключения из конструкции источника дорогостоящих высоковольтных вводов и кабелей, а также открывает новые сферы применения, в том числе в условиях микрогравитации, в освоении Луны и в межпланетных полётах. Цель работы – представить новую концепцию конструкции компактного источника пучка электронов для электронно-лучевых технологий, в том числе для электронно-лучевой сварки, и на примере его прототипа обсудить возможности применения такого вида источника в условиях микрогравитации и на Луне.

Описание прототипа

В большинстве случаев источники электронных пучков для электронно-лучевых технологий состоят из отдельных компонентов, которые между собой коммутируются кабелями (в том числе дорогостоящими высоковольтными) и высоковольтными вводами. В нашем случае электронная пушка с электронно-оптической колонной, высоковольтный источник ускоряющего напряжения электронной пушки и бак прикатодной электроники, в котором располагается разделительный трансформатор для питания накала катода, микроконтроллер, высоковольтный

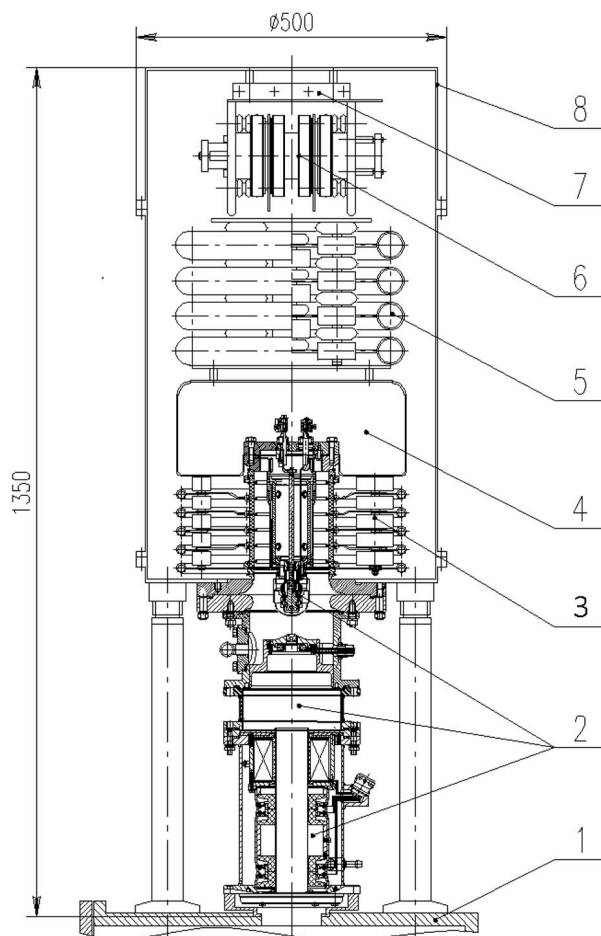


Рис. 1. Компонка моноблока: 1 – вакуумная камера, 2 – электронная пушка с электронно-оптической колонной, 3 – блок делителя напряжения, 4 – бак электроники нагрева катода и управления током электронного пучка, 5 – умножитель напряжения, 6 – трансформатор входной 30 кВ, 7 – радиатор водяного охлаждения, 8 – корпус моноблока

Fig. 1. Monoblock layout: 1 – vacuum chamber, 2 – electron gun with electron-optical column, 3 – voltage divider block, 4 – tank of electronics for heating the cathode and for electron beam current control, 5 – voltage multiplier, 6 – input transformer 30 kV, 7 – water cooling radiator, 8 – housing of the mono block

модулятор управления электронным пучком и источник питания модулятора на 4 кВ выполнены в виде единого блока (моноблока – рис. 1).

Представленная компоновка снижает вес источника, расход материалов, уменьшает объём источника и занимаемые им производственные площади, не требует применения дорогих высоковольтных вводов и высоковольтных кабелей, что удешевляет его себестоимость. Это, в свою очередь, расширяет области применения источников электронного пучка.

Электронная пушка и электронно-оптическая колонна (рис. 1, поз. 2) аналогичны представленной в [3] электронной пушке и электронно-оптической колонне, а в нашем проекте имеют более высокую энергию пучка электронов – до 120 кэВ.

Электроника питания нагрева катода и управления током катода (рис. 1, поз.4), находящаяся под потенциалом ускоряющего напряжения электронной пушки в 120 кэВ, является достаточно

сложным и дорогим компонентом электронного источника. При этом необходимо передавать мощность её электропитания порядка 250 Вт. Электронике надо тщательно защищать от пробоев и от рентгеновского излучения. В данный момент нами разрабатывается и изготавливается трансформаторная схема передачи мощности электропитания прикатодной электроники.

В предварительных стендовых испытаниях прототипа моноблока применён лазерный подогрев катода, описанный в [4]. Расчёт электронно-оптической системы прототипа моноблока с лазерным подогревом катода опубликован в [5]. Использован иттербиевый волоконный лазер с непрерывной мощностью до 500 Вт с внешней модуляцией мощности и с длиной волны излучения 1070 нм. Лазер греет катод со стороны его эмиссионной поверхности. Схема лазерного подогрева представлена на рис. 2. В данном случае электроника управления током источника под потенциалом катода отсутствует. Регулировка и стабилизация тока катода осуществляется посредством управления мощностью лазерного луча. Для исследований было сделано устройство управления мощностью лазера. На устройство поступает внешний сигнал управления током источника электронного пучка, при этом сигнал обратной связи подается от датчика тока высоковольтного источника. Усилитель ошибки управляет мощностью луча лазера подогрева катода [6].

Электронная пушка работает по диодной схеме. Как показано на рис. 2, луч лазера через окно из кварцевого стекла вводится в анодный блок электронной пушки и от медного зеркала, которое выполнено в виде плоской грани поворотного анода 3, направляется на катод 4. Угол отражения от зеркала – 61 градус. Катод диаметром 4 мм имеет вогнутую сферическую форму и выполнен из танталовой фольги толщиной 0.2 мм. Катод подогревается лазерным лучом до температуры выше 2000°C.

Высоковольтная часть источника ускоряющего напряжения электронной пушки реализована в виде комбинации относительно низковольтного трансформатора (рис. 1, поз.6) и умножителя напряжения на основе двухполупериодного шестикратного умножителя напряжения вторичных обмоток силового трансформатора (рис. 1, поз.5). Рабочая частота (25 кГц) позво-

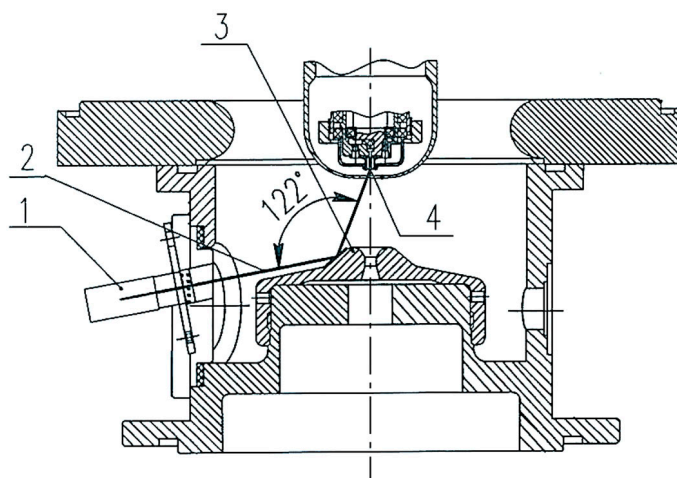


Рис. 2. Схема лазерного подогрева катода: 1 – лазер, 2 – луч лазера, 3 – анод-зеркало, 4 – катод

Fig. 2. Scheme of laser heating of the cathode: 1 – laser, 2 – laser beam, 3 – anode-mirror, 4 – cathode

ляют уменьшить габариты конструкции, повысить качество регулирования и стабильность выходного напряжения. Небольшая выходная ёмкость (4.4 нФ) и быстрая реакция источника на управляющие сигналы дают возможность избежать повреждения свариваемых изделий в процессе сварки при нештатном повышении тока луча (например, пробой промежутка управляющий электрод – катод). Объём корпуса моноблока с высоковольтными элементами заполняется диэлектрической силиконовой трансформаторной жидкостью «СОФЭКСИЛ ТСЖ» и под давлением элекгазом для повышения электростатической прочности конструкции.

Измерение основных характеристик прототипа. Измерение основных характеристик прототипа проводилось при энергии электронов пучка 90 кэВ. При построении зависимости тока прототипа источника электронного пучка от мощности лазера подогрева катода измерение тока катода производилось по истечении не менее нескольких секунд после начала нагрева лазером катода, когда в процессе нагрева катода наступает стационарный режим. При этом в начале катод нагревается в форсированном режиме для укорочения времени выхода температуры катода на стационарный режим [6]. Минимальный шаг регулирования мощности лазера – 1 Вт.

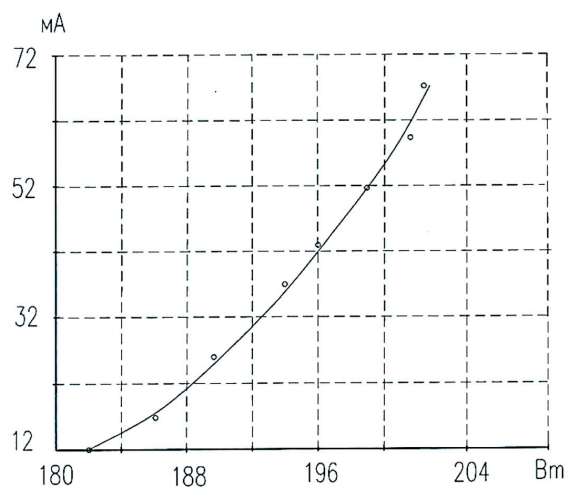


Рис. 3. Зависимость тока катода от мощности лазера подогрева

Fig. 3. Dependence of the cathode current on the power of the heating laser

Путём линейной развёртки с постоянной скоростью электронного пучка поперёк щелей измерительной решётки измерялся диаметр пучка в кроссовере на полувывоте профиля пучка. Измерительная решётка изготовлена из танталовой пластины толщиной 0,8 мм и состоит из пяти параллельных сквозных щелей шириной 0.6 мм каждая с равномерным шагом между собой. Такой датчик-решётка помещается на цилиндр Фарадея (рис. 4) и измеряет ток заряда, прошедшего через щели датчика. Для улавливания отражённых из цилиндра Фарадея электронов под измерительной решёткой располагается металлическая решётка с такими же размерами, как у измерительной решётки, но с увеличенной шириной щелей и электрически соединённая с цилиндром Фарадея.

Диаметр пучка на полувывсоте его профиля определяется как

$$d = (s/T)t, \quad (1)$$

где d , мм – диаметр пучка на полувывсоте его профиля; s , мм – расстояние между осями симметрии крайних щелей решётки; T , мс – время прохождения пучком расстояния s из осциллограммы; t , мс – время на полувывсоте осциллограммы профиля пучка. Время t для уменьшения влияния помех на осциллограмме усреднялось по пяти сигналам из каждой щели решётки.



Рис. 4. Измерительная решётка на цилиндре Фарадея

Fig. 4. Measuring grating on a Faraday cup



Рис. 5. Осциллограмма измерения профиля электронного пучка

Fig. 5. Oscillogram of measurement of the electron beam profile

Результаты измерения профиля пучка показали, что поперечное сечение пучка на полу-высоте профиля имеет эллипсную форму с большой осью 0,75 мм и малой осью 0.43 мм при токе пучка 28 мА. Это объясняется тем, что угол отражения луча лазера от зеркала не 45°, а 61°. Поэтому пятно лазерного луча на катоде эллипсообразное и, соответственно, область эмиссии с катода имеет эллипсную форму.

Обсуждение результатов исследования. Существенное улучшение массогабаритных параметров источника электронного пучка даёт экономические выгоды за счёт уменьшения объёма используемых материалов и производственных помещений, исключения из конструкции источника дорогостоящих высоковольтных вводов и кабелей, что удешевляет и расширяет возможности применения источников электронного пучка в электронно-лучевых технологиях.

Источники электронного пучка используются в процессах сварки, плавки, пайки, резки, нанесения покрытий, напыления, аддитивных технологий, синтеза тугоплавких соединений и композитов и т.д. [11–16].

В табл. 1 представлено сравнение массогабаритных параметров источника электронного пучка, представленного в [3], и моноблока. Таблица показывает, что массогабаритные параметры моноблока выглядят намного предпочтительнее, поскольку:

- у моноблока энергия электронов источника в два раза выше, чем у источника с обычной компоновкой;
- с повышением энергии электронов пучка объём, масса и занимаемая площадь источника возрастают пропорционально кубу отношения энергий электронов пучка.

Изучение и применение технологии космических электронно-лучевых пистолетов в виде ручного переносного инструмента стало важной тенденцией развития для решения космических сварочных операций, причём в экспериментах по электронно-лучевой сварке в космосе используются источники электронного пучка в виде переносного пистолета с ускоряющим напряжением до 40 кВ для сварки материалов толщиной до 6 мм [17,18].

Таблица 1. Сравнительная таблица массогабаритных параметров источника электронного пучка, представленного в [3], и моноблока

Table 1. Comparative table of weight and size parameters of the electron beam source presented in [3] and the monoblock

№ п/п	Название параметра	Обычная компоновка [3]	Моноблок	Отношение параметров, $P_{\text{моно}} / P_{\text{обычн}}$
1	Энергия электронов, кэВ	60	120 (по проекту)	2
2	Мощность пучка, кВт	30	12 (по проекту)	0.4
3	Масса, кг	710	345	0.486
4	Объём, м ³	0.8	0.3	0.375
5	Занимаемая площадь, м ²	0.8	0.2	0.25
6	Удельный показатель масса/мощность, кг/кВт	23.7	28.75	1.2
7	Удельный показатель объём/мощность, м ³ /кВт	0.027	0.025	0.93
8	Удельный показатель занимаемая площадь/мощность, м ² /кВт	0.027	0.017	0.63

В 1965 г. в США сообщалось о первой разработке космических ручных переносных устройств с ускоряющим напряжением 80 кВ. Электронная пушка, высоковольтный источник питания и система управления сваркой были выполнены в виде единого модуля, который к аккумуляторной батарее подсоединялся низковольтным кабелем. Его недостатками были большая масса, плохая подвижность и сложность обеспечения хорошего качества сварки. Что еще более важно, при ускоряющем напряжении 80 кВ было крайне сложно в космосе обеспечить адекватную защиту персонала от жесткого рентгеновского излучения [17]. Поэтому результаты разработки дальнейшего распространения не получили.

Развитие применения системы космических роботизированных манипуляторов открывает новые возможности использования более мощных аппаратов с высоким ускоряющим напряжением электронной пушки, что позволит выполнять сварку деталей большой толщины.

Компактные источники электронного пучка могут применяться в космическом пространстве в условиях микрогравитации в следующих случаях:

1) в экспериментах по использованию солнечного ветра в качестве движущей силы в космическом пространстве для межпланетных путешествий, а также в плазменно-пучковых экспериментах в верхних слоях атмосферы и в космосе [19].

2) источники электронного пучка с более высоким ускоряющим напряжением позволяют увеличить толщину свариваемых материалов до нескольких сот миллиметров ввиду того, что глубина проплавления для электронной пушки, у которой зависимость между диаметром фокусного пятна, током пучка и ускоряющим напряжением в определенных интервалах их значений остаётся однозначной, определяется выражением [20]

$$h_n \approx K_n \frac{I_B^{n_1} U_B^{n_2}}{v_s^{n_3}} f(M).$$

Здесь K_n – постоянный коэффициент для n -го интервала параметров пучка, I_B – ток пучка, U_B – ускоряющее напряжение, v_s – скорость сварки, $f(M)$ – учитывает физические свойства свариваемого материала. Типичные значения показателей, определяемые экспериментально: $n_1 \approx 1$, $n_2 \approx 1 \div 1.5$ и $n_3 \approx 0.2 \div 0.6$ в зависимости от материала и условий сварки. Увеличение толщины провара позволяет в проектах межорбитальной транспортной системы с лунным экспедиционным комплексом, собираемым на низкой околоземной орбите с использованием ракет-носителей тяжелого класса [21], и пилотируемой экспедиции на Марс [22] думать о применении сварных соединений взамен некоторых стыковочных узлов для сборки отдельных блоков в единый лунный (или межпланетный) экспедиционный комплекс для уменьшения массогабаритных характеристик свариваемых деталей и в целом всего комплекса. Без теплообмена и тепловыделения в вакуумной среде температура космического аппарата на стороне, обращенной к солнечному свету, может достигать 100–200 °С, а температура противоположной поверхности может быть ниже –200 °С. Градиент температур между светлыми и теневыми участками довольно велик. Поэтому для сварочного оборудования и процессов требуются специальные конструкции [23].

Использование специальной радиационной защиты с поверхностной плотностью 70÷230 г/см² (которой соответствует при выборе стали толщина защиты 90÷290 мм) достаточно для обеспечения радиационной безопасности экипажа при марсианском перелёте [22,24].

С помощью электронно-лучевой сварки можно обеспечить сборку радиационной защиты обитаемой части марсианского экспедиционного комплекса на околоземной орбите.

С увеличением ускоряющего напряжения электронной пушки выше 40 кВ при сварке быстро увеличивается уровень рентгеновского тормозного излучения. Поэтому для защиты оператора от радиации возникает необходимость ведения сварки с помощью роботизированного манипулятора. С точки зрения веса и габаритов радиационной защиты оператора наиболее оптимальной можно считать величину ускоряющего напряжения электронной пушки электронно-лучевой сварки около 60 кВ.

Одним из положительных факторов является то, что при электронно-лучевой сварке в открытом космическом пространстве уровень вакуума на низкой земной орбите и на поверхности Луны достаточен для работы источника электронного пучка без герметизации и вакуумной откачной системы.

Для использования в космосе источники электронного пучка должны быть обеспечены системой термостабилизации и охлаждения [23], облегчены по весу с учётом динамических нагрузок при взлёте и посадке и обладать повышенной надёжностью. Для этого необходимо использовать достигнутые компетенции в космических технологиях.

Резюме и выводы. Измерены основные параметры прототипа компактного источника пучка электронов с лазерным подогревом катода электронной пушки:

- зависимость тока катода от мощности лазера подогрева катода;
- размер профиля пучка на его полувысоте;
- форма области эмиссии электронов с катода.

Для сравнения приведены массогабаритные параметры моноблока и источника электронного пучка обычной компоновки.

Полученные результаты позволяют обсуждать расширение возможности применения представляемого типа источников электронного пучка в разнообразных областях деятельности человека, в том числе в космических технологиях в открытом пространстве космоса.

Список литературы / References

[1] Михальченков А.В., Цыплаков Р.Ш., Успенский Н.В. Электронно-лучевая сварка. Преимущества и недостатки, *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*, 2017, 1, 412–414 [Mikhailchenkov A. V., Tsyplakov R. Sh., Uspensky N. V. Electron beam welding. Advantages and disadvantages, *Actual problems of aviation and astronautics*, 2017, 1, 412–414 (in Russian)].

[2] Львов В.А. Электронно-лучевая сварка крупногабаритных изделий ракетостроения на современном уровне. *Материалы XXIII Международной научно-практической конференции «Решетневские чтения»*, Красноярск, 2019, 1, 260–261. [Lvov V. A. Electron-beam welding of large rocket products at the modern level. *Materials of the XXIII International Scientific and Practical Conference “Reshetnev Readings”*. Krasnoyarsk, 2019, 1, 260–261 (in Russian)].

[3] Semenov Yu. I., Akimov V. E., Batazova M. A., Dovzhenko B. A., Ershov V. V., Frolov A. R., Gusev Ye. A., Gusev I. A., Konstantinov V. M., Kuper E. A., Kuznetsov G. I., Kot N. Kh., Kozak V. R., Logachev P. V., Mamkin V. R., Selivanov A. N., Medvedko A. S., Nikolaev I. V., Protopopov A. Yu., Pureskin D. N., Repkov V. V., Senkov D. V., Tsyganov A. S. 60 keV 30 kW electron beam facility for electron beam technology, *Proc. EPAC 2008*, Genoa, Italy, 2008, 1887–1889.

[4] Алякринский О.Н., Губин К.В., Косачев М.Ю., Купер Э.А., Логачев П.В., Медведев А.М., Овчар В.К., Репков В.В., Семенов Ю.И., Сизов М.М., Старостенко А.А., Федотов М.Г., Цыганов А.С. Прототип источника пучка электронов с лазерным подогревом катода. *Научное приборостроение*, 2018, 28(4), 8–14. [Alyakrinsky O.N., Gubin K.V., Kosachev M. Yu., Kuper E. A., Logachev P.V., Medvedev A. M., Ovchar V. K., Repkov V. V., Semenov Yu. I., Sizov M. M., Starostenko A. A., Fedotov M. G., A. S. Tsyganov. Prototype of an electron beam source with laser heated cathode, *Scientific Instrumentation*, 2018, 28(5), 8–14 (in Russian)]

[5] Алякринский О.Н., Девятайкина Т.А., Павлюченко В.А., Семенов Ю.И., Старостенко А.А., Цыганов А.С. Разработка источника электронов на энергию 120 кэВ для электронно-лучевой сварки. *Электронно-лучевая сварка и смежные технологии: Материалы IV международной конференции*. М., 2021, 341–348. [Alyackrinskiy O. N., Devyataikina T. A., Pavlyuchenko V. A., Semenov Yu. I., Starostenko A. A., Tsygunov A. S. Development of an electron source for an energy of 120 keV for electron beam welding. *Electron beam welding and related technologies, Materials of the IV international conference*. Moscow, 2021, 341–348 (in Russian)].

[6] Косачев М.Ю., Купер Э.А., Репков В.В., Семенов Ю.И., Старостенко А.А., Цыганов А.С. Управление током электронно-лучевой сварки посредством регулирования мощности лазера подогрева катода. *Электронно-лучевые технологии КЭЛТ – 2019. Конференция с международным участием «Электронно-лучевые технологии»*, 2019, 144 [Kosachev M. Yu., Kuper E. A., Repkov V. V., Semenov Yu. I., Starostenko A. A., Tsygunov A. S. Controlling the current of electron-beam welding by adjusting the power of the cathode heating laser. *Electron beam technologies KELT – 2019. Conference with international participation “Electron beam technologies”*, 2019, 144 (in Russian)].

[7] Gusev I. A., Medvedko A. S., Protopopov A. Yu., Pureskin D. N., Senkov D. V. High-voltage source with output voltage up to 60 kV with output current up to 500 mA, *Proc. RuPAC 2008*. Zvenigorod, 2008, 168–170.

[8] Сеньков Д.В., Медведко А.С. Управляющий контроллер высоковольтного источника энергоблока установки электронно-лучевой сварки. *Автометрия*, 2015, 51(6), 117–124. [Senkov D. V., Medvedko A. S. The control controller of the high-voltage source of the power unit of the electron-beam welding unit. *Autometry*, 2015, 51 (6), 117–124 (in Russian)].

[9] Kuper E. A., Logachev P. V., Repkov V. V. et al. Automated system for setting the seam coordinates in electron-beam welding facilities. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2015, 51(1), 45–50.

[10] Алякринский О.Н., Батазова М.А., Болховитянов Д.Ю., Косачев М.Ю., Логачев П.В., Медведев А.М., Семенов Ю.И., Сизов М.М., Старостенко А.А., Федотов М.Г., Цыганов А.С. Прототип источника электронов с магнитным поворотом пучка для электронно-лучевых технологий. *Научное приборостроение*, 2019, 29(1), 26–32. [Alyackrinskiy O.N., Batazova M. A., Bolkhovityanov D. Yu., Kosachev M. Yu., Logatchov P. V., Medvedev A. M., Semenov Yu. I., Sizov M. M., Starostenko A. A., Tsygunov A. S. Prototype of an electron source with magnetic beam rotation for electron-beam technologies, *Scientific Instrumentation*, 2019, 29(1), 26–32 (in Russian)].

[11] Medvedev A. M., Semenov A. M., Semenov Yu. I., Sizov M. M., Starostenko A. A., Tsyganov A. S. EBW application for the manufacture of HEBT dipole vacuum chambers, FAIR,

Electrotechnica & electronica E+E, The Union of Electronics, Electrical Engineering and Telecommunications, CEEC, Bulgaria, 2016, 51(5–6), 148–152.

[12] Семенов Ю.И., Алякринский О.Н., Болховитянов Д.Ю., Логачев П.В., Медведев А.М., Спесивцев А.Б., Старостенко А.А., Яминов К.Р. Макет 3D-принтера для изготовления металлических структур из тугоплавких металлов с помощью электронно-лучевых аддитивных технологий, *Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине: Доклады VI Всероссийской конференции, Новосибирск, 24–27 марта 2015 г.*, Новосибирск, Параллель, 2015, 2, 76–79. [Semenov Yu.I., Alyackrinskiy O. N., Bolkhovityanov D. Yu., Logachev P. V., Medvedev A. M., Spesivtsev A. B., Starostenko A. A., Yaminov K. R. Model of a 3D printer for the manufacture of metal structures from refractory metals using electron beam additive technologies, *Interaction of highly concentrated energy flows with materials in advanced technologies and medicine: Reports of the VI All-Russian Conference, Novosibirsk, March 24–27, 2015*, Novosibirsk, Parallel, 2015, 2, 76–79 (in Russian)].

[13] Logachev P. V., Semenov Y. I., Sharapov V. N., Boguslavskii A. E., Podgornykh N. M. Some structural and mineralogical peculiarities of quenching liquids obtained by melting of mantle ultrabasite xenoliths and mafic volcanics by an electron beam. *Doklady Earth Sciences*, 2018, 481(2), 1095–1098.

[14] Ancharov A. I., Vosmerikov S. V., Grigoreva T. F., Kosachev M. Y., Semenov Y. I. Studying the Possibility of Obtaining High-Temperature Composites via Mechanochemical and Electron-Beam Treatment. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2018, 82(7), 877–879.

[15] Ancharov A. I., Grigoryeva T. F., Logachev P. V., Semenov Yu. I., Starostenko A. A., Tolochko B. P. Possibility of application of hafnium and tantalum carbides as materials for additive manufacturing, *The International Seminar on Interdisciplinary Problems in Additive Technologies “Problems of materials science in additive technologies”: abstracts, Tomsk, 6–9 December 2016*, Tomsk, 2016, 2.

[16] Анчаров А. И., Григорьева Т. Ф., Грачев Г. Н., Косачев М. Ю. Исследование механокомполитов нитрида бора с вольфрамом и с молибденом в качестве материалов электронно – лучевых и лазерных аддитивных технологий, *Известия РАН. Серия физическая*, 2019, 83(6), 842–844. [Ancharov A. I., Grigoryeva T. F., Grachev G. N., Kosachev M. Yu. Study of mechanocomposites of boron nitride with tungsten and molybdenum as materials in electron-beam and laser additive technologies, *Izvestiya RAN. Physical series*, 2019, 83(6), 842–844 (in Russian)]

[17] Liu X., Dong Q., Chen H., Wang P. Review of Electron Beam Welding Technology in Space Environment. *Optik – International Journal for Light and Electron Optics*, 2021, 225, 165720.

[18] Paton B. E., Lobanov L. M., Naidich Yu. V., Asnisa Yu. A. et al. New electron beam gun for welding in space, *Science and Technology of Welding and Joining*, 2019, 24(4), 320–326.

[19] Евланов Е. Н., Завьялов М. А., Тюрюканов П. М. Электронные пушки для космических аппаратов, *Космические исследования*, 2013, 51(5), 428–435 [Evlanov E. N., Zavyalov M. A., Tyuryukanov P. M. Electron guns for space vehicles, *Space Research*, 2013, 51(5), 428–435 (in Russian)].

[20] Шиллер З., Гайзиг У., Панценр З. *Электронно-лучевая технология*, М., Энергия, 1980, 528 с. [Schiller Z., Geisig W., Panzenr Z. *Electron-beam technology*, Moscow, Energia, 1980, 528 p. (in Russian)].

[21] Бычков А. Д., Филин В. М. Межорбитальная транспортная система с Лунным экспедиционным комплексом, собираемым на низкой околоземной орбите с использованием ракет-

носителей тяжелого класса, *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, 9, 1–19 [Bychkov A. D., Filin V. M. Interorbital transport system with the Lunar Expeditionary Complex assembled in low Earth orbit using heavy launch vehicles, *Engineering Journal: Science and Innovations*, 2017, 9, 1–19 (in Russian)].

[22] Константинов М. С. Анализ требуемого совершенства ядерной электроракетной двигательной установки для марсианской экспедиции длительностью два года. *Космические исследования*, 2018, 56(5), 412–427 [Konstantinov M. S. Analysis of the required perfection of a nuclear electric propulsion system for a two-year Martian expedition, *Space Research*, 2018, 56(5), 412–427 (in Russian)].

[23] Литовченко А. А., Делков А. В. Системы охлаждения космических аппаратов. *Актуальные проблемы авиации и космонавтики: материалы VI Международной научно-практической конференции, посвященной Дню космонавтики*. В 3-х томах. Под общ. ред. Ю. Ю. Логинова, 2020, 237–239 [Litovchenko A. A., Delkov A. V. Spacecraft cooling systems, *Actual problems of aviation and astronautics: materials of the VI International scientific-practical conference dedicated to the Day of Cosmonautics*. In 3 volumes. Ed. by Yu. Yu. Loginov, 2020, 237–239 (in Russian)].

[24] Севостьянов Н. Н., Горшков Л. А., Семенов В. Ф., Григорьев А. И., Зеленый Л. М. Иванов Н. М., Потапов А. Н., Сметанников В. П. *Пилотируемая экспедиция на Марс*. М., Российская академия космонавтики им. К. Э. Циолковского, 2006, 320 с. [Sevostyanov N. N., Gorshkov L. A., Semenov V. F., Grigoriev A. I., Zeleny L. M. Ivanov N. M., Potapov A. N., Smetannikov V. P. *Manned Expedition to Mars*. Moscow, Russian Academy of Cosmonautics named after K. E. Tsiolkovsky, 2006, 320 p. (in Russian)].