

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ВВОД
В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
DESIGN, MANUFACTURE AND COMMISSIONING
COMMISSIONING OF EQUIPMENT
NUCLEAR INDUSTRY FACILITIES

УДК 621.791

<https://doi.org/10.26583/gns-2023-04-04>

EDN LPPYEJ



Обоснование получения мелкозернистой структуры сварных соединений при высокоинтенсивном импульсном воздействии на сварочный контур

С.М. Бурдаков  , В.И. Ратушный , Ю.В. Заяров 

Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Россия

 SMBurdakov@mephi.ru

Аннотация. Эффективным методом повышения надежности эксплуатации объектов тепловой и атомной энергетики является повышение качества изготовления, монтажа и ремонта их теплового и генерирующего энергетического оборудования. Одним из путей улучшения качества, технологических и служебных свойств сварных соединений в процессе их выполнения является влияние на структуру кристаллизующегося металла тепловым, электрическим высокоинтенсивным импульсным воздействием для ее измельчения. В настоящей работе предлагаются результаты экспериментального исследования по обоснованию мелкозернистой структуры сварных соединений, полученных с помощью ручной дуговой сварки покрытыми электродами при высокоинтенсивном импульсном воздействии (QPS) частотой $f_{и.г.} = 40 \cdot 10^3$ Гц, напряжением $U_{и.г.} = 80,0$ В, на сварочный контур. Для оценки влияния высокоинтенсивного импульсного воздействия на сварочный контур, включая плазму дугового разряда и структуру получаемого шва можно воспользоваться энергетическими характеристиками процесса. В качестве энергетических характеристик сварочного процесса были выбраны сварочный ток $I_{св.пр.}$, напряжение на дуге $U_{д.пр.}$, мощность $P_{пр.}$. Были получены осциллограммы указанных характеристик, а также определены значения максимального импульсного значения мощности, выделяемой в сварочном контуре при воздействии на него QPS и без его применения. Выполнена энергетическая оценка ввода дополнительного высокоинтенсивного импульсного воздействия на сварочный контур как ультразвуковой энергии для кавитации поверхностного слоя сварочной ванны при QPS. Дуговой разряд постоянного тока при наложении на него высокоинтенсивного импульсного воздействия частотой $f_{и.г.} = 40 \cdot 10^3$ Гц (QPS) является источником кавитации жидкой фазы металла сварочной ванны в ограниченном поверхностном слое заданной толщины. Можно предположить, что кристаллизация ванны идет слоями при воздействии на сварочный контур высокоинтенсивного импульсного воздействия частотой $f_{и.г.} = 40 \cdot 10^3$ Гц (QPS). При этом происходит надлом растущих кристаллов при колебаниях жидкой фазы за счет сил трения, возникающих между движущейся жидкой фазой и растущим кристаллом. В месте надлома кристалла образуются зоны динамически переохлажденного металла, что ведет к появлению новых центров кристаллизации, возникает мелкозернистая структура сварного шва.

Ключевые слова: тепловое и генерирующее энергетическое оборудование, объекты тепловой и атомной энергетики, энергетическое оборудование, технологические и служебные свойства, сварные соединения, ручная дуговая сварка, сварочный процесс, качество сварных соединений, высокоинтенсивное импульсное воздействие (QPS), мелкозернистая структура, сварочный контур, ультразвук, кавитация, покрытый электрод, жидкая фаза.

Для цитирования: Бурдаков С.М., Ратушный В.И., Заяров Ю.В. Обоснование получения мелкозернистой структуры сварных соединений при высокоинтенсивном импульсном воздействии на сварочный контур. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;13(4):27–31. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-04-04>

For citation: Burdakov S.M., Ratushny V.I., Zayarov Yy.V. Justification of obtaining a fine-grained structure of welded joints under high-intensity pulsed action on the welding circuit. *Global Nuclear Safety*. 2023;(1):27–31 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2023-04-04>

Justification of obtaining fine-grained structure of welded joints at high-intensity impulse effect on welding circuit

Sergey M. Burdakov  , Viktor I. Ratushny , Yrii V. Zayarov 

Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Lenin St., 73/94, Volgodonsk, Rostov region, Russia

 SMBurdakov@mephi.ru

Abstract. An effective method of improving the reliability of operation of thermal and nuclear power facilities is to improve the quality of manufacture, installation and repair of their thermal and generating power equipment. One of the ways to improve the quality, technological and service properties of welded joints in the process of their implementation is to influence the structure of the crystallizing metal by thermal, electric high-intensity impulse effect for its grinding. This work proposes the results of an experimental study to substantiate the production of a fine-grained structure of welded joints obtained using manual arc welding with coated electrodes at a high-intensity impulse effect (QPS) with a $f_{i.g.} = 40 \cdot 10^3$ Gts frequency, voltage $U_{i.g.} = 80.0$ V, on the welding circuit. The energy characteristics of the process can be used to assess the effect of high-intensity impulse action on the welding circuit, including the arc plasma and the structure of the resulting weld. As the energy characteristics of the welding process, the welding current I_{wd} , the voltage on the arc discharge U_d , the power R_p . Oscillograms of the specified characteristics were obtained, as well as the values of the maximum (peak) and average power released in the welding circuit when QPS is exposed to it and without its use were determined. Energy evaluation of input of additional high-intensity pulse effect on welding circuit as ultrasonic energy for cavitations of surface layer of welding bath at QPS was performed. Direct current arc discharge at application of high-intensity pulse effect with frequency of $f_{i.g.} = 40 \cdot 10^3$ Gts (QPS) is source of cavitations of liquid phase of metal of welding bath in limited surface layer of preset thickness. It can be assumed that the crystallization of the bath takes place in layers when the welding circuit is subjected to high-intensity pulse exposure with a frequency of $f_{i.g.} = 40 \cdot 10^3$ Gts (QPS). In this case, the growing crystals break when the liquid phase oscillates due to friction forces arising between the moving liquid phase and the growing crystal. At the site of crystal fracture, zones of dynamically super cooled metal are formed, which leads to the appearance of new crystallization centers, and a fine-grained structure of the weld appears.

Keywords: thermal and generating power equipment, thermal and nuclear power facilities, power equipment, process and service properties, welded joints, manual arc welding, welding process, quality of welded joints, high-intensity impulse effect (QPS), fine-grained structure, welding circuit, ultrasound, cavitations, coated electrode, liquid phase.

Эффективным методом повышения надежности эксплуатации объектов тепловой и атомной энергетики является повышение качества изготовления, монтажа и ремонта их теплового и генерирующего энергетического оборудования.

Следует отметить, что главенствующую роль в улучшении качества данного энергетического оборудования играет уровень технологических и служебных свойств сварных соединений, особенно выполняемых ручной дуговой сваркой.

При этом имеют место следующие специфические особенности такие как, трудный доступ к местам ведения сварочного процесса, конфигурация требуемых к выполнению соединений, влияние окружающей среды. Возникновение этих факторов может способствовать, прерыванию процесса сварки, снижению технологических и служебных свойств сварных соединений, в том числе значений ударной вязкости, устойчивости дугового разряда и возникновению дефектов. Для восстановления требуемого качества сварных соединений обычно применяется выборка дефектного участка и повторное выполнение сварочного процесса на данном участке, что, как правило, ведет к повышению стоимости такой ремонтной работы и возможному снижению эксплуатационной надежности изготавливаемого или обслуживаемого оборудования [1, 2].

Одним из путей улучшения качества, технологических и служебных свойств сварных соединений в процессе их выполнения является влияние на структуру кристаллизующегося металла тепловым, электрическим высокоинтенсивным импульсным воздействием для ее измельчения.

Известно положительное действие на измельчение структуры шва за счет управляемого, электрического, высокоинтенсивного импульсного воздействия повышенной частоты ($U_{и.г.} = 80,0$ В, $f_{и.г.} = 40 \cdot 10^3$ Гц) от специализированного генератора-источника питания (QPS) на сварочный контур при параллельном его

подключении с основному источнику питания (ВДУ-504). [3-5].

Формирование мелкозернистой структуры металла шва околосварной зоны является одним из условий получения сварных соединений с высокими технологическими и служебными характеристиками [5, 6].

Для выявления мелкозернистой структуры в металле сварного шва в работе [4] проводились металлографические исследования на образцах, вырезанных из средней части объема единичных валиков, выполненных по базовой технологии ручной дуговой сварки покрытыми электродами (ТМЛ-3У) и предлагаемой технологии при высокоинтенсивном импульсном воздействии на сварочный контур ($U_{и.г.} = 80,0$ В, $f_{и.г.} = 40 \cdot 10^3$ Гц, $I_{св} = 100$ А) на дуговой разряд и сварочный контур. В данных работах [4, 7] была исследована микроструктура зон столбчатых и равноосных дендритов, а также микроструктура зоны термического влияния и линии сплавления. Было получено, что размер равноосных зерен зоны термического влияния у линии сплавления при базовом варианте (без QPS) больше (эталонный номер зерна $G_3 = 1$, средний диаметр зерна $d_m = 0,250$ мм, средняя площадь зерна $a = 0,06250$ мм²), чем по предлагаемой технологии (с QPS) (эталонный номер зерна $G_3 = 2$, средний диаметр зерна $d_m = 0,1770$ мм, средняя площадь зерна $a = 0,03120$ мм²) [4].

Так же в рамках работы [8] было показано положительное влияние мелкозернистой структуры сварного соединения на ударную вязкость металла сварного соединения.

Обоснование получения мелкозернистой структуры металла сварных соединений при высокоинтенсивном импульсном воздействии на сварочный контур и увеличения ударной вязкости в данном случае может быть объяснен следующим образом [5, 6].

Введение высокоинтенсивного импульсного воздействия в сварочный контур в жидкий металл ванны шва способствует гомогенному возникновению до-

полнительных центров кристаллизации. Дуговой разряд инициирует появление пульсирующего давления в поверхностном слое жидкой фазы объема ванны [10], что согласно принципу Ле-Шателье, приводит к увеличению равновесной температуры кристаллизации с образованием новых участков-центров, динамически переохлажденного металла. Возникновение новых центров кристаллизации за счет динамического переохлаждения может иметь место только при ультразвуковых колебаниях слоя металла в условиях кавитации. В данном случае источником ультразвуковых колебаний металла является дуговой разряд постоянного тока при наложении на него высокоинтенсивного импульсного воздействия ($U_{и.г.} = 80,0 \text{ В}$, $f_{и.г.} = 40 \cdot 10^3 \text{ Гц}$, $I_{св.} = 100 \text{ А}$). При этом так же происходит надлом растущих кристаллов при колебаниях жидкой фазы за счет сил трения, возникающих между движущейся жидкой фазой и растущим кристаллом. Результаты расчетов, отмеченные в работе [5] показали, что при частотах колебаний свыше $9 \cdot 10^3 \text{ Гц}$ силы трения достигают значений, которые превышают прочность растущего кристалла в жидкой фазе исследуемого слоя сварочной ванны. Следует так же отметить что на растущий кристалл, кроме сил трения, при движении жидкой фазы металла, действуют электромагнитные силы Лоренца. Проведенные расчеты напряжений изгиба в растущем кристалле с учетом силы Лоренца, что для существующего длины (l) и радиуса (r) сечения кристалла $l/r \leq 10$ эти напряжения на 2–3 порядка меньше внутрикристаллической прочности при температуре плавления. Эти факторы могут объяснить возможное измельчение кристаллов металла сварного шва при указанном высокоинтенсивном импульсном воздействии на сварочный контур и слой металла сварочной ванны в жидкой фазе [5].

Для оценки влияния высокоинтенсивного импульсного воздействия на сварочный контур, включая плазму дугового разряда и структуру получаемого шва можно воспользоваться энергетическими характеристиками процесса [9–11].

В качестве энергетических характеристик сварочного процесса были выбраны сварочный ток $I_{св.пр.}$, напряжение на дуговом разряде $U_{д.пр.}$, мощность $P_{пр.}$.

В рамках данной работы было выполнено осциллографирование в процессе укладки одиночного валика при процессе ручной дуговой сварки покрытыми электродами ТМЛ-3У $\varnothing 3,0 \text{ мм}$ с режимом $100,0 \text{ А}$ на основании методики проведения экспериментов данных в более ранних работах¹ [12]. Осуществлялся съем осциллограмм сварочного тока и напряжения в базовом варианте сварочного процесса, без подачи на сварочный контур высокоинтенсивного импульсного воздействия ($I_{св.пр.} = 100,0 \text{ А}$) (рис. 1а), и в предлагаемом варианте, с использованием отмеченного выше

воздействия (QPC) (Режим: $U_{и.г.} = 80,0 \text{ В}$, $f_{и.г.} = 40 \cdot 10^3 \text{ Гц}$, $I_{св.} = 100,0 \text{ А}$) (рис. 1б). Исходя из полученных данных, в составленной специализированной, исследовательской, программной среде для Mathcad©, были построены графики зависимости от времени $t = t_{пр.св.}$ мощности дугового разряда ($P_{пр.}$) базового (без использования (QPC)) и предлагаемого (с применением (QPC)) исследуемых процессов (рис. 2 а,б).

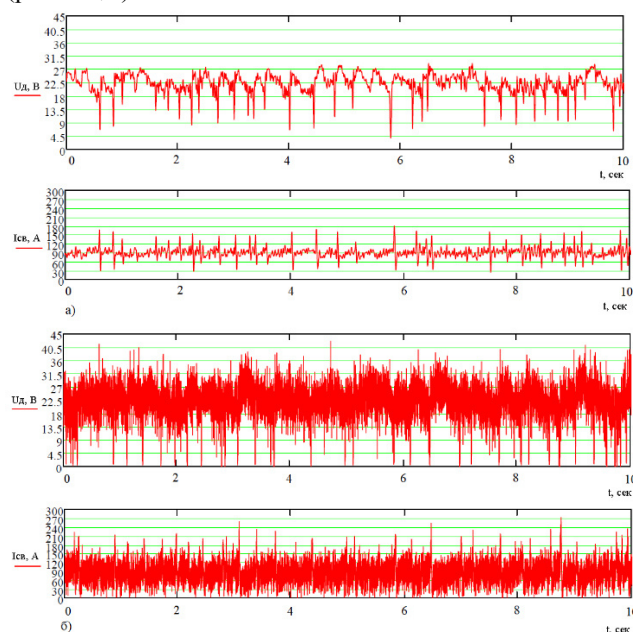


Рисунок 1. Осциллограммы тока и напряжения на дуге ($U_d = U_{д.осц.}$ В) в процессе сварки ($I_{св.} = I_{св.пр.}$ А) исходя из времени длительности измерения ($t = 10,00$, сек):

а) $I_{св.} = I_{св.пр.} = 100,00 \text{ А}$ без (QPC);

б) $I_{св.} = I_{св.пр.} = 100,00 \text{ А}$ с (QPC) $f_{и.г.} = 40 \cdot 10^3 \text{ Гц}$

Figure 1. Oscillograms of current and voltage on the arc ($U_d = U_{д.осц.}$ В) during welding ($I_{св.} = I_{св.пр.}$ А) based on the measurement time ($t = 10,00$, s): а) $I_{св.} = I_{св.пр.} = 100,00 \text{ А}$ without (QPC); б) $I_{св.} = I_{св.пр.} = 100,00 \text{ А}$ (QPC) $f_{и.г.} = 40 \cdot 10^3 \text{ Гц}$

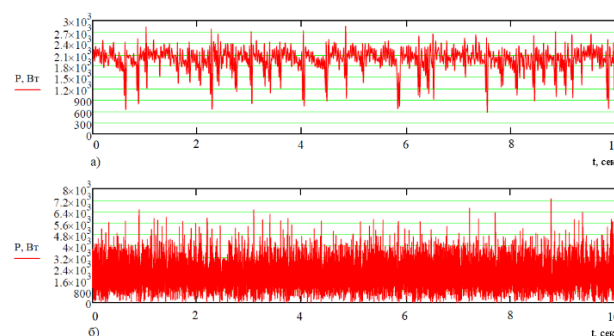


Рисунок 2. Графики зависимости мощности на дуге ($P = P_{пр.}$ Вт) в процессе сварки ($I_{св.} = I_{св.пр.}$ А) исходя из времени длительности измерения ($t = 10,00$, сек):

а) $I_{св.} = I_{св.пр.} = 100,00 \text{ А}$ без (QPC); б) $I_{св.} = I_{св.пр.} = 100,00 \text{ А}$ с (QPC) $f_{и.г.} = 40 \cdot 10^3 \text{ Гц}$

Figure 2. Curves of power dependence on arc ($P = P_{пр.}$ Вт) during welding ($I_{св.} = I_{св.пр.}$ А) based on measurement duration time ($t = 10,00$, sec): а) $I_{св.} = I_{св.пр.} = 100,00 \text{ А}$ without (QPC); б) $I_{св.} = I_{св.пр.} = 100,00 \text{ А}$ (QPC) $f_{и.г.} = 40 \cdot 10^3 \text{ Гц}$

Для осуществленных вариантов проведения сварочного процесса без подачи на сварочный контур

¹ Бурдаков С.М. Экспериментальные исследования устойчивости горения сварочной дуги с использованием информационно-измерительной и управляющей системы. – Сборник докладов 5-й Международной научной-практической конференции «Качество науки – качество жизни», Тамбов, 26-27 февраля 2009 г. Тамбов: Центр Конференций ТГТУ, 2009. – С. 54.

высокоинтенсивного импульсного воздействия ($I_{\text{св.пр.}}=100,0$ А) и с его подачей (QPS): $U_{\text{и.г.}}=80,0$ В, $f_{\text{и.г.}}=40\cdot 10^3$ Гц, $I_{\text{св.}}=100,0$ А), были получены следующие результаты по исследованию энергетической мощности соответственно $P_{\text{св.пр.баз}}$ и $P_{\text{св.пр.предлог.}}$.

Максимальное импульсное значение мощности выделяемой в сварочном контуре: $P_{\text{св.пр.баз}}=2,843\cdot 10^3$ Вт; $P_{\text{св.пр.предлог.}}=7,284\cdot 10^3$ Вт. При этом разность значений максимальных импульсных мощностей по базовой и предлагаемой технологии составит: $\Delta_{\text{св.пр.макс.}}=4,44\cdot 10^3$ Вт. Полученные результаты могут быть объяснены особенностями протекания физических процессов ионизации и рекомбинации носителей заряда в плазме дуги, а так же влиянии на ее проводимость при воздействии (QPC) [13].

Исходя из полученных экспериментальных данных, была выполнена энергетическая оценка ввода дополнительного высокоинтенсивного импульсного воздействия на сварочный контур как ультразвуковой энергии для кавитации поверхностного слоя сварочной ванны при $f_{\text{и.г.}}=40\cdot 10^3$ Гц. Максимальная мощность дополнительного воздействия может быть определена по формуле (1) [14], Дж/с:

$$W=0,5\cdot A^2\cdot \omega^2\cdot \rho\cdot c\cdot S, \quad (1)$$

где A – максимальная, заданная амплитуда пучности-возмущения жидкой фазы металла (на уровне размера кристалла $0,00002$ м [4]);

ω – угловая частота $\omega=2\cdot \pi\cdot f_{\text{и.г.}}$ (251200 Гц);

$f_{\text{и.г.}}$ – частота колебаний, Гц;

ρ – плотность среды (для стали 7900 кг/м³);

c – скорость звука среды (для стали 5177 м/с);

$S=0,000014$ м² – площадь сечения поверхности сварного шва шириной 7 мм подверженного обработке (QPC).

Ввод энергии дополнительного высокоинтенсивного импульсного воздействия в виде ультразвуковых колебаний получается в виде выходной мощности специализированного генератора-источника питания W в Джоулях за $t=1$ сек. процесса:

$$W_{\text{us}}=W\cdot t. \quad (2)$$

Используя заданные значения параметров в формулах (1) и (2), получим оценку полезной вводимой в сварочную ванну ультразвуковой энергии от генератора-источника $W_{\text{us}}=7226$ Дж. Значение разности значений импульсных мощностей, по базовой и предлагаемой технологии согласуется с результатами расчета W_{us} и соответствует требуемому значению возникновения структурных изменений в сварном шве.

Можно сказать, что дуговой разряд постоянного тока при наложении на него высокоинтенсивного импульсного воздействия частотой $f_{\text{и.г.}}=40\cdot 10^3$ Гц (QPS) является источником кавитации жидкой фазы металла сварочной ванны в ограниченном поверхностном слое заданной толщины. Можно предположить, что кристаллизация ванны идет слоями при воздействии на сварочный контур высокоинтенсивного импульсного воздействия частотой $f_{\text{и.г.}}=40\cdot 10^3$ Гц (QPS), что согласуется с данными специалистов [15]. При этом происходит надлом растущих кристаллов при колебаниях жидкой фазы за счет сил трения, возникающих между движущейся жидкой фазой и растущим кристаллом, в ограниченной на уровне среднего диаметра зерна кристалла зоне. В месте надлома кристалла образуются новые зоны динамически переохлажденного металла, что ведет к появлению новых центров кристаллизации, возникает мелкозернистая структура сварного шва.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Чернов А.В., Полетаев Ю.В., Кавришвили З.О., Бурдаков С.М. Повышение устойчивости горения дуги при сварке покрытыми электродами. Чернов А.В., Полетаев Ю.В., Кавришвили З.О., Бурдаков С.М. Повышение устойчивости горения дуги при сварке покрытыми электродами. *Сварочное производство*. 2000;(2):7–9. 2000;(2):7–9. Режим доступа: <https://bik.sfu-kras.ru/elib/view?id=PRSV-svar/2000/2> (дата обращения: 25.08.2023).
2. Хромченко Ф.А. Надежность сварных соединений труб котлов и паропроводов. Москва: Энергоиздат, 1982. 120 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001115162> (дата обращения: 01.09.2023).
3. Бурдаков С.М., Орехов М.И. Анализ способов повышения и критериев оценки устойчивости сварочного дугового разряда. *Инженерный вестник Дона*. 2016;2. Режим доступа: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3594> (дата обращения: 25.08.2023).
4. Бурдаков С.М. Дамаскина М.Б., Желецкий Д.И. Исследование структуры металла сварных соединений при импульсном воздействии на дуговой разряд. *Глобальная ядерная безопасность*. 2021;11(1):38–43. <https://doi.org/10.26583/gns-2021-01-04>
5. Болдырев А.М. О механизме формирования структуры металла шва при введении низкочастотных колебаний в сварочную ванну. *Сварочное производство*. 1976;(2):52–55. Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_rc_3504267_1000650114/ (дата обращения: 01.09.2023).
6. Славин Г.А., Столпнер Е.А., Морозова Т.В., Маслова Н.Д., Хорошева В.Б. Управление процессом кристаллизации путем динамического воздействия дуги. *Сварочное производство*. 1974;(8):2–3. Режим доступа: <https://djuv.online/file/uYUmHfohtfC9j> (дата обращения: 01.09.2023).
7. Бурдаков С.М., Чернов А.В., Полетаев Ю.В., Полежаев С.В., Прокопенко В.В. Повышение устойчивости дугового разряда и качества соединений при сварке покрытыми электродами. *Новые методы теоретических и экспериментальных исследований материалов, приборов и технологий: сборник научных трудов Волгодонского института Новочеркасского государственного технического университета*. Новочеркасск: Набл, 2001. С. 111–115. Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/004191_000025_DONPB-RU_DSPL_3027404/ (дата обращения: 25.08.2023).
8. Бурдаков С.М. Механизм повышения ударной вязкости соединений при импульсном воздействии на сварочный контур. *Глобальная ядерная безопасность*. 2016;7(3):20:51–56. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27382024> (дата обращения: 25.08.2023).

9. Букаров В.А., Ермаков С.С., Дорина Т.А. Оценка стабильности дуговой сварки по осциллограммам процесса с использованием статистических методов. *Сварочное производство*. 1990;(12):30–32. Режим доступа: <https://djvu.online/file/zovZ6Y5cqgdqt> (дата обращения: 01.09.2023).

10. Бурдаков С.М., Чернов А.В., Цуверкалова О.Ф., Зокиров К.Д. Управление газодинамическими характеристиками дугового разряда с помощью квазигармонической компоненты питания. *Безопасность ядерной энергетики: тезисы докладов XVI Международной научно-практической конференции, 12-13 ноября 2020 г.* Волгодонск: ВИТИ НИЯУ МИФИ, 2020. С. 63–66. ISBN 978-5-72622472-5. Режим доступа: <https://nps.viti-mephi.ru/ru/arhiv-konferencii> (дата обращения: 01.09.2023).

11. Бурдаков С.М., Козловцев В.М. Исследование параметров дугового разряда с комбинированной системой питания. *Глобальная ядерная безопасность*. 2014;2(11):54–58. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22254712> (дата обращения: 01.09.2023).

12. Бурдаков С.М. Методы диагностики плазменно-дуговых процессов при импульсном воздействии на сварочный контур. *Альманах современной науки и образования*. 2014;11(89):41–45. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22265549> (дата обращения: 25.08.2023).

13. Burdakov S.M., Chernov A.V., Poletaev Y.V., Polezhaev S.V. Physical model of electric arc discharge with the application of high frequency voltage. *Welding International*. 2002;16(4):317–319. <https://doi.org/10.1080/09507110209549537>

14. Голямина И.П. Ультразвук. Москва: Советская энциклопедия, 1979. 400 с. Режим доступа: <https://djvu.online/file/eVdvBKuTNbN8W> (дата обращения: 01.09.2023).

15. Дюргер Н.Г., Сагиров Х.Н., Ленинкин В.А. Оборудование для импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом. Москва: Энергоатомиздат, 1985. 80 с. Режим доступа: <https://djvu.online/file/aPi0Asb8krza2> (дата обращения: 25.08.2023).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Бурдаков С.М. – разработка теории, оборудования, планирование и проведение экспериментов, расчетов, выполнение анализа результатов экспериментов, разработка программного обеспечения;

Ратушный В.И. – выполнение анализа результатов расчетов, статистический анализ физико-математической модели вычислений, создание рукописи статьи при поддержке С.М. Бурдакова;

Заяров Ю.В. – выполнение анализа результатов расчетов, руководство научно-исследовательской работой и проверка ее результатов.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Авторы заявляют об отсутствии финансовой помощи при проведении исследования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Сергей Михайлович Бурдаков, к.т.н., доцент кафедры строительных производств, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»; г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8599-6008>

e-mail: SMBurdakov@mephi.ru

Виктор Иванович Ратушный, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физико-математических дисциплин, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»; г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5701-6279>

e-mail: VIRatushnyj@mephi.ru

Юрий Владимирович Заяров, к.т.н., заведующий кафедрой строительных производств, доцент кафедры строительных производств Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»; г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3353-8037>

e-mail: YVZayarov@mephi.ru

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Burdakov S.M. – development of theory, equipment, planning and conducting experiments, calculations, analysis of experimental results, software development;

Ratushny V.I. – analysis of calculation results, statistical analysis of physical and mathematical model of calculations, creation of article manuscript with S.M.Burdakov's support;

Zayarov Yu.V. – analysis of the results of calculations, management of research work and verification of its results.

FUNDING:

No funding was received by the authors to do the research.

CONFLICT OF INTEREST:

The author declares no conflicts of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Sergey M. Burdakov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of construction industries department, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8599-6008>

e-mail: SMBurdakov@mephi.ru

Viktor I. Ratushny, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor (Eng.), head of the department of physical and mathematical disciplines, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5701-6279>

e-mail: VIRatushnyj@mephi.ru

Yuriy V. Zayarov, Cand. Sci. (Eng.), head of the department of construction production associate, professor of construction industries department, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3353-8037>

e-mail: YVZayarov@mephi.ru

Поступила в редакцию 09.10.2023

После доработки 23.11.2023

Принята к публикации 28.11.2023

Received 09.10.2023

Revision 23.11.2023

Accepted 28.11.2023