

УДК 621.3; 533.9

ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ЭКСПЛУАТАЦИЮ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ПЛАЗМЕННЫХ СИСТЕМ ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ТОПЛИВА

В.В. Романова^{1,2}, А.Г. Батухтин¹, С.В. Хромов¹, К.В. Суслов³

¹ Забайкальский государственный университет
Россия, 672039, г. Чита, ул. Александро-Заводская, 30

² Филиал Национального исследовательского университета
«Московский энергетический институт» в г. Волжском
Россия, 404110, г. Волжский, пр-т им. Ленина, 69

³ Национальный исследовательский университет
«Московский энергетический институт»
Россия, 111250, г. Москва, Красноказарменная, 17

E-mail: romanova181@mail.ru, batuhtina_ir@mail.ru, sergeixrom@inbox.ru, souslov@istu.edu

Аннотация. Работа посвящена исследованию влияния качества электрической энергии на срок службы электродов плазменных систем термохимической подготовки топлива, применяемых на тепловых электрических станциях, которые работают на угольном топливе. Детально освещены вопросы перемещения приэлектродного участка плазмы при использовании магнитно-волнового сканирования. В качестве основного инструмента исследования использовано программное обеспечение ANSYS Maxwell. Компьютерное моделирование выполнено при следующих основных параметрах эксперимента: коэффициент несимметрии по нулевой последовательности (K_{0U}) равен 2 % и 4 %; коэффициент несимметрии по обратной последовательности (K_{2U}) равен 2 % и 4 %; отклонение напряжения $\delta U_{(+)}$ равно 5 % и 10; применяемые материалы изготовления электродов: медь (Cu), псевдосплав вольфрама, никеля и меди – ВНДС ($W + Ni + Cu$), псевдосплав молибдена, вольфрама и меди – МВД ($Mo + W + Cu$). На основании полученных результатов моделирования построены графические отображения изменения траекторий движения приэлектродного участка плазмы при различных искажающих факторах, зависимости изменения величин удельной эрозии различных материалов электродов, графические зависимости изменения срока службы электродов плазменных систем. Исследования, выполненные с применением компьютерного моделирования на основе программного продукта ANSYS Maxwell, позволили выполнить количественную оценку влияния искажений напряжения на траекторию перемещения приэлектродного участка плазмы и, следовательно, срок службы электродов плазматрона. В частности, в процессе исследования выполнена детальная оценка и анализ степени влия-

¹ Виктория Викторовна Романова, кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергетика».

Андрей Геннадьевич Батухтин, доктор технических наук, доцент, декан энергетического факультета.

Сергей Владимирович Хромов, старший преподаватель кафедры «Энергетика».

Константин Витальевич Суслов, доктор технических наук, доцент кафедры «Гидроэнергетика и возобновляемые источники энергии».

ния на эксплуатацию и техническое состояние электродов плазменных систем таких показателей качества электрической энергии, как коэффициенты несимметрии по обратной и нулевой последовательности, отклонение напряжения. Проведено обсуждение полученных результатов исследования, сформулированы рекомендации по применению плазменных систем термохимической подготовки топлива, используемых на тепловых электрических станциях для розжига топлива пылеугольных котлов.

Ключевые слова: компьютерное моделирование в программном обеспечении ANSYS Maxwell, качество электрической энергии, плазменные системы термохимической подготовки топлива, приэлектродный участок плазмы, магнитно-волновое сканирование, срок службы электродов плазменных систем.

Введение

Качество электрической энергии (КЭЭ) – одно из основополагающих аспектов эффективной работы элементов электроэнергетических систем. Как известно [1–5], КЭЭ в ряде регионов России и за рубежом не соответствует регламентируемым ГОСТ 32144–2013 [6] значениям, в наибольшей степени преобладает отклонение таких показателей качества электрической энергии (ПКЭ), как несимметрия и несинусоидальность напряжения, отклонение напряжения.

На сегодняшний день плазменные системы термохимической подготовки топлива находят широкое применение в топливно-энергетических комплексах электроэнергетических систем [7, 8]. Согласно спецификации производителей плазменных систем, для их стабильной работы необходимо наличие определенных энергоресурсов (электропитание, водоснабжение и т. д.), которые должны соответствовать определенным требованиям [7–10].

Сложность работы плазменных систем термохимической подготовки топлива заключается в чувствительности данных систем к внешним помехам, таким как искажение напряжения питающей сети. Как и любое технически сложное оборудование, плазменные системы сконструированы и изготовлены для работы в строго определенных (номинальных) условиях эксплуатации [11–15].

Стоит отметить, что одними из основных элементов электродуговых плазменных систем термохимической подготовки топлива являются электроды, способствующие образованию плазмы при эксплуатации плазменных установок [15–16]. Для данных элементов характерны неисправности и преждевременный выход из строя, обусловленные износом поверхности электродов, который вызывается такими факторами, как термическое воздействие со стороны электрической дуги, а кроме того, электроэрозионное и коррозионно-окислительное воздействие. В зоне непосредственного воздействия привязки электрической дуги на поверхность электрода возможен его локальный нагрев до температуры в несколько тысяч градусов. Соответственно, при перемещении пятна привязки на поверхности электродов возможны появления каверн, трещин, отколов вследствие термохимических воздействий [19–21].

Одним из наиболее эффективных способов увеличения ресурса электродов является применение магнитно-волнового сканирования для перемещения приэлектродного участка плазмы. Разновидностью магнитно-волнового сканирования является питание электромагнитных катушек плазматрона переменным напряжением [22]. Стоит подчеркнуть, что при использовании любого переменного напряжения в качестве питания плазменной установки необходимо учитывать его качество.

Известно, что движение приэлектродного участка плазмы зависит от сочетания пондемоторной силы и электромагнитных сил катушек [12–24]. Вследствие этого изменения электромагнитного поля катушек из-за искажения напряжения приведут к изменению движения приэлектродного участка плазмы. Отсюда следует, что подобные искажения траекторий, возникающие при отклонении уровня напряжений от регламентируемых [6] значений, могут значительно снизить ресурс электродов, так как при подобной форме траектории увеличивается время нахождения приэлектродного участка плазмы в одной области электрода. Снижение ресурса электрода, в свою очередь, уменьшает ресурс установки плазматрона в целом.

Именно поэтому в рамках настоящей статьи предлагается выполнить исследования и оценку влияния искажения напряжений на траекторию движения приэлектродного участка плазмы с магнитно-волновым сканированием и последующего изменения ресурса плазматрона при определенных условиях эксплуатации.

Материалы и методы исследования

В качестве основного инструмента исследования использовано программное обеспечение ANSYS Maxwell [25]. Указанный программный продукт предоставляет возможность выполнения процедуры оценки влияния искажений напряжения на траекторию перемещения приэлектродного участка плазмы и, следовательно, ресурс электродов плазматрона.

Как известно, траектория движения приэлектродного участка плазмы зависит от изменения электромагнитных сил катушек плазматрона, то есть изменение электромагнитного поля катушек приводит к изменению траектории движения приэлектродного участка плазмы. Следовательно, для оценки влияния искажений напряжения необходимо выполнить построение картины электромагнитных полей катушек плазматрона.

В проводимых исследованиях выбраны следующие параметры эксперимента:

- коэффициент несимметрии по нулевой последовательности (K_{0U}), равный 2 % и 4 %;
- коэффициент несимметрии по обратной последовательности (K_{2U}), равный 2 % и 4 %;
- отклонение напряжения $\delta U_{(+)}$, равное 5 % и 10 %.

Искажение напряжения задавалось однократно и оставалось неизменным на протяжении каждой итерации эксперимента.

В процессе исследования выполнены следующие эксперименты:

- *эксперимент № 1* – построение эталонной траектории движения приэлектродного участка плазмы без искажения напряжения;
- *эксперимент № 2* – построение траектории движения приэлектродного участка плазмы при величине $K_{2U} = 2\%$;
- *эксперимент № 3* – построение траектории движения приэлектродного участка плазмы при величине $K_{2U} = 4\%$;
- *эксперимент № 4* – построение траектории движения приэлектродного участка плазмы при величине $K_{0U} = 2\%$;
- *эксперимент № 5* – построение траектории движения приэлектродного участка плазмы при величине $K_{0U} = 4\%$;

- эксперимент № 6 – построение траектории движения приэлектродного участка плазмы при величине $\delta U_{(+)} = 5\%$;
- эксперимент № 7 – построение траектории движения приэлектродного участка плазмы при величине $\delta U_{(+)} = 10\%$.

Результаты исследования и их обсуждение

Примеры статичных форм электромагнитных полей без искажения напряжения приведены на рис. 1, при искажении напряжения (параметры $K_{2U} = 4\%$, $\delta U_{(+)} = 10\%$) – на рис. 2, 3.

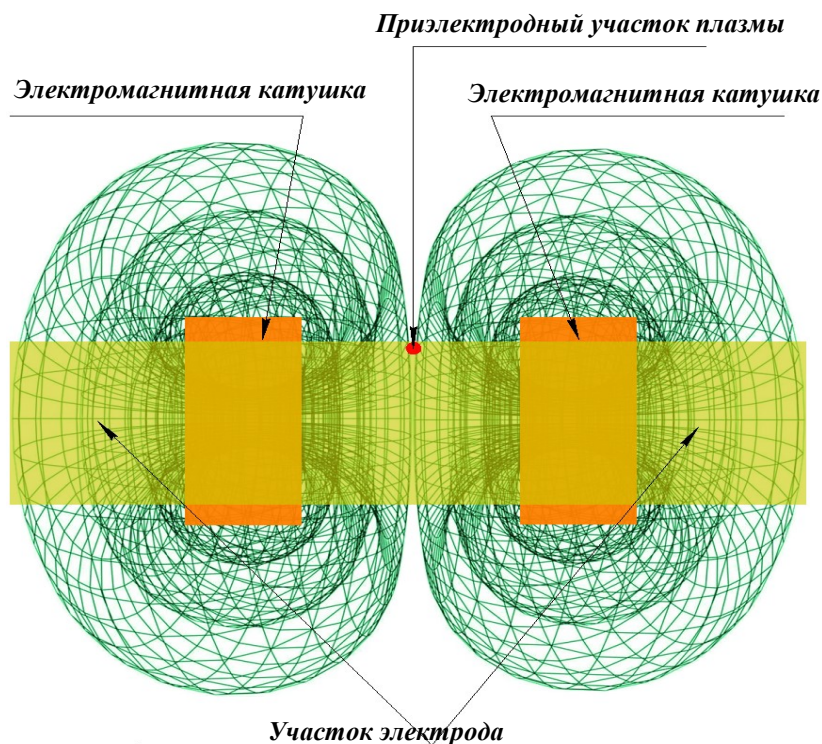


Рис. 1. Электромагнитное поле модели магнитно-волнового сканирования без искажения напряжения

Сравнение статичных форм электромагнитных полей, изображенных на рис. 1–3, показывает их видоизменения при воздействии искажающих факторов. Так, размер статичной формы электромагнитного поля катушки при несимметрии напряжений отличается от размера статичной формы как при отклонении напряжения, так и без искажения напряжений.

В рамках исследования траекторий движения приэлектродного участка плазмы необходимо реализовать картины разверток трехмерного движения на плоскость при различных параметрах эксперимента, далее представленных на рис. 4–10.

В результате выполненных экспериментов получены траектории движения приэлектродного участка плазмы, изображенные на рис. 4–10, из которых становится очевидным, что при перемещении приэлектродного участка плазмы с маг-

нитно-волновом сканировании переменным током его траектория изменяется со временем.

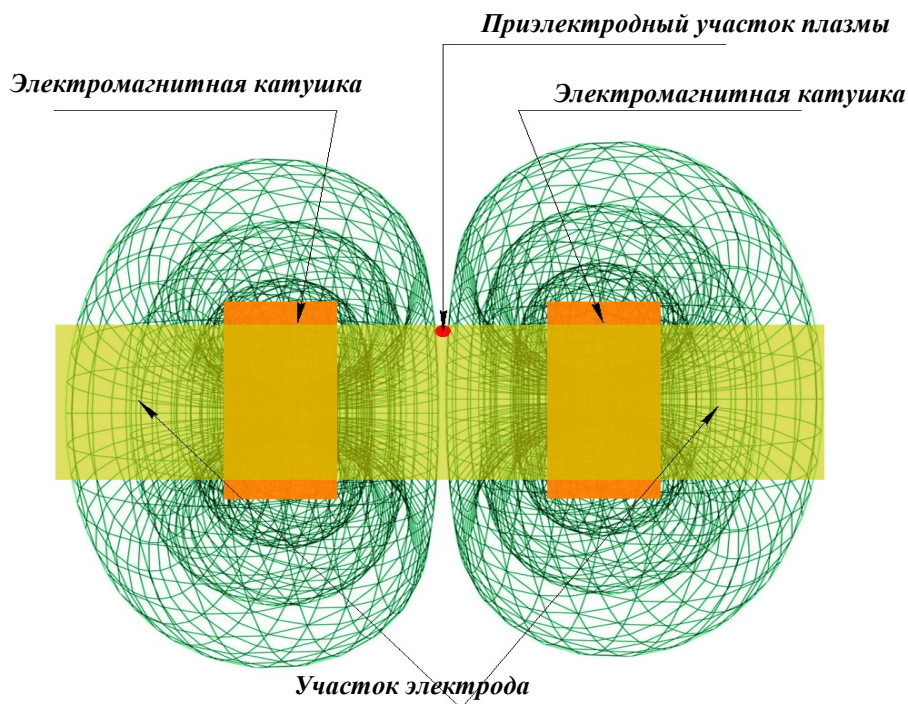


Рис. 2. Электромагнитное поле модели магнитно-волнового сканирования при $K_{2U} = 4\%$

На полученных траекториях движения приэлектродного участка плазмы (см. рис. 4–10) отображены моменты появления резких изменений кривой, что позволяет судить о потенциальном перегреве электрода вследствие искажений напряжения.

Анализ траекторий движения приэлектродного участка в выполненных исследованиях показывает следующее:

- в экспериментах № 2 и № 3 – от величины несимметрии напряжений по обратной последовательности зависит степень отклонения формы траектории от формы траектории без искажения напряжений, однако характер воздействия остается схожим;

- в экспериментах № 2 и № 4 – схожесть влияния составляющих несимметрии напряжений на траекторию движения, однако степень данного влияния различна. Несимметрия напряжений по обратной последовательности оказывает большее влияние, чем несимметрия напряжений по нулевой последовательности, на форму траектории движения;

- в экспериментах № 4 и № 5 – зависимость изменения формы траектории от величины несимметрии напряжения нулевой последовательности. Чем больше величина несимметрии напряжений по нулевой последовательности, тем больше отклонение траектории, следовательно, тем больше вероятность возникновения каверн на участке электрода.

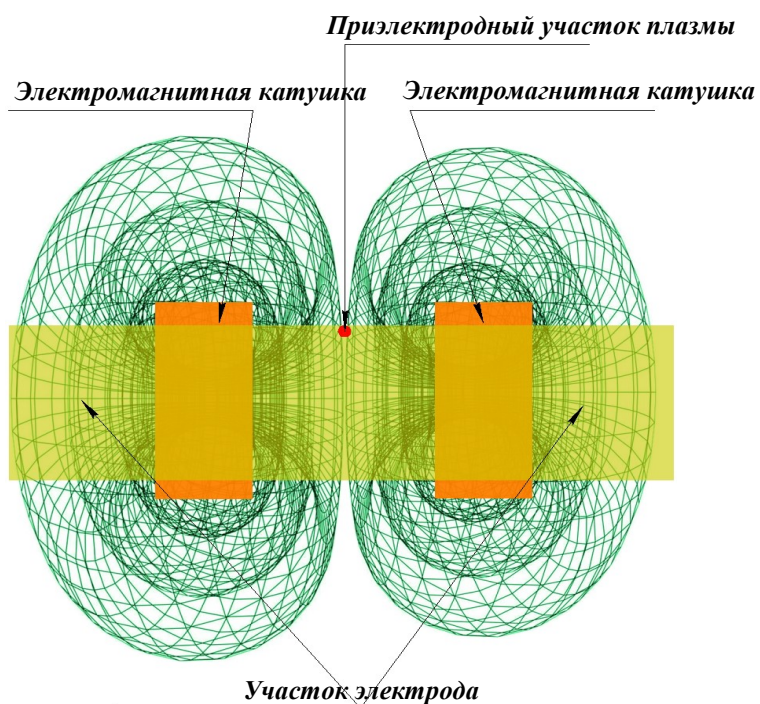


Рис. 3. Электромагнитное поле модели магнитно-волнового сканирования при $\delta U_{(+)} = 10\%$

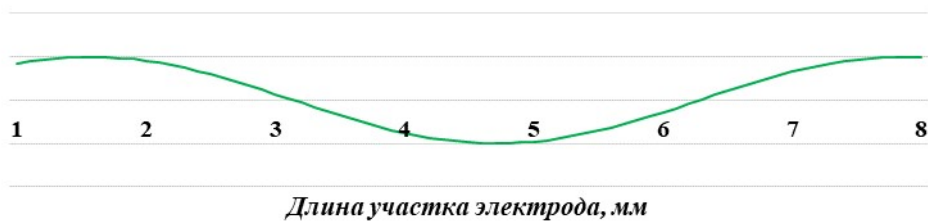


Рис. 4. Траектория движения приэлектродного участка плазмы без искажения величины напряжения

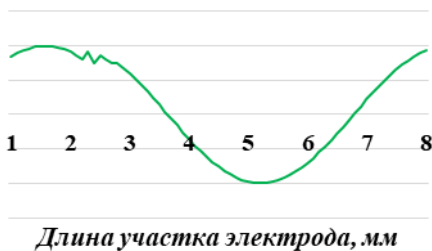


Рис. 5. Траектория движения приэлектродного участка плазмы при $K_{2U} = 2\%$

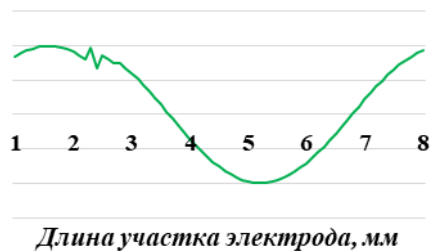


Рис. 6. Траектория движения приэлектродного участка плазмы при $K_{2U} = 4\%$

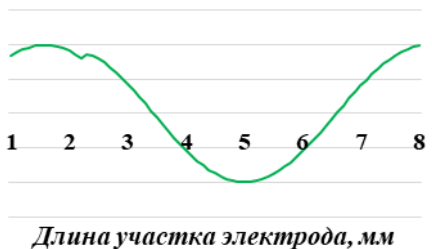


Рис. 7. Траектория движения приэлектродного участка плазмы при $K_{0U} = 2\%$



Рис. 8. Траектория движения приэлектродного участка плазмы при $K_{0U} = 4\%$

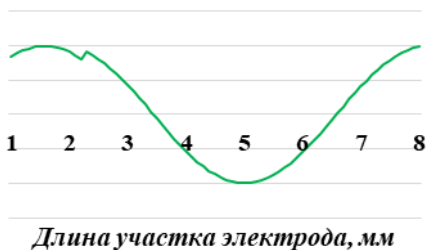


Рис. 9. Траектория движения приэлектродного участка плазмы при $\delta U_{(+)} = 5\%$

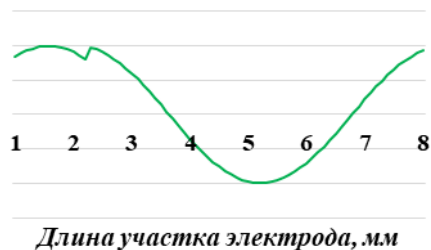


Рис. 10. Траектория движения приэлектродного участка плазмы при $\delta U_{(+)} = 10\%$

Таким образом, анализ результатов моделирования траекторий показал, что форма изменения кривой при отклонении напряжения отличается от формы траекторий при наличии несимметрии напряжений. Кроме того, очевидно, что величина отклонения напряжения прямо пропорциональна величине искажения траектории движения приэлектродного участка плазмы относительно формы траектории без искажения напряжений, полученной в результате эксперимента № 1.

В итоге в выполненных экспериментах № 2–7 построен участок с искривлением формы траектории относительно формы траектории без искажения напряжений. Соответственно, изменение движения траектории приэлектродного участка плазмы показывает качественную характеристику влияния искажения на

пряжения на ресурс электродов плазматрона. Именно поэтому для количественной оценки степени воздействия искажения напряжений необходимо определить динамику варьирования величин эрозии электродов вследствие изменения показателей качества электрической энергии.

Следовательно, отразим взаимосвязь искажений траекторий приэлектродного участка плазмы с величиной эрозии электрода через изменения температуры электрода. Срок службы электрода плазматрона определим согласно формуле

$$Z = \frac{\rho \pi D L_{\text{эф}} H}{GI}, \quad (1)$$

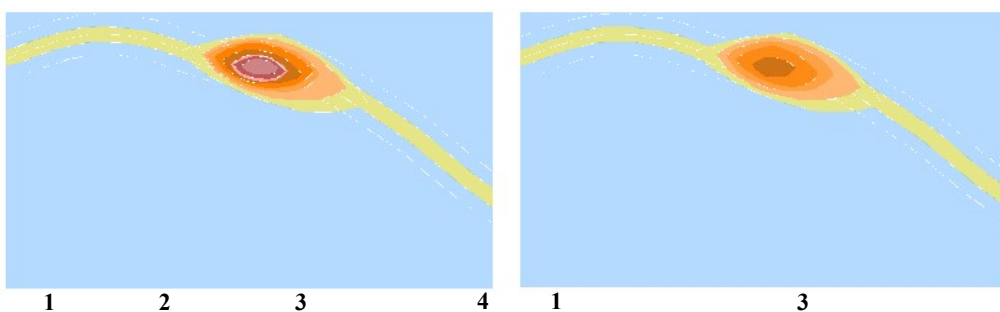
где ρ – плотность материала электрода, г/см³; G – удельная эрозия электрода, мкг/К; I – фазный ток плазматрона, А; $L_{\text{эф}}$ – цилиндрическая область эрозии электрода, мм; H – толщина стенки электрода, мм; D – толщина эрозии электрода, мм.

В формуле (1) приняты допущения: область эрозии электрода, ограниченная криволинейной поверхностью длиной L , заменена цилиндрической с эффективной длиной $L_{\text{эф}}$. Это допущение оправдано в силу того, что зона эрозии на порядок превышает как толщину эрозии, так и толщину стенки электрода [26]. Значения параметров формулы (1), кроме удельной величины эрозии, принимаем постоянными. Величина удельной эрозии будет зависеть от температуры перегрева электрода, зависящей, в свою очередь, от траектории движения приэлектродного участка. Исходя из этого для нахождения данной зависимости необходимо выполнить исследования изменения температуры электрода плазматрона при различных искажениях напряжения, используя программный продукт ANSYS Maxwell.

С целью определения количественных значений изменения ресурса электродов плазматрона необходимо получить данные величин удельной эрозии электрода при различных искажениях напряжения, используя формулу (1). Следовательно, выполним следующий эксперимент с соответствующими параметрами:

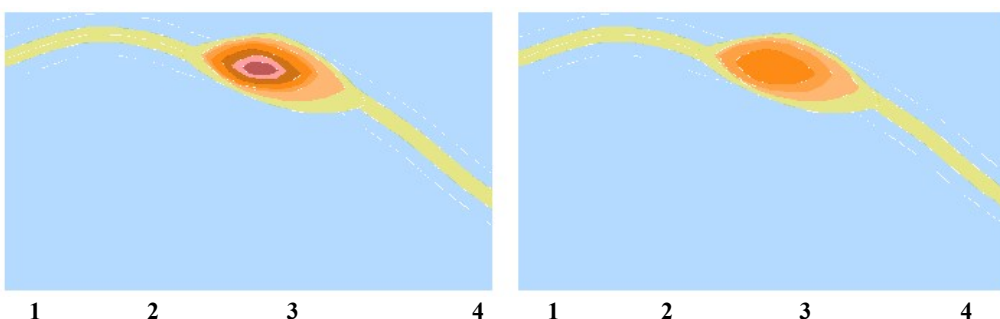
- применяемые материалы изготовления электродов: медь (Cu), псевдосплав молибдена, вольфрама и меди – МВД (Mo + W + Cu) и псевдосплав вольфрама, никеля и меди – ВНДС (W + Ni + Cu);
- начальная рабочая температура электродов принята равной 1000 К;
- начальные форма и размеры электродов одинаковы на каждой итерации моделирования;
- величина фазного тока постоянна на каждой итерации моделирования;
- коэффициент несимметрии по нулевой последовательности (K_{0U}) равен 2 % и 4 %;
- коэффициент несимметрии по обратной последовательности (K_{2U}) равен 2 % и 4 %;
- отклонение напряжения $\delta U_{(+)}$ равно 5 % и 10 %.

В результате комплекса экспериментов получены данные изменения температуры электрода плазматрона при движении приэлектродного участка плазмы при различных искажениях напряжения, проиллюстрированные на рис. 11–19. Очевидно, что отображение изменения температуры электрода плазматрона показывает области повышенный температуры электрода при различных искажениях напряжения.



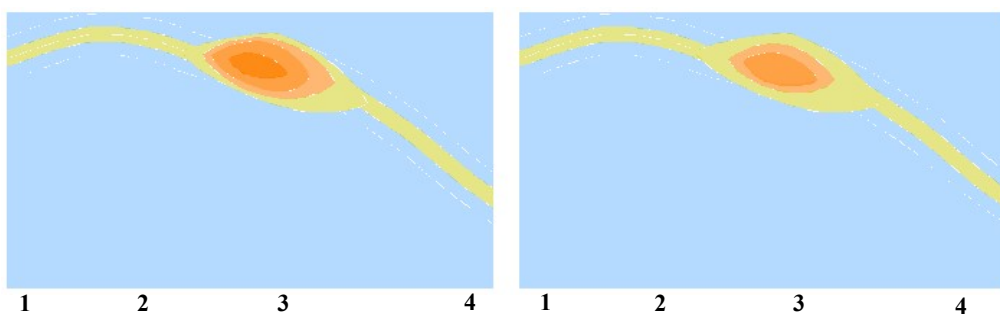
а) Длина участка электрода, мм б) Длина участка электрода, мм
 $\Delta T < 50 \text{ K}$ $\Delta T < 150 \text{ K}$ $\Delta T < 250 \text{ K}$ $\Delta T < 290 \text{ K}$ $\Delta T < 330 \text{ K}$
 $\Delta T < 100 \text{ K}$ $\Delta T < 200 \text{ K}$ $\Delta T < 270 \text{ K}$ $\Delta T < 310 \text{ K}$

Рис. 11. Отображение изменения температуры медного электрода плазматрона при движении приэлектродного участка плазмы при $K_{2U} = 2\%$ (а), $K_{2U} = 4\%$ (б)



а) Длина участка электрода, мм б) Длина участка электрода, мм
 $\Delta T < 50 \text{ K}$ $\Delta T < 150 \text{ K}$ $\Delta T < 250 \text{ K}$ $\Delta T < 290 \text{ K}$
 $\Delta T < 100 \text{ K}$ $\Delta T < 200 \text{ K}$ $\Delta T < 270 \text{ K}$ $\Delta T < 310 \text{ K}$

Рис. 12. Отображение изменения температуры медного электрода плазматрона при движении приэлектродного участка плазмы при $K_{0U} = 2\%$ (а), $K_{0U} = 4\%$ (б)



а) Длина участка электрода, мм б) Длина участка электрода, мм
 $\Delta T < 50 \text{ K}$ $\Delta T < 150 \text{ K}$ $\Delta T < 250 \text{ K}$
 $\Delta T < 100 \text{ K}$ $\Delta T < 200 \text{ K}$

Рис. 13. Отображение изменения температуры медного электрода плазматрона при движении приэлектродного участка плазмы при $\delta U_{(+)} = 5\%$ (а), $\delta U_{(+)} = 10\%$ (б)

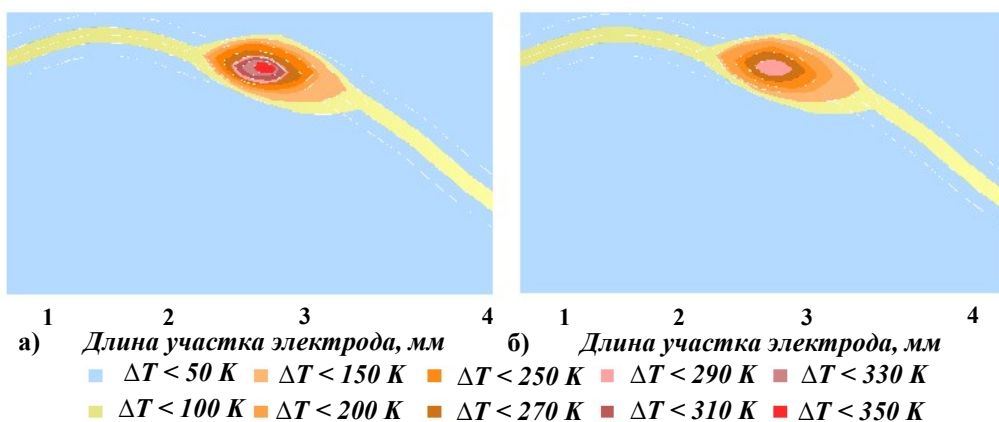


Рис. 14. Отображение изменения температуры электрода из псевдосплава молибдена, вольфрама и меди (МВД) плазматрона при движении приэлектродного участка плазмы при $K_{2U} = 2\%$ (а), $K_{2U} = 4\%$ (б)

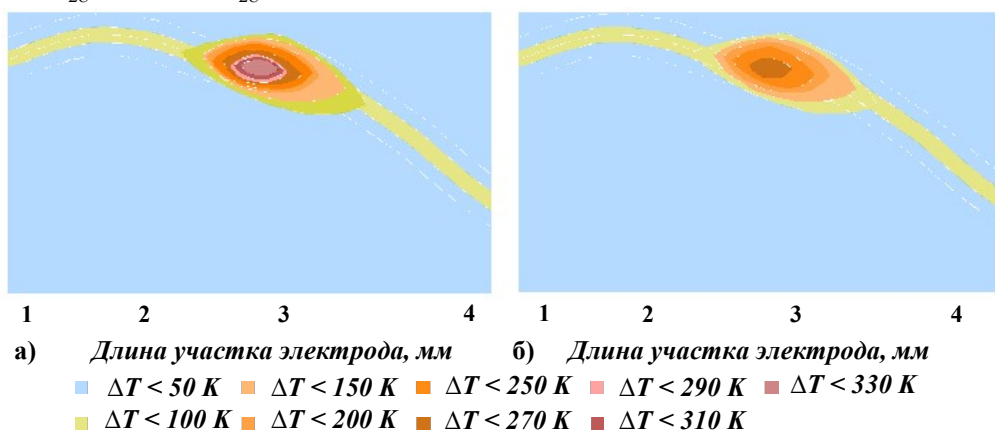


Рис. 15. Отображение изменения температуры электрода из псевдосплава молибдена, вольфрама и меди (МВД) плазматрона при движении приэлектродного участка плазмы при $K_{0U} = 2\%$ (а), $K_{0U} = 4\%$ (б)

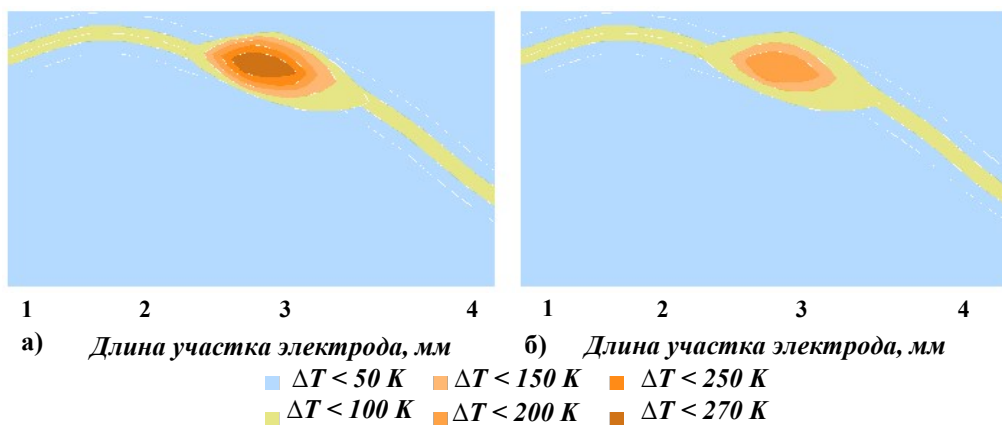


Рис. 16. Отображение изменения температуры электрода из псевдосплава молибдена, вольфрама и меди (МВД) плазматрона при движении приэлектродного участка плазмы при $\delta U_{(+)} = 5\%$ (а), $\delta U_{(+)} = 10\%$ (б)

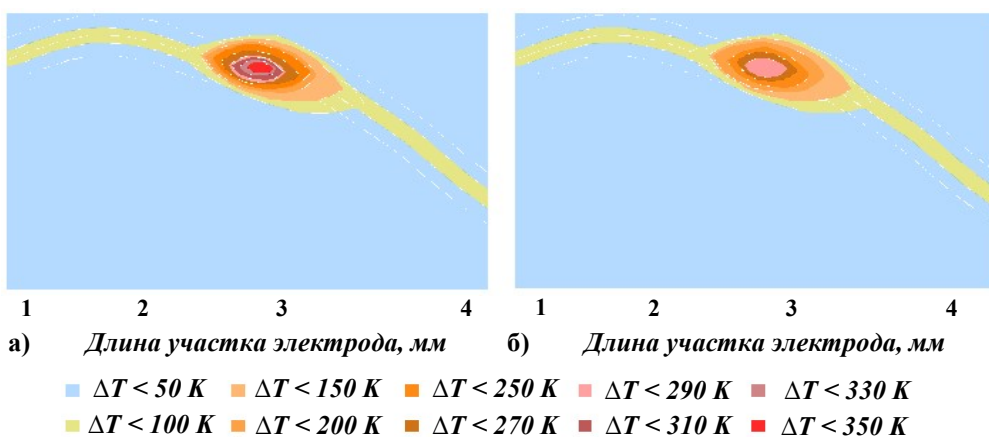


Рис. 17. Отображение изменения температуры электрода из псевдосплава вольфрама, никеля и меди (ВНДС) плазматрона при движении приэлектродного участка плазмы при $K_{2U} = 2\%$ (а), $K_{2U} = 4\%$ (б)

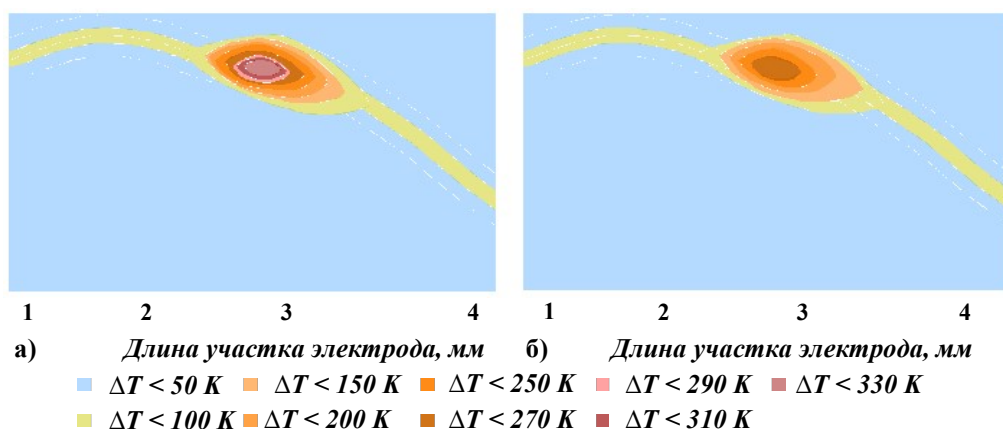


Рис. 18. Отображение изменения температуры электрода из псевдосплава вольфрама, никеля и меди (ВНДС) плазматрона при движении приэлектродного участка плазмы при $K_{0U} = 2\%$ (а), $K_{0U} = 4\%$ (б)

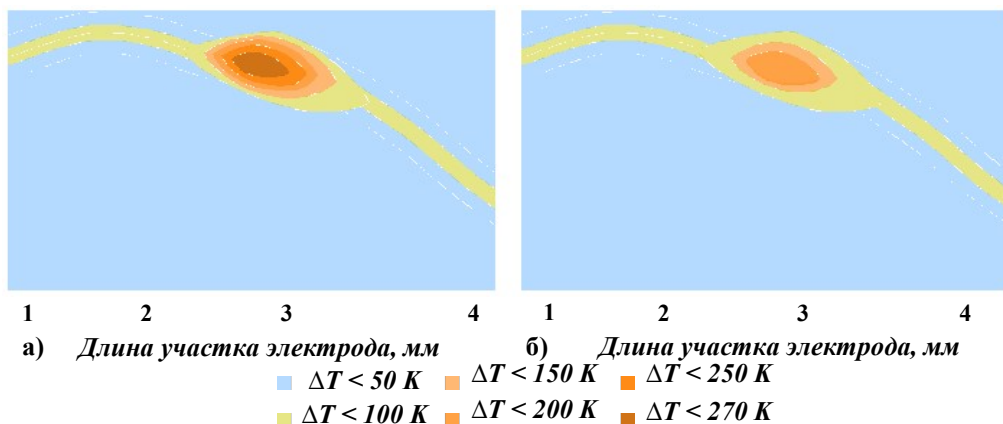


Рис. 19. Отображение изменения температуры электрода из псевдосплава вольфрама, никеля и меди (ВНДС) плазматрона при движении приэлектродного участка плазмы при $\delta U_{(+)} = 5\%$ (а), $\delta U_{(+)} = 10\%$ (б)

Сравнение областей повышенной температуры электродов, изображенных на рис. 11–19, показывает, что повышение температуры участка электрода зависит прямо пропорционально от величины искажения напряжений.

Графические отображения рис. 11–13, иллюстрирующие изменение температуры электрода из меди (Cu) плазматрона с магнитно-волновым сканированием переменным током ΔT :

- при K_{0U} , равном 2 % и 4 % соответственно, показывают, что максимальное ΔT для $K_{0U} = 2\%$ меньше, чем для $K_{0U} = 4\%$, на 110 К. Максимальное ΔT составило для $K_{0U} = 2\%$ $\Delta T = 200$ К, для $K_{0U} = 4\%$ $\Delta T = 310$ К;

- при K_{2U} , равном 2 % и 4 % соответственно, показывают, что максимальное ΔT для $K_{2U} = 2\%$ меньше, чем для $K_{2U} = 4\%$, на 80 К. Максимальное ΔT составило для $K_{2U} = 2\%$ $\Delta T = 250$ К, для $K_{2U} = 4\%$ $\Delta T = 330$ К;

- при $\delta U_{(+)}$, равном 5 % и 10 % соответственно, показывают, что максимальное ΔT для $\delta U_{(+)} = 5\%$ меньше, чем для $\delta U_{(+)} = 10\%$, на 50 К. Максимальное ΔT составило для $\delta U_{(+)} = 5\%$ $\Delta T = 200$ К, для $\delta U_{(+)} = 10\%$ $\Delta T = 250$ К.

Проведенный анализ рис. 11–13 исследованных искажающих факторов свидетельствует о том, что наибольшее влияние K_{2U} оказывает на температурный режим работы электродов. Так, при $K_{2U} = 4\%$ изменение температуры электрода относительно рабочей температуры, равной $T = 1000$ К, составило $\Delta T' = 330$ К.

Графические отображения, представленные на рис. 13–16, иллюстрирующие изменение температуры электрода из псевдосплава молибдена, вольфрама и меди – МВД (Mo + W + Cu) плазматрона с магнитно-волновым сканированием переменным током ΔT :

- при K_{0U} , равном 2 % и 4 % соответственно, показывают, что максимальное ΔT для $K_{0U} = 2\%$ меньше, чем для $K_{0U} = 4\%$, на 60 К. Максимальное ΔT составило для $K_{0U} = 2\%$ $\Delta T = 245$ К, для $K_{0U} = 4\%$ $\Delta T = 305$ К;

- при K_{2U} , равном 2 % и 4 % соответственно, показывают, что максимальное ΔT для $K_{2U} = 2\%$ меньше, чем для $K_{2U} = 4\%$, на 80 К. Максимальное ΔT составило для $K_{2U} = 2\%$ $\Delta T = 265$ К, для $K_{2U} = 4\%$ $\Delta T = 345$ К;

- при $\delta U_{(+)}$, равном 5 % и 10 % соответственно, показывают, что максимальное ΔT для $\delta U_{(+)} = 5\%$ меньше, чем для $\delta U_{(+)} = 10\%$, на 70 К. Максимальное ΔT составило для $\delta U_{(+)} = 5\%$ $\Delta T = 195$ К, для $\delta U_{(+)} = 10\%$ $\Delta T = 265$ К.

Проведенный анализ рис. 13–16 исследованных искажающих факторов свидетельствует о том, что наибольшее влияние K_{2U} оказывает на температурный режим работы электродов. Так, при $K_{2U} = 4\%$ изменение температуры электрода относительно рабочей температуры, равной $T = 1000$ К, составило $\Delta T' = 345$ К.

Графические отображения рис. 16–19, иллюстрирующие изменение температуры электрода из псевдосплава вольфрама, никеля и меди – ВНДС (W + Ni + Cu) плазматрона с магнитно-волновым сканированием переменным током ΔT :

– при K_{0U} , равном 2 % и 4 % соответственно, показывают, что максимальное ΔT для $K_{0U} = 2\%$ меньше, чем для $K_{0U} = 4\%$, на 60 К. Максимальное ΔT составило для $K_{0U} = 2\%$ $\Delta T = 250$ К, для $K_{0U} = 4\%$ $\Delta T = 310$ К;

– при K_{2U} , равном 2 % и 4 % соответственно, показывают, что максимальное ΔT для $K_{2U} = 2\%$ меньше, чем для $K_{2U} = 4\%$, на 80 К. Максимальное ΔT составило для $K_{2U} = 2\%$ $\Delta T = 270$ К, для $K_{2U} = 4\%$ $\Delta T = 350$ К;

– при $\delta U_{(+)}$, равном 5 % и 10 % соответственно, показывают, что максимальное ΔT для $\delta U_{(+)} = 5\%$ меньше, чем для $\delta U_{(+)} = 10\%$, на 70 К. Максимальное ΔT составило для $\delta U_{(+)} = 5\%$ $\Delta T = 200$ К, для $\delta U_{(+)} = 10\%$ $\Delta T = 270$ К.

Проведенный анализ рис. 16–19 исследованных искажающих факторов свидетельствует о том, что наибольшее влияние K_{2U} оказывает на температурный режим работы электрода. Так, при $K_{2U} = 4\%$ изменение температуры электродов относительно рабочей температуры, равной $T = 1000$ К, составило $\Delta T' = 350$ К.

Искажения траекторий приэлектродного участка плазмы подтверждают влияние качества электроэнергии на ресурс электродов плазматрона. Однако для оценки степени влияния ПКЭ необходимо количественно оценить изменения срока службы электродов плазменных установок.

Соответственно, полученные значения изменения температур необходимо соотнести с удельной величиной эрозии электродов плазматрона. Ввиду этого на данном этапе исследования предпочтительно использование графоаналитического метода на основе исследований, полученных авторами в [27]. Результаты исследования графически отображены на рис. 20–22.

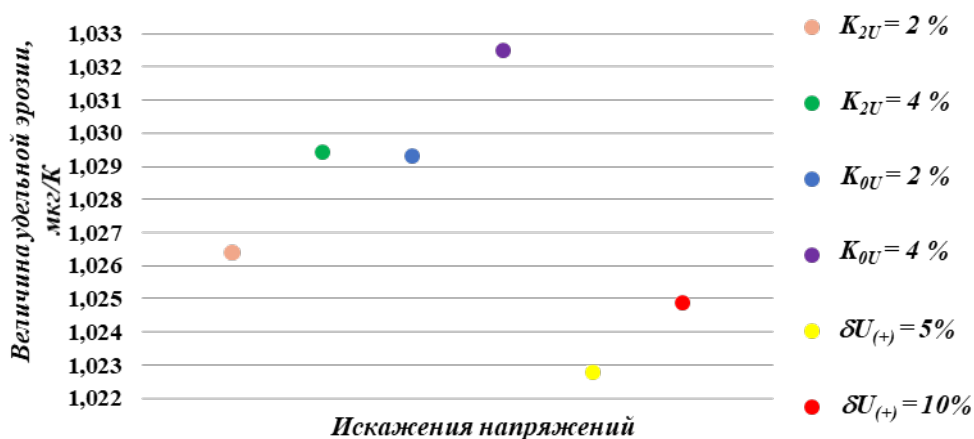


Рис. 20. Величины удельной эрозии электродов плазматрона при различных искажениях напряжения с материалом электрода медь

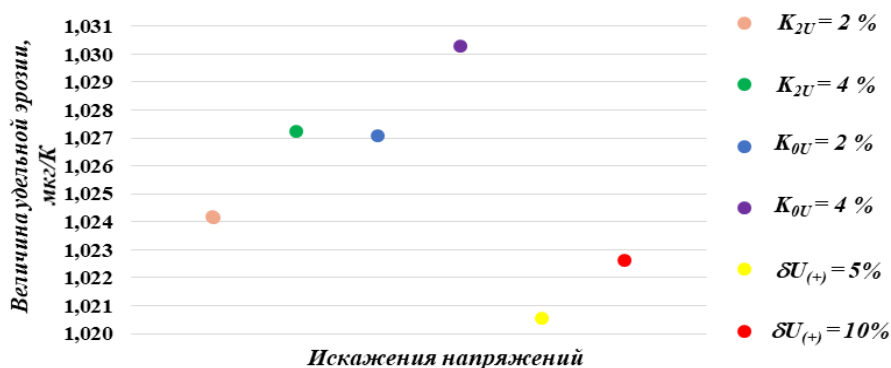


Рис. 21. Величины удельной эрозии электродов плазматрона при различных искажениях напряжения с материалом электрода из псевдосплава молибдена, вольфрама и меди (МВД)

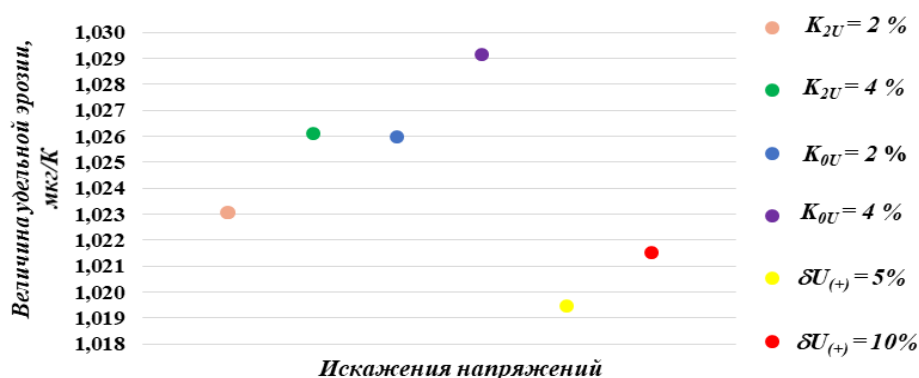


Рис. 22. Величины удельной эрозии электродов плазматрона при различных искажениях напряжения с материалом электрода из псевдосплава вольфрама, никеля и меди (ВНДС)

Анализ изображенных на рис. 20 графических отображений свидетельствует о том, что величина удельной эрозии электрода из меди (Cu) плазматрона с магнитно-волновым сканированием переменным током изменяется при искажении напряжения так:

- при $K_{0U} = 2\%$ удельная эрозия составила $G = 1,0264$ мкг/К, при $K_{0U} = 4\%$ $G = 1,0294$ мкг/К;
- при $K_{2U} = 2\%$ удельная эрозия составила $G = 1,0293$ мкг/К, при $K_{2U} = 4\%$ $G = 1,0325$ мкг/К;
- при $\delta U_{(+)} = 5\%$ удельная эрозия составила $G = 1,0228$ мкг/К, при $\delta U_{(+)} = 10\%$ $G = 1,0249$ мкг/К.

Изображенные на рис. 21 графические отображения показывают, что величина удельной эрозии электрода из псевдосплава молибдена, вольфрама и меди – МВД (Mo + W + Cu) плазматрона с магнитно-волновым сканированием переменным током изменяется при искажении напряжения так:

- при $K_{0U} = 2\%$ удельная эрозия составила $G = 1,0242$ мкг/К, при $K_{0U} = 4\%$ $G = 1,0272$ мкг/К;

– при $K_{2U} = 2\%$ удельная эрозия составила $G = 1,0271$ мкг/К, при $K_{2U} = 4\%$ $G = 1,0303$ мкг/К;

– при $\delta U_{(+)} = 5\%$ удельная эрозия составила $G = 1,0206$ мкг/К, при $\delta U_{(+)} = 10\%$ $G = 1,0226$ мкг/К.

Анализ графических отображений, представленных на рис. 22, показывает, что величина удельной эрозии электрода из псевдосплава вольфрама, никеля и меди – ВНДС (W + Ni + Cu) плазматрона с магнитно-волновым сканированием переменным током изменяется при искажении напряжения так:

– при $K_{0U} = 2\%$ удельная эрозия составила $G = 1,0231$ мкг/К, при $K_{0U} = 4\%$ $G = 1,0261$ мкг/К;

– при $K_{2U} = 2\%$ удельная эрозия составила $G = 1,0260$ мкг/К, при $K_{2U} = 4\%$ $G = 1,0292$ мкг/К;

– при $\delta U_{(+)} = 5\%$ удельная эрозия составила $G = 1,0194$ мкг/К, при $\delta U_{(+)} = 10\%$ $G = 1,0215$ мкг/К.

Сравнение полученных результатов удельной эрозии электродов показало, что наибольшее значение данного параметра отмечено для медного электрода, что обусловлено меньшей термической стойкостью материала.

Как известно, для установок, применяемых для розжига топлива угольных тепловых станций, нормативный срок службы электрода по данным завода-изготовителя составляет 200 ч [26, 27].

На основании формулы (1) определим срок службы электрода при различных искажающих факторах. В качестве примера рассмотрим вариант эксперимента – электрод из меди (Cu) плазматрона при условии $K_{2U} = 4\%$:

$$Z = \frac{8.96 \cdot 3.14 \cdot 1.81 \cdot 7 \cdot 1}{1.0292 \cdot 500} = 193.5 \text{ ч.}$$

Алгоритм вычисления Z аналогичен для остальных вариантов эксперимента. Графические результаты расчета представлены на рис. 23–25.

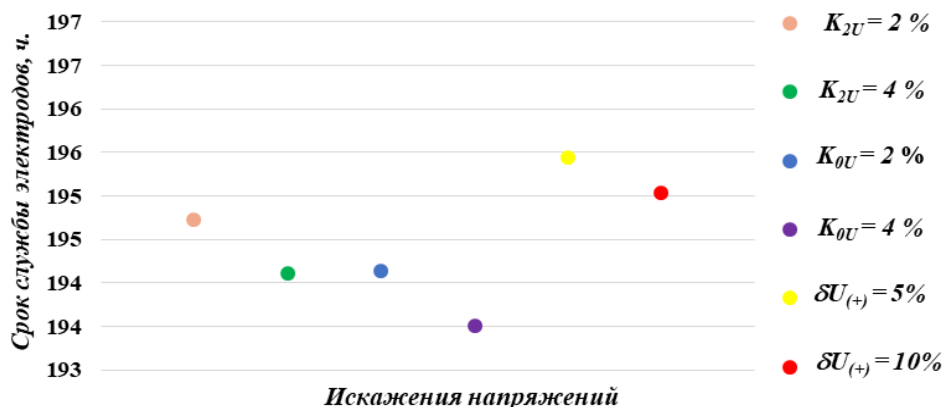


Рис. 23. Изменение срока службы электродов при различных искажениях напряжения плазматрона с материалом электрода медь

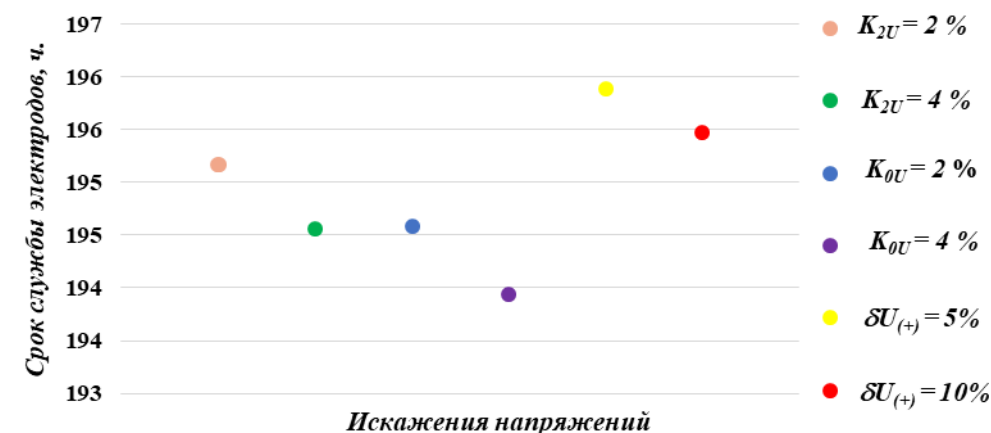


Рис. 24. Изменение срока службы электродов при различных искажениях напряжения плазматрона с материалом электрода из псевдосплава молибдена, вольфрама и меди (МВД)

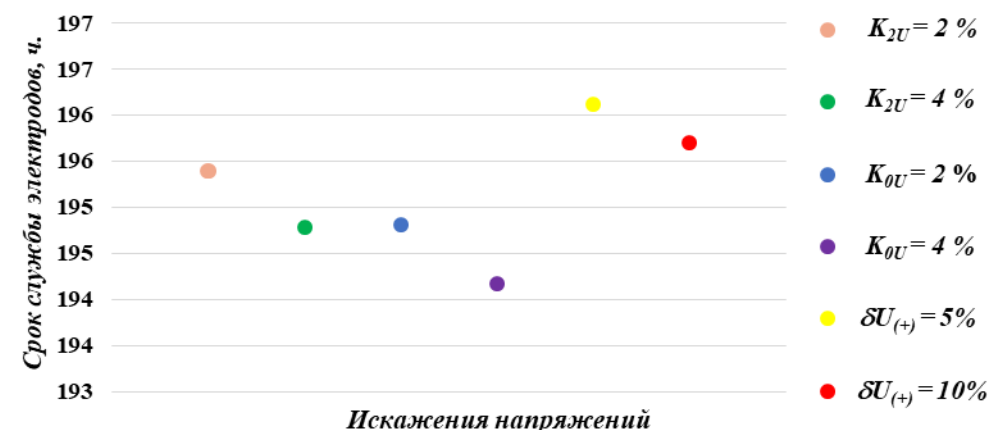


Рис. 25. Изменение срока службы электродов при различных искажениях напряжения плазматрона с материалом электрода из псевдосплава вольфрама, никеля и меди (ВНДС)

Графические отображения, проиллюстрированные на рис. 23, показывают, что срок службы электрода из меди (Cu) плазматрона с магнитно-волновым сканированием переменным током изменился так:

– при $K_{0U} = 2\%$ срок службы составил $Z = 194,6$ ч, при $K_{0U} = 4\%$ $Z = 194,1$ ч. В процентном соотношении изменение срока службы при $K_{0U} = 2\%$ составило $\Delta Z = 2,64\%$, при $K_{0U} = 4\%$ $\Delta Z = 2,94\%$;

– при $K_{2U} = 2\%$ срок службы составил $Z = 194,1$ ч, при $K_{2U} = 4\%$ $Z = 193,5$ ч. В процентном соотношении изменение срока службы при $K_{2U} = 2\%$ составило $\Delta Z = 2,93\%$, при $K_{2U} = 4\%$ $\Delta Z = 3,25\%$;

– при $\delta U_{(+)} = 5\%$ срок службы составил $Z = 195,4$ ч, при $\delta U_{(+)} = 10\%$ $Z = 195$ ч. В процентном соотношении изменение срока службы при $\delta U_{(+)} = 5\%$ составило $\Delta Z = 2,28\%$, при $\delta U_{(+)} = 10\%$ $\Delta Z = 2,49\%$.

Анализ графических отображений, представленных на рис. 24, показывает, что срок службы электрода из псевдосплава молибдена, вольфрама и меди – МВД (Mo + W + Cu) плазматрона с магнитно-волновым сканированием переменным током изменился так:

– при $K_{0U} = 2\%$ срок службы составил $Z = 195,2$ ч, при $K_{0U} = 4\%$, $Z = 194,6$ ч. В процентном соотношении изменение ресурса для $K_{0U} = 2\%$ составило $\Delta Z = 2,42\%$, для $K_{0U} = 4\%$ $\Delta Z = 2,72\%$;

– при $K_{2U} = 2\%$ срок службы составил $Z = 194,6$ ч, при $K_{2U} = 4\%$ $Z = 193,9$ ч. В процентном соотношении изменение срока службы для $K_{2U} = 2\%$ составило $\Delta Z = 2,71\%$, для $K_{2U} = 4\%$ $\Delta Z = 3,03\%$;

– при $\delta U_{(+)} = 5\%$ срок службы составил $Z = 195,9$ ч при $\delta U_{(+)} = 10\%$ $Z = 195,5$ ч. В процентном соотношении изменение ресурса для $\delta U_{(+)} = 5\%$ составило $\Delta Z = 2,06\%$, для $\delta U_{(+)} = 10\%$ $\Delta Z = 2,26\%$.

Анализируя изображенные на рис. 25 графические отображения, отметим, что срок службы электрода из псевдосплава вольфрама, никеля и меди – ВНДС (W + Ni + Cu) плазматрона с магнитно-волновым сканированием переменным током изменился так:

– при $K_{0U} = 2\%$ срок службы составил $Z = 195,4$ ч, при $K_{0U} = 4\%$ $Z = 194,8$ ч. В процентном соотношении изменение срока службы при $K_{0U} = 2\%$ составило $\Delta Z = 2,31\%$, при $K_{0U} = 4\%$ $\Delta Z = 2,61\%$;

– при $K_{2U} = 2\%$ срок службы составил $Z = 194,8$ ч, при $K_{2U} = 4\%$ $Z = 194,2$ ч. В процентном соотношении изменение срока службы при $K_{2U} = 2\%$ составило $\Delta Z = 2,6\%$, при $K_{2U} = 4\%$ $\Delta Z = 2,92\%$;

– при $\delta U_{(+)} = 5\%$ срок службы составил $Z = 196,1$ ч, при $\delta U_{(+)} = 10\%$ $Z = 195,7$ ч. В процентном соотношении изменение срока службы при $\delta U_{(+)} = 5\%$ составило $\Delta Z = 1,94\%$, при $\delta U_{(+)} = 10\%$ $\Delta Z = 2,15\%$.

Проведенные исследования доказали влияние искажения напряжений на срок службы электродов плазменных установок при использовании магнитно-волнового сканирования. Установлено, что максимальная величина изменения срока службы наблюдается для электрода с материалом изготовления – медь при $K_{2U} = 4\%$ и составляет $\Delta Z = 3,25\%$.

Заключение

1. Выявлено влияние искажения напряжений на эксплуатацию электродов плазменных установок, использующих перемещение приэлектродного участка плазмы магнитно-волновым сканированием. Так, максимальные величины изменения сроков службы электродов при $K_{2U} = 4\%$ составляют: с материалом изготовления электродов из меди $\Delta Z = 3,25\%$; с материалом изготовления электро-

дов из псевдосплава молибдена, вольфрама и меди $\Delta Z = 3,03\%$; с материалом изготовления электродов из псевдосплава вольфрама, никеля и меди $\Delta Z = 2,92\%$. Максимальные величины изменения сроков службы при $K_{0U} = 4\%$ составляют: с материалом изготовления электродов из меди $\Delta Z = 2,94\%$; с материалом изготовления электродов из псевдосплава молибдена, вольфрама и меди $\Delta Z = 2,72\%$; с материалом изготовления электродов из псевдосплава вольфрама, никеля и меди $\Delta Z = 2,61\%$. Максимальные величины изменения сроков службы при $\delta U_{(+)} = 10\%$ составляют: с материалом изготовления электродов из меди $\Delta Z = 2,49\%$; с материалом изготовления электродов из псевдосплава молибдена, вольфрама и меди $\Delta Z = 2,26\%$; с материалом изготовления электродов из псевдосплава вольфрама, никеля и меди $\Delta Z = 2,15\%$.

2. Показана количественная взаимосвязь величин удельной эрозии электродов плазматрона с его сроком службы для различных материалов электродов. Так, для медного электрода при $\delta U_{(+)} = 5\%$ удельная эрозия составила $G = 1,0228$ мкг/К, срок службы $Z = 195,4$ ч; при $\delta U_{(+)} = 10\%$ $G = 1,0249$ мкг/К, $Z = 195$ ч; при $K_{0U} = 2\%$ $G = 1,0264$ мкг/К, $Z = 194,6$ ч; при $K_{0U} = 4\%$ $G = 1,0294$ мкг/К, $Z = 194,1$ ч; при $K_{2U} = 2\%$ $G = 1,0293$ мкг/К, $Z = 194,1$ ч; при $K_{2U} = 4\%$ $G = 1,0325$ мкг/К, $Z = 193,5$ ч; для электрода из псевдосплава молибдена, вольфрама и меди $\delta U_{(+)} = 5\%$ удельная эрозия составила $G = 1,0206$ мкг/К, срок службы $Z = 195,9$ ч; при $\delta U_{(+)} = 10\%$ $G = 1,0226$ мкг/К, $Z = 195,5$ ч; при $K_{0U} = 2\%$ $G = 1,0242$ мкг/К, $Z = 195,2$ ч; при $K_{0U} = 4\%$ $G = 1,0272$ мкг/К, $Z = 194,6$ ч; при $K_{2U} = 2\%$ $G = 1,0271$ мкг/К, $Z = 194,6$ ч; при $K_{2U} = 4\%$ $G = 1,0303$ мкг/К, $Z = 193,9$ ч; для электрода из псевдосплава вольфрама, никеля и меди $\delta U_{(+)} = 5\%$ удельная эрозия составила $G = 1,0194$ мкг/К, срок службы $Z = 196,1$ ч; при $\delta U_{(+)} = 10\%$ $G = 1,0215$ мкг/К, $Z = 195,7$ ч; при $K_{0U} = 2\%$ $G = 1,0231$ мкг/К, $Z = 195,4$ ч; при $K_{0U} = 4\%$ $G = 1,0261$ мкг/К, $Z = 194,8$ ч; при $K_{2U} = 2\%$ $G = 1,0260$ мкг/К, $Z = 194,8$ ч; при $K_{2U} = 4\%$ $G = 1,0292$ мкг/К, $Z = 194,2$ ч.

Стоит отметить, что несмотря на более высокую величину эрозии отклонение температуры для медного электрода – наименьшее, что говорит о лучшей теплопроводности и соответственно лучшем охлаждении электродов из данного материала.

3. Оценено влияние различных искажающих факторов, при этом выявлен показатель качества электрической энергии – K_{2U} , имеющий наибольшее воздействие на изменение ресурса электрода и, соответственно, на срок службы плазматрона в целом. Минимальный срок службы электродов плазменных систем при $K_{2U} = 4\%$ для материала электродов из меди составил $Z = 193,5$ ч; для материала электродов из псевдосплава молибдена, вольфрама и меди $Z = 193,9$ ч; для материала электродов из псевдосплава вольфрама, никеля и меди $Z = 194,2$ ч.

4. Исследованы разные материалы, применяемые при изготовлении электродов плазменных систем, определен материал с наименьшей величиной измене-

ния ресурса электрода в результате воздействия искажающих факторов. Выявлено, что материал электрода из псевдосплава вольфрама, никеля и меди показал наибольшую стойкость к термическому воздействию и, соответственно, к искажению напряжения.

5. Согласно проведенным исследованиям, величина отклонения температуры электрода от рабочей не должна превышать 200 К, что, в свою очередь, позволит лимитировать изменение срока службы электродов и поддерживать техническое состояние плазменных систем термохимической подготовки топлива при одновременном воздействии нескольких искажающих факторов.

6. Установлено, что качество электрической энергии оказывает влияние на срок службы плазменных установок с магнитно-волновым сканированием плазмы. Величина отдельного воздействия невелика, однако при одновременном влиянии нескольких факторов снижение ресурса плазматрона может достичь ощутимых значений. Следовательно, при установке плазменных систем в местах с некачественной электрической энергией необходима разработка технических мероприятий по нормализации параметров напряжения.

7. Эффективная и стабильная работа плазменных систем термохимической подготовки топлива зависит от условий их эксплуатации; в связи с этим внедрение технических воздействий, направленных на поддержание технического состояния путем коррекции искажений напряжения, способствует их длительной работе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Коверникова Л.И., Шамонов Р.Г., Суднова В.В.* Качество электрической энергии, современное состояние, проблемы, предложения по их решению / Отв. ред. Н.И. Воропай. Новосибирск: Наука, 2017. 219 с.
2. *Zapanov O.V., Kovernikova L.I.* On the power quality of electrical energy supplied to joint stock company «Aleksandrovsky mine» // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 209. 07012. 6 p.
3. *Вазин Г.Я., Куликов А.Л.* Качество электрической энергии в системах электроснабжения. Анализ состояния методов нормирования и контроля // Электрические станции. 2019. № 6 (1055). С. 54–59. doi: 10.34831/EP.2019.1055.44184.
4. *Romanova V.V., Suslov K.V., Khromov S.V.* Ensuring the reliability of power supply systems by improving the quality of electrical energy // AIP Conference Proceedings. 2023. Vol. 2552 (070017). 7 p. doi: 10.1063/5.0117210.
5. *Nagata E., Ferreira D., Bollen M., et al.* Real-Time Voltage Sag Detection and Classification for Power Quality Diagnostics. Measurement. 2020. Vol. 164 (4). 15 p. doi: 10.1016/j.measurement.2020.108097.
6. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. 19 с.
7. *Михайлов В.Е., Колпаков С.П., Хоменок Л.А., Шестаков Н.С.* О перспективе внедрения систем плазменного розжига на энергетических котлах // Надежность и безопасность энергетики. 2019. Т. 12. № 1. С. 22–28. doi: 10.24223/1999-5555-2019-12-1-22-28.
8. *Моссэ А., Савчин В.* Плазменные технологии использования топливно-энергетического сырья // Наука и инновации. 2018. № 5 (183). С. 67–71.
9. *Карпенко Е.И., Устименко А.Б.* Плазменные методы повышения эффективности использования твердых топлив // Вестник Казахского национального университета. Сер.: Физическая. 2020. № 4 (75). С. 72–85. doi: 10.26577/RCPH. 2020.v75. i4.08.
10. *Мухаева Д.В., Карпенко Е.И., Ринчинов А.П.* Плазмотрон с высокоресурсным катодом // Вестник Бурятского государственного университета. Химия. Физика. 2019. № 2–3. С. 20–26. doi: 10.18101/2306-2363-2019-2-3-20-26.

11. Гришина И.А., Иванов В.А. Состояние и перспективы развития исследований по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу // Физика плазмы. 2020. Т. 46. № 12. С. 1143–1152. doi: 10.31857/S0367292120120033.
12. Никулин Р.Г., Щицын Ю.Д., Казанцев А.В., Никулина С.Г. Эффективность использования двухкамерных плазмотронов для плазменной поверхностной термической обработки // Химия. Экология. Урбанистика. 2020. Т. 1. С. 439–443.
13. Гайдаш Н.М., Иванов Н.С. Использование низкотемпературной плазмы для производства электроэнергии // Энергетическая безопасность. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2020. С. 366–371.
14. Аньшаков А.С., Урбах Э.К., Чередниченко В.С., Кузьмин М.Г., Урбах А.Э. Исследование генератора термической плазмы технологического назначения // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22. № 6. С. 805–808.
15. Сафронов А.А., Кузнецов В.Е., Васильева О.Б., Дудник Ю.Д., Ширяев В.Н. Плазмотроны переменного тока. Системы инициирования дуги. Особенности конструкции и применения // Приборы и техника эксперимента. 2019. № 2. С. 58–66.
16. Жуков М.Ф., Засыпкин И.М., Тимошевский А.Н., Михайлов Б.И., Десятков Г.А. Генераторы электродуговой термической плазмы. Новосибирск: Наука, 1999. 712 с.
17. Safronov A.A., Kuznetsov V.E., Dudnik Y.D., Shiryayev V.N., Vasilieva O.B., Kovshechikov V.B. Study of the electrode erosion in powerful, single-chamber, three-phase alternating-current plasma torches // High Temperature. 2021. Т. 59. № 2. Pp. 162–168. doi: 10.31857/S004036442103011.
18. Сафронов А.А., Кузнецов В.Е., Дудник Ю.Д., Ширяев В.Н., Васильева О.Б., Ковшечников В.Б. Исследование эрозии электродов в мощных однокамерных трехфазных плазмотронах переменного тока // Теплофизика высоких температур. 2021. Т. 59. Вып. 3. С. 330–336.
19. Щицын Ю.Д., Овчинников И.П. Исследование скорости эрозии кольцевых катодов плазматрона // Электрофизические методы обработки в современной промышленности. Материалы IV Международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2021. С. 317–320.
20. Kuznetsov V.E., Safronov A.A., Shiryayev V.N., Vasilieva O.B., Pavlov A.V., Dudnik Y.D., Kuchina Y.A. Application Field and Ways to Control ac Plasma Torch with Rail Electrodes // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. Vol. 946. № 1. P. 12166. doi: 10.1088/1742-6596/946/1/012166.
21. Dudnik Yu.D., Borovskoy A.M., Shiryayev V.N., Safronov A.A., Kuznetsov V.E., Vasilieva O.B., Pavlov A.V., Ivanov D.V. Plasma Injector for a Three-phase Plasma Torch with Rail Electrodes and Some Results of Its Investigation // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. Vol. 946. № 1. Pp. 012167. doi: 10.1088/1742-6596/946/1/012167.
22. Михайлов Б.И. Сканирование дуговым пятном трубчатых электродов в газовыхревых плазмотронах // Теплофизика и аэромеханика. 2008. Т. 15. № 2. С. 336–338.
23. Дутова О.С. Термохимические процессы в материале электрода плазматрона: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.14. Новосибирск: Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 2012. 102 с.
24. Овчинников И.П., Щицын Ю.Д. Исследование переноса продуктов эрозии кольцевых катодов плазматрона // Химия. Экология. Урбанистика. 2021. Т. 1. С. 314–318.
25. ANSYS Maxwell [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-maxwell> (дата обращения 16.05.2024).
26. Кошлаков В.В., Ребров С.Г., Голиков А.Н., Федоров И.А. Ресурсные характеристики плазматрона переменного тока «Звезда» // Прикладная физика. 2021. № 4. С. 32–39. doi: 10.51368/1996-0948-2021-4-32-39.
27. Будин А.В., Коликов В.А., Рутберг Ф.Г. Влияние величины тока и температуры рабочего газа на эрозию электродов разрядной камеры мощных импульсных плазмотронов // Журнал технической физики. 2007. Т. 77. № 8. С. 49–53.

Статья поступила в редакцию 16 июня 2024 г

INFLUENCE OF THE QUALITY OF ELECTRICAL ENERGY ON THE OPERATION OF THE MAIN ELEMENTS OF ELECTRIC ARC PLASMA SYSTEMS FOR THERMOCHEMICAL FUEL PREPARATION

V.V. Romanova^{1,2}, A.G. Batukhtin¹, S.V. Khromov¹, K.V. Suslov³

¹ Trans-Baikal State University
30, Alexandro-Zavodskaya st., Chita, 672039, Russian Federation

² Branch of the National Research University
«Moscow Power Engineering Institute» in Volzhsky
69, im. Lenin pr., Volzhsky, 404110, Russian Federation

³ National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
17, Krasnokazarmennaya st., Moscow, 111250, Russian Federation

E-mail: romanova181@mail.ru, batukhtina_ir@mail.ru, sergeixrom@inbox.ru, souslov@istu.edu

Abstract. *The work is devoted to the study of the influence of the quality of electrical energy on the service life of electrodes of plasma thermochemical fuel treatment systems used in thermal power plants running on coal fuel. The issues of moving the near-electrode plasma section using magnetic wave scanning are discussed in detail. The ANSYS Maxwell software was used as the main research tool. The computer simulation was performed with the following main experimental parameters: the coefficient of asymmetry in the zero sequence (K_{0U}) is 2% and 4%; the coefficient of asymmetry in the negative sequence (K_{2U}) is 2% and 4%; the voltage deviation $\delta U_{(+)}$ is 5% and 10%; the materials used for manufacturing electrodes: copper (Cu), a pseudo-alloy of tungsten, nickel and copper – (W + Ni + Cu), a pseudo-alloy of molybdenum, tungsten and copper – (Mo + W + Cu). Based on the obtained simulation results, graphical representations of changes in the trajectories of the near-electrode plasma section under various distorting factors, dependences of changes in the values of specific erosion of various electrode materials, graphical dependences of changes in the service life of electrodes of plasma systems are constructed. The studies performed using computer modeling based on the ANSYS Maxwell software product made it possible to quantify the effect of voltage distortions on the trajectory of the near-electrode plasma section and, consequently, the service life of the plasmatron electrodes. In particular, in the course of the study, a detailed assessment and analysis of the degree of influence of the following indicators of electrical energy quality was performed: the coefficients of asymmetry in the negative and zero sequence, voltage deviations on the operation and technical condition of the electrodes of plasma systems. The results of the study were discussed, and recommendations were formulated for the use of plasma thermochemical fuel preparation systems used at thermal power plants to ignite the fuel of pulverized coal boilers.*

Keywords: *computer modeling in ANSYS Maxwell software, quality of electrical energy, plasma systems for thermochemical preparation of fuel, near-electrode plasma section, magnetic wave scanning, service life of plasma system electrodes.*

¹ Victoria V. Romanova (PhD (Techn.)), Associate Professor.
Andrey G. Batukhtin (Dr. Sci. (Techn.)), Associate Professor.
Sergey V. Khromov Senior Lecturer.
Konstantin V. Suslov (Dr. Sci. (Techn.)), Associate Professor.

REFERENCES

1. *Kovernikova L.I., Shamonov R.G., Sudnova V.V.* Kachestvo elektricheskoy energii, sovremennoe sostoyaniye, problemy, predlozheniya po ih resheniyu [The quality of electrical energy, the current state, problems, proposals for their solution]. Novosibirsk: Nauka, 2017. 219 p. (In Russian).
2. *Zapanov O.V., Kovernikova L.I.* On the power quality of electrical energy supplied to joint stock company «Aleksandrovsky mine» // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 209. 07012. 6 p.
3. *Vagin G.Ya., Kulikov A.L.* Kachestvo elektricheskoy energii v sistemah elektrosnabzheniya. Analiz sostoyaniya metodov normirovaniya i kontrolya [The quality of electrical energy in power supply systems. Analysis of the state of rationing and control methods] // Elektricheskie stancii. 2019. № 6 (1055). Pp. 54–59. doi: 10.34831/EP.2019.1055.44184. (In Russian).
4. *Romanova V.V., Suslov K.V., Khromov S.V.* Ensuring the reliability of power supply systems by improving the quality of electrical energy // AIP Conference Proceedings. 2023. Vol. 2552 (070017). 7 p. doi: 10.1063/5.0117210.
5. *Nagata E., Ferreira D., Bollen M., et al.* Real-Time Voltage Sag Detection and Classification for Power Quality Diagnostics. Measurement. 2020. Vol. 164 (4). 15 p. doi: 10.1016/j.measurement.2020.108097.
6. GOST 32144–2013. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemah elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya [Electrical energy. Compatibility of technical means is electromagnetic. Standards for the quality of electrical energy in general-purpose power supply systems]. M.: Standartinform, 2014. 19 p.
7. *Mihajlov V.E., Kolpakov S.P., Homenok L.A., Shestakov N.S.* O perspektive vnedreniya sistem plazmennogo rozzhiga na energeticheskikh kotlah [On the prospect of introducing plasma ignition systems on power boilers] // Nadozhdnost' i bezopasnost energetiki. 2019. T. 12. № 1. Pp. 22–28. doi: 10.24223/1999-5555-2019-12-1-22-28. (In Russian).
8. *Mosse A., Savchin V.* Plazmennye tekhnologii ispolzovaniya toplivno-energeticheskogo syrya [Plasma technologies for the use of fuel and energy raw materials] // Nauka i innovacii. 2018. № 5 (183). Pp. 67–71. (In Russian).
9. *Karpenko E.I., Ustimenko A.B.* Plazmennye metody povysheniya effektivnosti ispolzovaniya tverdykh topliv [Plasma methods for increasing the efficiency of solid fuels use] // Vestnik Kazhskogo nacionalnogo universiteta. Seriya fizicheskaya. 2020. № 4 (75). Pp. 72–85. doi: 10.26577/RCPh. 2020.v75. i4.08. (In Russian).
10. *Muhaeva D.V., Karpenko E.I., Rinchinov A.P.* Plazmotron s vysokoresursnym katodom [Plasmatron with a high-resource cathode] // Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta. Himiya. Fizika. 2019. № 2–3. Pp. 20–26. doi: 10.18101/2306-2363-2019-2-3-20-26. (In Russian).
11. *Grishina I.A., Ivanov V.A.* Sostoyaniye i perspektivy razvitiya issledovaniy po fizike plazmy i upravlyayemomu termoyadernomu sintezu [The state and prospects of development of research on plasma physics and controlled thermonuclear fusion] // Fizika plazmy. 2020. Vol. 46. № 12. Pp. 1143–1152. doi: 10.31857/S0367292120120033. (In Russian).
12. *Nikulin R.G., Shchicyn Yu.D., Kazancev A.V., Nikulina S.G.* Effektivnost ispolzovaniya dvukhamernykh plazmotronov dlya plazmennoj poverhnostnoj termicheskoy obrabotki [Efficiency of using two-chamber plasma torches for plasma surface heat treatment] // Himiya. Ekologiya. Urbanistika. 2020. V. 1. Pp. 439–443. (In Russian).
13. *Gajdash N.M., Ivanov N.S.* Ispolzovanie nizkotemperaturnoy plazmy dlya proizvodstva elektroenergii [The use of low-temperature plasma for power generation] // Energeticheskaya bezopasnost. Kursk: Yugo-Zapadnyj gosudarstvennyj universitet, 2020. Pp. 366–371. (In Russian).
14. *Anshakov A.S., Urbah E.K., Cherednichenko V.S., Kuzmin M.G., Urbah A.E.* Issledovanie generatora termicheskoy plazmy tekhnologicheskogo naznacheniya [Investigation of a thermal plasma generator for technological purposes] // Teplofizika i aeromehanika. 2015. V. 22. № 6. Pp. 805–808. (In Russian).
15. *Safronov A.A., Kuznecov V.E., Vasileva O.B., Dudnik Yu.D., Shiryayev V.N.* Plazmotrony peregibnogo toka. Sistemy iniciirovaniya dugi. Osobennosti konstrukcii i primeneniya [Plasma torches of alternating current. Arc initiation systems. Design and application features] // Pri-bory i tekhnika eksperimenta. 2019. № 2. Pp. 58–66. (In Russian).

16. Zhukov M.F., Zasyupkin I.M., Timoshevsky A.N., Mikhailov B.I., Tens G.A. Generatory elektrodugovoj termicheskoj plazmy [Generators of electric arc thermal plasma]. Novosibirsk: Nauka, 1999. 712 p. (In Russian).
17. Safronov A.A., Kuznetsov V.E., Dudnik Y.D., Shiryayev V.N., Vasilieva O.B., Kovshechikov V.B. Study of the electrode erosion in powerful, single-chamber, three-phase alternating-current plasma torches // High Temperature. 2021. T. 59. № 2. Pp. 162–168. doi: 10.31857/S004036442103011.
18. Safronov A.A., Kuznetsov V.E., Dudnik Yu.D., Shiryayev V.N., Vasil'eva O.B., Kovshechikov V.B. Issledovanie erozii elektrodov v moshchnykh odnokamernykh tryohfaznykh plazmotronah peremennogo toka [Investigation of electrode erosion in high-power single-chamber three-phase alternating current plasma torches] // Teplofizika vysokih temperatur. 2021. Vol. 59. Vyp. 3. Pp. 330–336. (In Russian).
19. Shchicyn Yu.D., Ovchinnikov I.P. Issledovanie skorosti erozii kol'cevyykh katodov plazmatrona [Investigation of the erosion rate of ring cathodes of a plasmatron] // Elektrofizicheskie metody obrabotki v sovremennoj promyshlennosti. Materialy IV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov. Perm': Permskij nacional'nyj issledovatel'skij politekhnicheskij universitet, 2021. Pp. 317–320. (In Russian).
20. Kuznetsov V.E., Safronov A.A., Shiryayev V.N., Vasilieva O.B., Pavlov A.V., Dudnik Y.D., Kuchina Y.A. Application Field and Ways to Control ac Plasma Torch with Rail Electrodes // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. Vol. 946. № 1. Pp. 12166. doi: 10.1088/1742-6596/946/1/012166.
21. Dudnik Yu.D., Borovskoy A.M., Shiryayev V.N., Safronov A.A., Kuznetsov V.E., Vasilieva O.B., Pavlov A.V., Ivanov D.V. Plasma Injector for a Three-phase Plasma Torch with Rail Electrodes and Some Results of Its Investigation // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. Vol. 946. № 1. Pp. 012167. doi: 10.1088/1742-6596/946/1/012167.
22. Mihajlov B.I. Skanirovanie dugovym pyatnom trubchatykh elektrodov v gazovihrevykh plazmotronah [Arc spot scanning of tubular electrodes in gas-vortex plasma torches] // Teplofizika i aeromekhanika. 2008. V. 15. № 2. Pp. 336–338. (In Russian).
23. Dutova O.S. Termohimicheskie processy v materiale elektroda plazmotrona: dis. kand. fiz.-mat. nauk: 01.04.14. Novosibirsk: Institut teplofiziki im. S.S. Kutateladze SO RAN, 2012. 102 p. (In Russian).
24. Ovchinnikov I.P., Shchicyn Yu.D. Issledovanie perenosa produktov erozii kolcevyykh katodov plazmotrona [Investigation of the transfer of erosion products of annular cathodes of a plasma torch] // Himiya. Ekologiya. Urbanistika. 2021. Vol. 1. Pp. 314–318. (In Russian).
25. ANSYS Maxwell [ANSYS Maxwell]. <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-maxwell> (accessed May 16, 2024).
26. Koshlakov V.V., Rebrov S.G., Golikov A.N., Fedorov I.A. Resursnye harakteristiki plazmotrona peremennogo toka «Zvezda» [Resource characteristics of the alternating current plasma torch «Zvezda»] // Prikladnaya fizika. 2021. № 4. Pp. 32–39. doi: 10.51368/1996-0948-2021-4-32-39. (In Russian).
27. Budin A.V., Kolikov V.A., Rutberg F.G. Vliyanie velichiny toka i temperatury rabocheho gaza na eroziyu elektrodov razryadnoj kamery moshchnykh impulsnykh plazmotronov [Influence of the current and temperature of the working gas on the erosion of the electrodes of the discharge chamber of high-power pulsed plasma torches] // Zhurnal tekhnicheskoy fiziki. 2007. Vol. 77. № 8. Pp. 49–53. (In Russian).