

Научная статья

УДК 621.791:669.056.9

DOI: 10.26730/1816-4528-2025-6-75-86

Окулов Роман Александрович^{1,2,*}, Коновалова Екатерина Сергеевна²¹ Институт металлургии имени академика Н. А. Ватолина Уральского отделения РАН² Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

* для корреспонденции: okulov.roman@gmail.com

**ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ СТЕНКИ АНОДА ПЛАЗМОТРОНА
НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕПЛОСЪЕМА СИСТЕМЫ ВОДНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ****Информация о статье**

Поступила:

27 октября 2025 г.

Одобрена после

рецензирования:

14 ноября 2025 г.

Принята к печати:

15 ноября 2025 г.

Опубликована:

18 декабря 2025 г.

Ключевые слова:

плазмотрон; анодный узел;
теплопередача; система вод-
ного охлаждения; толщина
стенки; метод конечных эле-
ментов; горное оборудование

Аннотация.

Плазмотроны широко применяются в горнодобывающей промышленности, например, при нанесении функциональных покрытий на поверхности узлов деталей оборудования: буровой инструмент, детали дробильных установок и ролики лент конвейеров. Плазмотроны также применяют для модификации поверхностей, что особо важно при осуществлении ремонтно-восстановительных работ деталей. В состав плазменной установки включен узел охлаждения, от эффективности работы которого зависит время его работы. В производственной практике важно обеспечить бесперебойную работу плазменного оборудования. В статье рассмотрена система водного охлаждения установки МАК-6,5 – плазмотрон косвенного действия, который предназначен для модификации поверхности деталей и нанесения на них функциональных покрытий. Цель работы – изучение влияния толщины стенки цилиндрической части анодного узла плазмотрона на температуру жидкости на выходе из системы водного охлаждения. Создана компьютерная модель плазменной установки, адекватно описывающей реальный процесс. Исследование выполнено при помощи метода конечных элементов. В качестве пакета, реализующего метод конечных элементов, применили SolidWorks Flow Simulation. Результаты компьютерного эксперимента были верифицированы проведением натурного. Сравнительный анализ показал удовлетворительную сходимость. Были рассмотрены семь вариантов геометрии анода с толщиной стенки в диапазоне от 2,0 до 8,0 мм с шагом 1 мм. Метод конечных элементов соответствует фундаментальным законами теплопередачи (Фурье, Ньютона-Рихмана, Стефана-Больцмана) и уравнения сохранения. Научная новизна проведенного исследования заключается в определении рационального значения толщины стенки анодного узла МАК-6,5, обеспечивающей наиболее эффективный теплосъем системы водного охлаждения, предотвращение образования воздушно-паровой зоны, прогар стенки анода. В результате проведенного исследования разработаны рекомендации для производителей и потребителей плазмотронного оборудования по выбору стенки анодного узла. Представленные в статье выводы имеют практическую пользу при совершенствовании плазменного оборудования, используемого на горнодобывающих предприятиях.

Для цитирования: Окулов Р.А., Коновалова Е.С. Влияние толщины стенки анода плазмотрона на эффективность теплосъема системы водного охлаждения // Горное оборудование и электромеханика. 2025. № 6 (182). С. 75-86. DOI: 10.26730/1816-4528-2025-6-75-86, EDN: XWXHDM

Благодарности: Работа выполнена в рамках НИОКР по теме «Развитие научных основ разработки новых многокомпонентных сплавов, композитов и покрытий, их получения из металлических расплавов, субмикронных порошков и техногенного сырья интенсивными термическими методами» (код темы в ЕГИСУ НИОКР – FUMR-2025-0006)..

Введение (Introduction)

Современные тенденции роста потребления ресурсов, вызванные увеличением численности населения и научно-техническим прогрессом, диктуют

необходимость наращивания производственных мощностей и при этом создания более высокоэффективных установок, одним из конструктивных

решений которых является уменьшение потребности в теплосъеме.

Эффективность работы горнодобывающего оборудования напрямую влияет на экономические показатели предприятий. В условиях интенсивной эксплуатации происходит быстрое изнашивание рабочих органов машин, что требует разработки новых методов повышения их износостойкости. Одним из перспективных направлений является использование плазменных технологий для упрочнения поверхностей.

В горнодобывающей отрасли экстремальные условия эксплуатации приводят к интенсивному износу оборудования. Применение плазменных технологий для наплавки и нанесения защитных покрытий позволяет значительно увеличить межремонтный ресурс дорогостоящих узлов, таких как ковши экскаваторов, зубья драглайнов и ролики конвейеров [1]. Это делает исследования в области повышения эффективности и надежности плазмотронов особенно актуальными для горной промышленности. Применение аддитивных технологий сейчас набирает все большую популярность в производственной практике, включая ремонт и модификацию деталей горного оборудования [2].

Современные тенденции в развитии плазменных технологий показывают, что повышение энергоэффективности плазмотронов является ключевым фактором их успешного применения в промышленных условиях. Особое внимание уделяется оптимизации тепловых режимов работы, поскольку именно тепловые нагрузки часто ограничивают производительность и срок службы оборудования.

Использование новых технологий и разработка новых конструкторских решений являются ключом к созданию нового энергоэффективного оборудования и применения новых высокопрочных, жаростойких материалов для химической и энергетической, ракетно-космической и авиационной и других отраслей экономики [3, 4]. Для горнодобывающей техники это напрямую связано с повышением стойкости к абразивному износу и ударным нагрузкам [5]. Увеличение нагрузок на существующее технологическое оборудование и обрабатывающие инструменты приводит к значительным экономическим потерям на техобслуживание и ускоренному износу, это требует новых конструктивных подходов, направленных на снижение генерируемых тепловых потоков и упрощение их диссипации [6].

Плазменный метод для изменения свойств и структуры материалов находит широкое применение при сварке тонколистового материала, тугоплавких металлов, при сварке металлов с неметаллами, для наплавки и нанесения покрытий, пайки, разделительной резки и поверхностной обработки различных материалов [7, 8]. Плазменно-дуговые процессы, используемые для наплавки, характеризуются исключительно высокими удельными тепловыми потоками, достигающими $10^8 - 10^9$ Вт/м², что предъявляет экстремальные требования к системе охлаждения. В условиях горнодобывающего предприятия, где циклы восстановления крупногабаритных деталей могут быть продолжительными,

стойкость плазмотрона к тепловым нагрузкам становится ключевым фактором, определяющим его производительность и экономическую эффективность. В контексте горного дела плазменная наплавка является ключевым процессом для восстановления геометрии и придания износостойких свойств таким деталям, как валки дробилок и лопасти насосов [9].

Важным аспектом при использовании плазмотронов в горнодобывающей промышленности является обеспечение стабильности технологического процесса. Колебания теплового режима могут привести к неоднородности наплавляемого покрытия, что снижает качество восстановления деталей. Поэтому исследования, направленные на оптимизацию тепловых характеристик плазмотронов, имеют не только научное, но и важное практическое значение.

Аддитивные технологии в настоящее время позволяют производить широкий спектр изделий из различных материалов, таких как металл или пластик [10]. Преимуществами плазмотрона являются: возможность получения высоких температурных показателей, которых тяжело достичь при использовании обычного топлива, простота управления и регулировки (настройка мощности, параметров пуска и остановки), высокая степень надежности и компактные размеры [11-13]. Эти характеристики особенно важны непосредственно на горнодобывающих предприятиях.

Для повышения качества материалов аддитивного производства получаемых плазменным распылением и эффективности использования плазмотрона исследуют характеристики электрической дуги [14], параметры плазменного потока [15], различные механизмы распыления [16], применение постоянного и переменного тока [17, 18], разработку энергоэффективных материалов как для элементов плазмотрона, так и самих порошков [19], но ключевое значение имеет конструкция устройства [20, 21].

Стенки дуговой камеры находятся под воздействием больших тепловых потоков, и поэтому успешное решение задачи повышения эффективности работы плазмотронов связано с изучением теплообмена дуги со стенками и стенок с охлаждающей средой. Традиционно оптимизация конструкции плазмотронов фокусировалась на геометрии газодинамических каналов и материале электродов. Однако, как показывают последние исследования, именно тепловой режим анодного узла, являющегося основным акцептором тепла от плазменной дуги, зачастую лимитирует общий ресурс установки. Высокие плотности энергии и температуры плазмы, скорости выхода плазмы создают экстремальные тепловые нагрузки на элементы плазмотрона. Эффективный отвод тепла от анода не только предотвращает его преждевременное разрушение за счет эрозии и плавления, но и обеспечивает стабильность параметров плазменной струи, что напрямую влияет на качество формируемого покрытия. При водяной стабилизации можно достигнуть наиболее высокой степени сжатия и темпера-

туры столба дуги. Надежный теплосъем важен для обеспечения стабильности процесса наплавки при восстановлении массивных деталей горного оборудования, где циклы работы могут быть продолжительными [22]. Без эффективного отвода тепла ресурс ключевых компонентов (катод, анод, сопло) снижается и делает работу установки невозможной.

Современные подходы к проектированию плазмотронов включают комплексное моделирование тепловых и гидродинамических процессов. Это позволяет оптимизировать конструкцию без проведения дорогостоящих натурных экспериментов. Особое внимание уделяется выбору оптимальных геометрических параметров элементов плазмотрона, в том числе толщины стенки анода, которая оказывает значительное влияние на тепловой режим работы.

В зависимости от конструкции прибора можно изменять и минимизировать теплоотдачу от стенок анода к охлаждающей его жидкости. Такая оптимизация наравне с другими исследованиями может позволить повысить качество производимых порошков, увеличить энергоэффективность самого прибора, затраты на его техобслуживание [23], а в случае горного применения повысить надежность и снизить эксплуатационные расходы на ремонт тяжелой техники.

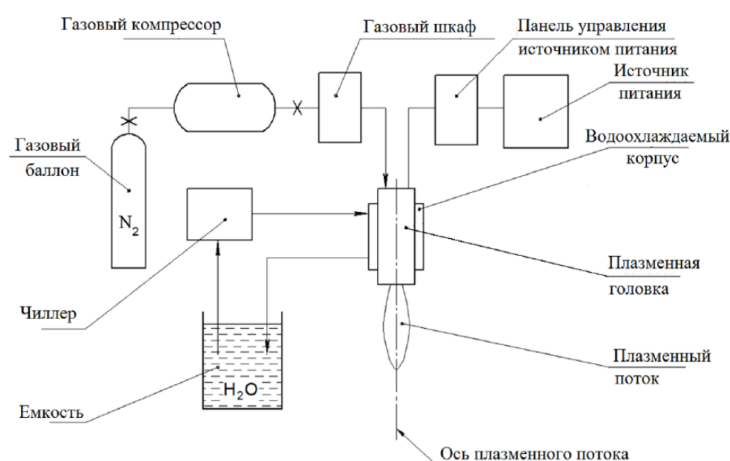


Рис. 1. Принципиальная схема МАК-6,5 [28]
Fig. 1. Schematic diagram of MAC-6.5

Целью статьи является исследование влияния толщины стенки анода на эффективность процесса теплопередачи от анода к жидкости в контексте разработки долговечных и эффективных плазмотронов для нужд горнодобывающей промышленности.

Методы (Methods)

В работе выбрана конструкция плазмотрона, в анодном узле которого внутренний канал выполнен в виде комбинации конфузорного конического и цилиндрического участков. Данная конструкция выбрана исходя из простоты изготовления и обслуживания.

Конфузорный участок канала обеспечивает ускорение плазменного потока и стабилизацию дуги, а цилиндрический участок способствует формированию равномерного температурного поля.

Такая геометрия широко применяется в промышленных плазмотронах благодаря своей эффективности и технологичности.

Рассмотрены семь вариантов форм анодного узла с цилиндрической частью с толщиной стенки цилиндрической части анодного узла (s) 2,0 мм, 3,0 мм, 4,0 мм, 5,0 мм, 6,0 мм, 7,0 мм и 8,0 мм. Выбор данного диапазона и шага был обусловлен необходимостью охватить как область минимально возможных с технологической точки зрения толщин, обеспечивающих механическую прочность, так и значения, превышающие типовые, для выявления асимптотического поведения тепловых характеристик. Моделирование выполнялось для установившегося режима, что соответствует наиболее длительным и термически нагруженным операциям наплавки в промышленных условиях.

Для каждого варианта толщины стенки была построена отдельная трехмерная модель с учетом всех конструктивных особенностей анодного узла. Это позволило провести сравнительный анализ тепловых характеристик при различных геометрических параметрах.

Поставленная цель достигалась путем проведения компьютерного эксперимента с последующей верификацией при проведении натурных экспериментов. Компьютерный эксперимент выполнен при

помощи метода конечных элементов, зарекомендовавшего себя в производственной практике при решении подобных задач [24, 25].

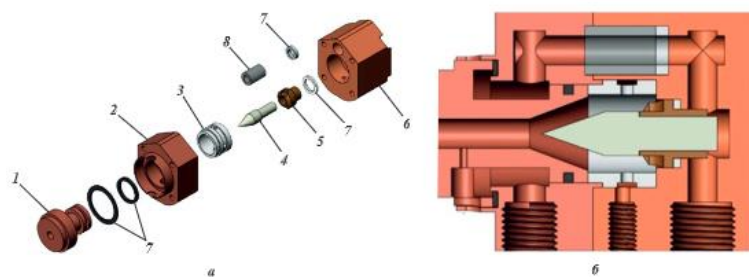
Среди пакетов прикладных программ, применяемых для проведения тепломеханических расчетов, используются *ANSYS* [26] и *SolidWorks* [27].

Расчет произведен в программе *Flow Simulation SolidWorks*, версия 2023 года (ссылка на источник программного пакета: www.solidworks.com), который позволяет реализовать метод конечных элементов. Создана компьютерная модель лабораторной плазменной установки МАК-6,5, собранной на базе Института металлургии Уральского отделения Российской академии наук. Эта установка применяется для получения порошков, нанесения функциональных

покрытий и модификации поверхностей. Принципиальная схема МАК-6,5 представлена на Рис. 1 и более подробно описана в [28, 29].

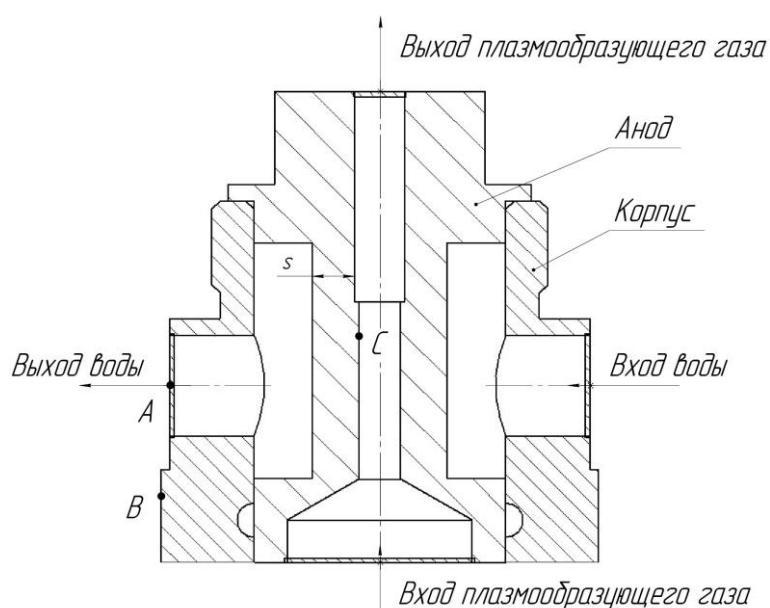
МАК-6,5 – это плазменная установка косвенного действия, в состав которой входит источник питания мощностью 6,5 кВт. Конструкция плазменной головки установки в разобранном состоянии (а) и в поперечном сечении вдоль оси (б) МАК-6,5 представлено на Рис. 2. Принципиальная схема плазменной установки МАК-6,5 представлена на Рис. 3.

Конструкция плазменной головки включает систему водяного охлаждения, которая обеспечивает отвод тепла от анода и других нагреваемых элементов. Эффективность работы этой системы



1 – анод, 2 – корпус, 3 – завихритель, 4 – катод, 5 – втулка, 6 – корпус катода, 7 – уплотнительные кольца, 8 – втулка

Рис. 2. Конструкция плазменной головки установки в разобранном состоянии (а) и в поперечном сечении вдоль оси (б)
Fig. 2. The design of the plasma head of the installation in a disassembled state (a) and in cross section along the axis (b)



А – точка замера температуры воды
В – точка замера температуры наружной стенки корпуса
С – точка замера температуры внутренней стенки анода
s – толщина стенки анода

Рис. 3. Принципиальная схема плазменной установки
Fig. 3. Schematic diagram of a plasma installation

напрямую влияет на стабильность технологического процесса и срок службы оборудования.

Программный пакет *Flow Simulation* зарекомендовал себя как удобный инструмент для вычислительной гидродинамики. Размер конечных элементов сетки разбиения выбран таким образом, чтобы в наиболее узком месте трехмерной компьютерной модели плазматрона размещались как минимум 4 элемента. Сделано это для учета поверхностных, подповерхностных и срединных процессов, происходящих в потоке. Размер конечных элементов сетки разбиения составлял 1 мм. При построении расчетной сетки особое внимание уделялось областям с высокими градиентами температур и скоростей. В этих зонах применялось локальное сгущение сетки для повышения точности расчетов.

В качестве плазмообразующего газа был применен технический аргон по ГОСТ 10157-2016. Объемный расход плазмообразующего газа

составлял 2,5 л/мин.

Для охлаждения применялась техническая с граничными параметрами на входе: температура 293 К, давление 101325 Па. Объемный расход охлаждающей воды составлял 2 м³/ч.

Материал элементов конструкции плазменной головки: анода – медь М1 по ГОСТ 859-2014; корпуса – литая легированная сталь по ГОСТ 4543-2016.

Время работы плазматрона 10 минут. Плазменный поток направлен в воздушное пространство, вертикально вверх.

Для расчета использовались фундаментальные законы сохранения и переноса:

1. Закон сохранения массы и уравнения Навье-Стокса для моделирования течения охлаждающей воды и плазмообразующего газа.

2. Уравнение энергии и Закон Фурье для анализа теплопроводности в стенках анода.

3. Закон Ньютона-Рихмана для расчета конвективного теплообмена между стенкой анода и охлаждающей водой.

4. Закон Стефана-Больцмана для учета радиационного теплообмена в высокотемпературных зонах.

Постановка задачи теплопереноса включала сопряженный расчет теплопроводности в твердом теле (стенке анода и корпуса) и конвективного теплообмена с охлаждающей средой.

Для учета реальных условий работы плазматрона в модель были включены зависимости теплофизических свойств материалов от температуры. Это позволило получить более точные результаты расчетов.

Для обеспечения достоверности результатов была проведена проверка

сходимости по сетке. Анализ показал, что дальнейшее уменьшение размера конечного элемента с 1 мм не приводит к существенному изменению расчетных температурных полей (различие менее 1,5%), что подтвердило адекватность выбранной дискретизации.

При проведении численного моделирования были приняты следующие упрощающие допущения:

1. Теплообмен между газовым потоком и окружающей средой отсутствует (адиабатический процесс);

2. Массовый расход плазмообразующего газа сохраняется постоянным по всей длине канала;

3. Режим течения газа принят стационарным (установившимся). Параметры потока в каждой точке пространства постоянны во времени, изменя-

ясь лишь вдоль оси канала. Поле течения предполагается осесимметричным, с параллельными оси векторами скорости;

4. Влиянием внешних силовых полей (включая гравитационное) можно пренебречь.

Принятые допущения позволяют упростить математическую модель без существенной потери точности результатов для стационарного режима работы плазмотрона.

Результаты исследования (Results)

Данные по определению температуры воды на выходе из системы (точка А), а также температуры наружной стенки корпуса (точка В) и внутренней стенки анода (точка С) для рассмотренных семи вариантов толщины стенки анодного узла, полученных в результате компьютерного эксперимента, представлены на Рис. 4.

Анализ результатов моделирования показал, что изменение толщины стенки анода влияет на тепловой режим работы плазмотрона.

Температура охлаждающей воды на выходе (Рис. 4а) демонстрирует выраженное снижение с ~310 К при толщине 2,0 мм до ~301 К при 5,0 мм. Данное снижение обусловлено переходом от режима экстремального локального теплообмена при малой толщине стенки к режиму эффективного распределенного отвода тепла. В первом случае высокая плотность теплового потока приводит к интенсивному кипению и кавитации в пристеночном слое, снижая эффективность теплоотвода. На Рис. 5 представлены картины распределения температуры воды в системе охлаждения в пристеночном слое для различных s . При толщине 5,0 мм тепловой поток стабилизируется, что обеспечивает развитие устойчивого турбулентного течения и максимальную эффективность охлаждения.

При дальнейшем увеличении толщины стенки до 8,0 мм наблюдается рост температуры воды до ~302 К. Этот рост является прямым следствием увеличения общего термического сопротивления конструкции. Несмотря на снижение тепловой нагрузки на внутреннюю поверхность, аккумулированная тепловая энергия распределяется по большей массе меди, вызывая повышение средней температуры конструкции. В результате система охлаждения вынуждена работать в режиме отвода тепла от перегретой массы анода, что проявляется в повышении температуры теплоносителя на выходе.

Температура наружной стенки корпуса (Рис. 4б) повторяет описанную немонотонную зависимость, снижаясь с ~305 К при 2,0 мм до ~296 К при 5,0 мм

с последующим ростом до ~299 К при 8,0 мм. Начальное снижение температуры корпуса связано с уменьшением теплового потока от внутренней поверхности вследствие увеличения толщины теплового барьера. Однако при превышении оптимальной толщины свыше 5,0 мм вступает в действие противоположный фактор – рост среднетемпературной температуры анода из-за аккумуляции тепла в увеличенном объеме меди. Это приводит к повышению температуры корпуса, несмотря на возросшее термическое сопротивление стенки.

Согласованный характер изменения температур воды и корпуса подтверждает, что толщина 5,0 мм является точкой энергетического баланса, обеспечивающей минимальную тепловую нагрузку как на

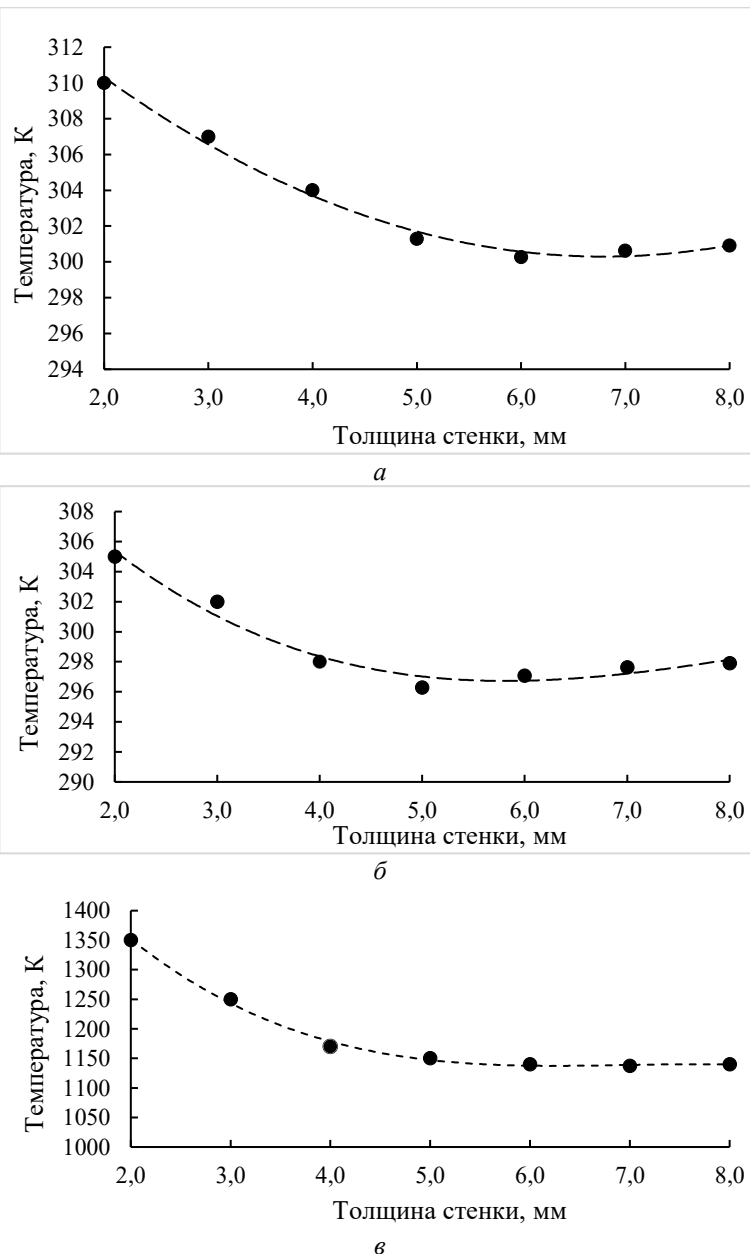


Рис. 4. Зависимость температуры воды на выходе из системы (а), наружной стенки корпуса (б) и внутренней стенки анода (в) от толщины стенки анода

Fig. 4. Dependence of the temperature of the water at the outlet of the system, the outer wall of the housing and the inner wall of the anode on the thickness of the anode wall

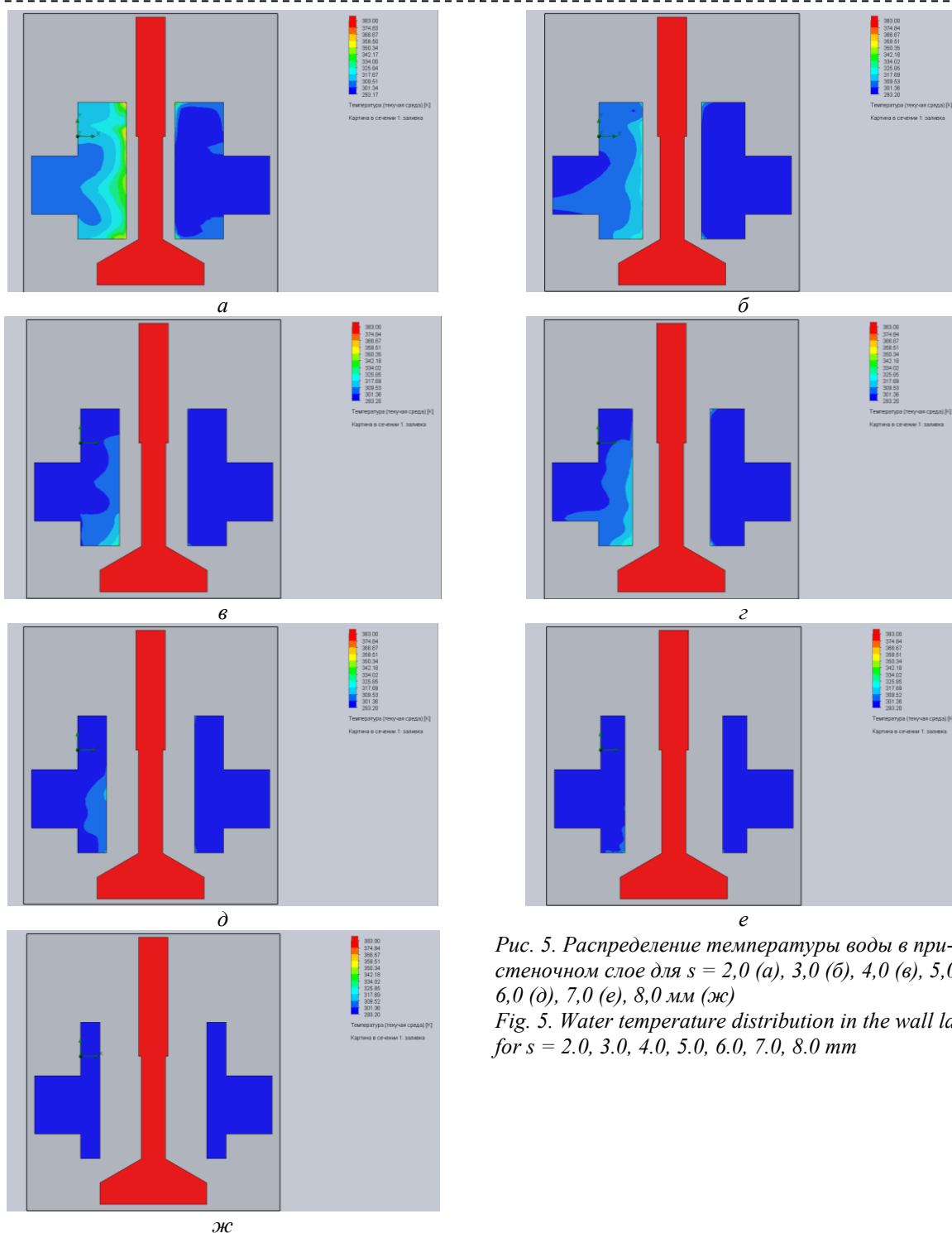


Рис. 5. Распределение температуры воды в пристеночном слое для $s = 2,0$ (а), $3,0$ (б), $4,0$ (в), $5,0$ (г), $6,0$ (д), $7,0$ (е), $8,0$ мм (ж)

Fig. 5. Water temperature distribution in the wall layer for $s = 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0$ mm

систему охлаждения, так и на элементы конструкции плазменной головки.

Температура внутренней поверхности анода (Рис. 4в) демонстрирует резкое снижение с ~ 1350 К при толщине $2,0$ мм до ~ 1150 К при $5,0$ мм, а при последующем изменении толщины стенки значение температуры не изменяется.

На Рис. 6 представлены картины распределения температуры по толщине стенки анода и корпуса плазмотрона. Более детальный анализ распределения температурных полей в поперечном сечении анода для различных толщин стенки показал, что при малых значениях s ($2,0$ – $3,0$ мм) наблюдается

значительный градиент температуры по толщине, а максимальная температура на внутренней поверхности может приближаться к температуре плавления меди. Это создает риск термической эрозии и деградации геометрии канала. При увеличении толщины стенки градиент снижается, и тепловой поток перераспределяется по большей площади, однако общее термическое сопротивление возрастает, приводя к повышению средней температуры конструкции.

В рамках верификации компьютерной модели плазменной установки МАК-6,5 был проведен натурный эксперимент по измерению температуры

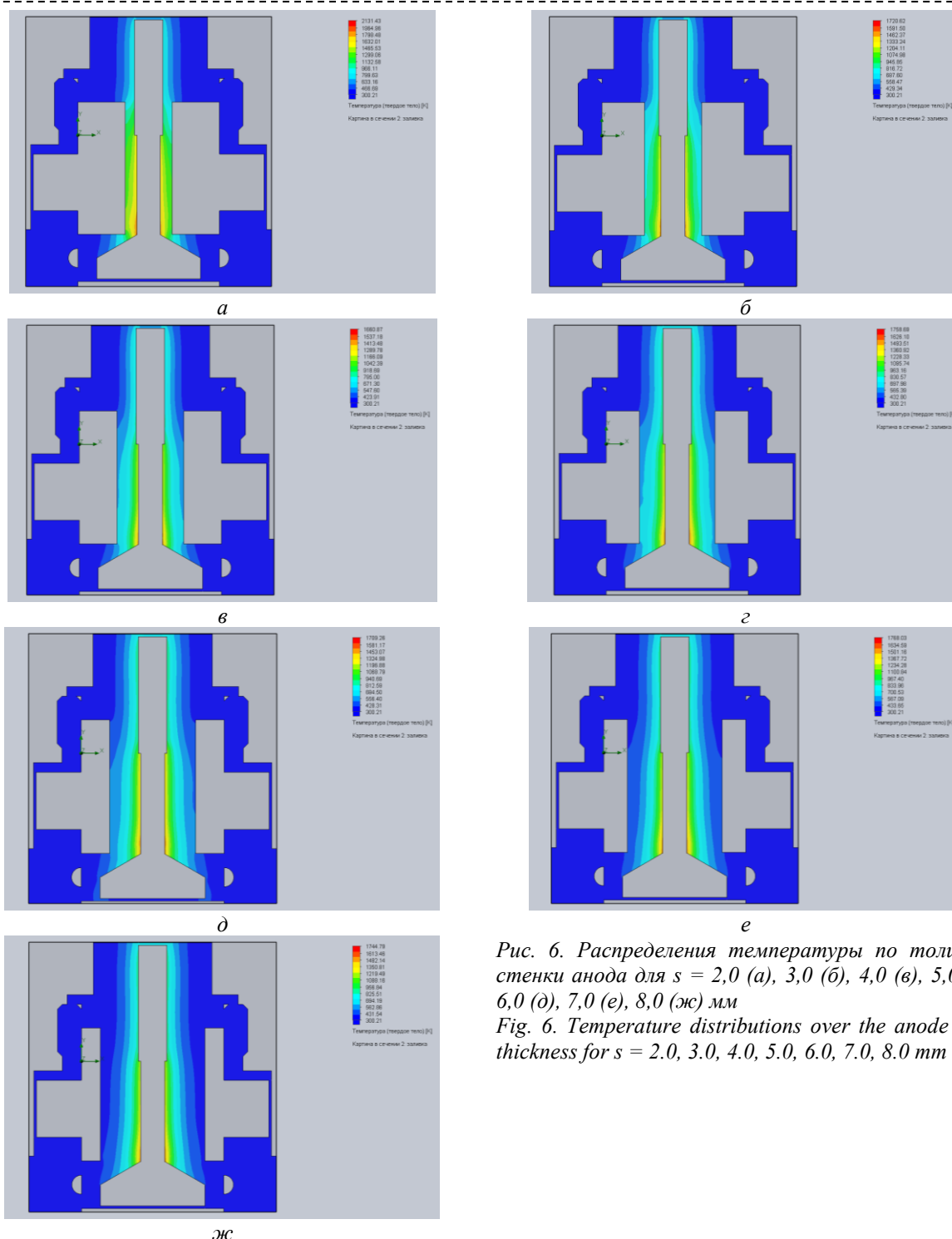


Рис. 6. Распределения температуры по толщине стенки анода для $s = 2,0$ (а), $3,0$ (б), $4,0$ (в), $5,0$ (г), $6,0$ (д), $7,0$ (е), $8,0$ (ж) мм
 Fig. 6. Temperature distributions over the anode wall thickness for $s = 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0$ mm

наружной стенки корпуса плазмотрона. В эксперименте в качестве плазмообразующего газа был также применен технический аргон по ГОСТ 10157-2016 с объемным расходом 2,5 л/мин. Плазменный поток истекал в атмосферу. Охлаждающая вода (техническая) подавалась с расходом 2 м³/ч, температурой 293 К и давлением 101325 Па. Корпус плазменной головки выполнен из легированной стали (ГОСТ 4543-2016), анод из меди М1 (ГОСТ 859-2014). Толщина стенки анода равна 5,0 мм. Время работы установки также составляло 10 минут. В течение всего эксперимента обеспечено постоянство воздействующих факторов, распыление

порошка или пруткового материала не происходило.

Температура в точке В контролировалась бесконтактным методом с помощью поверенного инфракрасного пирометра Testo 835-N1. Измерения проводились в соответствии с требованиями ГОСТ Р 8.624-2006.

Сопоставление данных, полученных для сравнения значений компьютерного и натурного экспериментов по температуре на стенке корпуса при толщине анода 5,0 мм, показывают удовлетворительное соответствие между результатами компьютерного моделирования и натурного эксперимента. Среднее значение температуры корпуса, получен-

ное численными методами, составляет 305,2 К, в то время как в натурном эксперименте зафиксировано значение 312,8 К. Таким образом, расхождение между расчетными и экспериментальными данными не превышает 2,43%, что свидетельствует о высокой адекватности применяемой математической модели.

Наблюдаемые незначительные отклонения могут быть объяснены следующими факторами:

- наличием неучтенных тепловых потерь в окружающую среду в математической модели;
- погрешностями измерения температуры в натурном эксперименте;
- возможными отклонениями теплофизических характеристик материалов от справочных значений.

Таким образом, для стандартных условий оптимальная толщина стенки анода – 5,0 мм, она обеспечивает баланс между температурами воды, анода и корпуса.

Обсуждение (Discussion)

Полученные результаты демонстрируют сложный немонотонный характер влияния толщины стенки анода на тепловой режим плазматрона. Выявленные закономерности согласуются с теоретическими представлениями о теплопереносе в многослойных структурах и подтверждаются данными других исследований [19, 21]. Сравнительный анализ показывает, что при малых толщинах стенки анода (2,0-3,0 мм) наблюдается высокий градиент температуры, что приводит к риску термической эрозии внутренней поверхности анода. Этот эффект важен для плазматронов, работающих в продолжительных циклах наплавки деталей горного оборудования [22]. При увеличении толщины свыше 5,0 мм начинает доминировать процесс роста общего термического сопротивления конструкции, что согласуется с данными [23] о влиянии геометрических параметров на теплопередачу.

Оптимальная толщина стенки 5,0 мм, выявленная в данном исследовании для плазматрона мощностью 6,5 кВт, представляет собой точку баланса между двумя конкурирующими процессами: снижением теплового потока от плазменной дуги и ростом термического сопротивления. Такой подход к оптимизации соответствует современным тенденциям проектирования энергоэффективного оборудования для горнодобывающей промышленности [3, 5].

Разработанная математическая модель показала высокую сходимость с экспериментальными данными (расхождение 2,43%), что подтверждает ее адекватность и возможность использования для оптимизации других конструктивных параметров плазматронов. Метод конечных элементов, реализованный в SolidWorks Flow Simulation, продемонстрировал свою эффективность для решения задач сопряженного теплообмена, что согласуется с результатами работ [24, 25].

Выводы (Conclusion)

1. Методом компьютерного моделирования установлено, что толщина стенки цилиндрической части анодного узла плазматрона оказывает влия-

ние на его тепловой режим. Выявлено оптимальное значение толщины стенки 5,0 мм, при котором достигается минимальная температура наружного корпуса, минимальная температура охлаждающей воды на выходе из системы при сохранении безопасного уровня нагрева внутренней поверхности анода.

2. Установлен физический механизм влияния толщины стенки, заключающийся в конкуренции двух процессов: снижения теплового потока от плазменной дуги и роста общего термического сопротивления конструкции. При толщинах менее 5,0 мм доминирует первый процесс, при больших значениях – второй.

3. Верификация математической модели натурным экспериментом показала высокую степень соответствия – расхождение между расчетными и экспериментальными данными не превышает 2,43%, что подтверждает адекватность модели и возможность ее использования для проектирования промышленных плазматронов.

4. Полученные результаты имеют практическую значимость для горнодобывающей промышленности, где надежность плазматронов напрямую влияет на экономическую эффективность процессов восстановления и упрочнения ответственных узлов горно-шахтного оборудования [5, 22].

Перспективами дальнейших исследований являются:

- изучение влияния геометрии охлаждающих каналов на эффективность теплосъема;
- оптимизация системы охлаждения с учетом реальных условий эксплуатации в горнодобывающей промышленности;
- разработка композитных материалов для анодного узла с улучшенными теплофизическими характеристиками;
- адаптация полученных результатов для плазматронов различной мощности и назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Liu H., Wu D., Ding F., Wang W., Pan S., Chen P., Liu H. Machine learning-enhanced laser cladding process for high-entropy alloy coatings with concurrent strength and ductility optimization // *Materials Science and Engineering: A*. 2025. Vol. 943. P. 148788. DOI: 10.1016/j.msea.2025.148788.
2. Liu M., Cai Y., Duan C., Li G. Key techniques in parts repair and remanufacturing based on laser cladding: A review // *Journal of Manufacturing Processes*. 2024. Vol. 132. Pp. 994-1014. DOI: 10.1016/j.jmapro.2024.11.039.
3. Singh R., Pratap R., Narayanan J.A., Thangamani G., Krishnan V.V., Arjunan A., Hughes D. Advances in additive manufacturing of fuel cells: A review of technologies, materials, and challenges // *Sustainable Materials and Technologies*. 2025. Vol. 43. P. e01317. DOI: 10.1016/j.susmat.2025.e01317.
4. Askarova A., Georgiev A., Bolegenova S., Maximov V., Bolegenova S., Toktarov D., Nugymanova A. Highly efficient plasma technology for ignition and thermochemical preparation of high-ash fuel in various power boilers in Kazakhstan // *Energy*. 2025.

Vol. 322. P. 135677. DOI: 10.1016/j.energy.2025.135677.

5. Cai Z., Yan J., Qiao Y., Li R., Shi Y., Zhang J., Zhang Z. Impact wear behavior of austenitic steel bucket teeth based on machine learning // *Journal of Materials Research and Technology*. 2025. Vol. 36. Pp. 6128-6141. DOI: 10.1016/j.jmrt.2025.04.258.

6. Ingabire C., Liang D., Li L. Progress on additive manufacturing technology of solid propellants // *Energetic Materials Frontiers*. 2025. DOI: 10.1016/j.enmf.2025.06.001.

7. Щицын Ю. Д., Белинин Д. С., Ольшанская Т. В., Карунакаран К. П., Казанцев А. В., Никулина С. Г. Особенности формирования сварных швов при плазменной сварке торцевых соединений габаритных изделий из меди // *Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение*. 2022. Т. 24. № 3. С. 71-79. DOI: 10.15593/2224-9877/2022.3.09.

8. Исаев А. П., Горшкалев Д. А., Сорокиков В. А. Плазменно-механическая обработка в машиностроении // *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*. 2022. Т. 1. С. 27-29.

9. Vatan H. N., Ardekani A. H. Plasma electrolytic oxidation (PEO) coatings on AZ31 magnesium alloy: An interpretable machine-learning study of nano-SiC and process parameters // *Next Materials*. 2025. Vol. 9. P. 101301. DOI: 10.1016/j.nxmate.2025.101301.

10. Волков А. Е., Волков А. А. Производство металлов, неметаллов, энергии и энергоносителей методом плазменно-дугового электролитического центробежного конвертирования // *Computational Nanotechnology*. 2023. Т. 10. № 4. С. 122-139.

11. Boenzi F., Iavagnilio R. Preliminary results of the ecological impacts assessment of the preheating process of a steel ladle via a DC plasma torch compared to a natural gas burner and economic considerations // *International Journal of Thermofluids*. 2025. Vol. 27. P. 101196. DOI: 10.1016/j.ijft.2025.101196.

12. Maier S., Mayr C., Hoffmann M., Mauthner G., Bleicher F. Consistent layer height in plasma metal deposition by adjusting wire feed // *Procedia CIRP*. 2025. Vol. 134. P. 963-968. DOI: 10.1016/j.procir.2025.02.226.

13. Caliarì F.R., Miranda F.S., Reis D.A.P., Filho G.P., Charakhovski L.I., Essiptchouk A. Plasma torch for supersonic plasma spray at atmospheric pressure // *Journal of Materials Processing Technology*. 2016. Vol. 237. P. 351-360. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2016.06.027.

14. Степанов Е. Ю., Долиновская Р. В., Шабалин С. А. Экспериментальное исследование процессов горения электрической дуги в плазмотронах переменного тока с изменением рода и расхода плазмообразующей среды // *Глобальная энергия*. 2012. № 3-2(154).

15. Vasil'ev V. V., Zaleskij D. Y., Samokhvalov N. V., Strel'nitskij V. E. Effect of hydrogen concentration in argon-hydrogen mixtures on parameters of electric arc in gas-vortex plasmatrons for diamond coating synthesis // *Diamond and Related Materials*. 1998. Vol.

7. № 6. P. 761-764. DOI: 10.1016/S0925-9635(97)00298-7.

16. Narayanan B., Lakshmanan K., Gurusamy S. Fabrication of highly efficient FeNi-based electrodes using thermal plasma spray for electrocatalytic oxygen evolution reaction // *Surfaces and Interfaces*. 2024. Vol. 46. P. 104091. DOI: 10.1016/j.surf.2024.104091.

17. Иванов А. А., Петров Б. С. Тепловые процессы в плазмотронах постоянного тока // *Плазменные процессы в технике и технологии*. 2021. Т. 15. № 3. С. 45-52.

18. Сафронов А. А., Кузнецов В. Е., Васильева О. Б., Дудник Ю. Д., Ширяев А. А. Плазмотроны переменного тока. Системы инициации дуги. Особенности конструкции и применения // *Приборы и техника эксперимента*. 2019. № 2. С. 58-66.

19. Syundyukov I., Skotnikova M., Padgurskas J., Tsvetkova G., Tarasenko E. Wearproof structural and phase status of the surface of preparation of steel 45 after plasma spraying of powder PN85Y15 // *Materials Today: Proceedings*. 2020. Vol. 30. Part 3. Pp. 650-655. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.01.454.

20. Wang K., Zhang H., Ananthanarasimhan J., Rao L., Lin X., Wan J., Long Y., Gao M., Wang W., Tu X., Li X., Huang Q. Bi-reforming of methane in a carbon deposit-free plasmatron with high operational adaptability // *Fuel Processing Technology*. 2023. Vol. 248. P. 107826. DOI: 10.1016/j.fuproc.2023.107826.

21. Окулов Р. А., Крашанинин В. А., Гельчинский Б. Р., Ремпель А. А. Влияние формы внутреннего канала анодного узла на скорость плазменного потока // *Ученые записки Казанского университета*. 2024. Т. 166. Кн. 1. С. 58-73. DOI: 10.26907/2541-7746.2024.1.58-73.

22. Петров К. В., Сидоров А. Н. Применение плазменной наплавки для восстановления изношенных деталей горного оборудования // *Горное оборудование и электромеханика*. 2023. № 5. С. 45-52.

23. Старовойтенко Е. И. К вопросу формирования новой компоновочной и конструктивной схемы установок PREP-технологии получения порошков // *Технология легких сплавов*. 2024. № 1.

24. Zhou X., Yu Y., Wang X. Preparation of WC coatings via additive manufacturing technology: Microstructure, friction properties, and finite element simulation // *Materials Letters*. 2025. Vol. 384. P. 138072. DOI: 10.1016/j.matlet.2025.138072.

25. Liu J., Zhang H., Min Q., Li P., Yang J., Xia Z. Geometrically nonlinear isogeometric topology optimization via extended finite element method // *Computers & Structures*. 2025. Vol. 316. P. 107871. DOI: 10.1016/j.compstruc.2025.107871.

26. Li Q., Zhang N., Gao Y., Qing Y., Zhu Y., Yang K., Zhu J., Wang H., Ma Z., Gao L., Liu Y., He J. Effect of the core-shell structure powders on the microstructure and thermal conduction property of YSZ/Cu composite coatings // *Surface and Coatings Technology*. 2021. Vol. 424. P. 127658. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2021.127658.

27. Golewski P., Sadowski T. Technological and strength aspects of layers made of different powders laminated on a polymer matrix composite substrate // *Molecules*. 2022. Vol. 27. № 4. P. 1168. DOI: 10.3390/molecules27041168.

28. Окулов Р. А., Ахметшин С. М., Гельчинский Б. Р., Ремпель А. А. Траектория движения частиц титанового порошка различной фракции в плазменном потоке // *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2023. Т.

17. № 3. С. 47-54. DOI: 10.17073/1997-308X-2023-3-47-54.

29. Окулов Р. А., Крашанинин В. А., Гельчинский Б. Р., Ремпель А. А. Влияние силы тяжести на движение частиц титанового порошка в плазменном потоке // *Металлы*. 2023. № 3. С. 3-10. DOI: 10.31857/S0869573323030011.

© 2025 Автор. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Окулов Роман Александрович, старший научный сотрудник, Институт металлургии Уральского отделения РАН (620016, Россия, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 101); доцент, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (620062, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4488-9190>, e-mail: okulov.roman@gmail.com

Коновалова Екатерина Сергеевна, студент, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (620062, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19), ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8188-3994>, e-mail: konoeaterina5@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

Окулов Роман Александрович – концептуализация исследования, постановка задачи, проведение компьютерного моделирования, анализ данных, написание исходного текста рукописи.

Коновалова Екатерина Сергеевна – анализ литературных источников, верификация модели, обсуждение результатов, редактирование и оформление текста статьи.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2025-6-75-86

Roman A. Okulov^{1,2,*}, Ekaterina S. Konovalova²

¹ Academician N.A. Vatolin Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

² Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin

* for correspondence: okulov.roman@gmail.com

INFLUENCE OF PLASMA TORCH ANODE WALL THICKNESS ON HEAT REMOVAL EFFICIENCY OF WATER COOLING SYSTEM



Article info

Received:

27 October 2025

Accepted for publication:

14 November 2025

Accepted:

15 November 2025

Published:

Abstract.

Plasma torches are widely used in the mining industry, for example, for coating the surfaces of equipment components, such as drilling tools, crusher components, and conveyor belt rollers. Plasma torches are also used for surface modification, which is especially important during component repair and restoration. A plasma system includes a cooling unit, the efficiency of which determines its operating time. During practical work, it is important to ensure the proper operation of plasma equipment. This article discusses the water cooling system of the MAK-6.5 system – a secondary plasma torch designed for modifying components and applying coatings. The objective of this study is to investigate the effect of the temperature of the cylindrical section of the plasma torch anode assembly on the temperature of the liquid at the outlet of the water cooling system. A computer model of the plasma system was created that adequately describes the real process. The study was conducted using the finite element method.

Keywords: plasma torch; anode assembly; heat transfer; water cooling system; wall thickness; finite element method; mining equipment.

SolidWorks Flow Simulation was used as the package implementing the finite element method. The results of the computer experiment were confirmed by a full-scale experiment. A comparative analysis showed satisfactory convergence. Seven options for measuring anode thicknesses with greater thickness are presented, ranging from 2.0 to 8.0 mm in 1 mm increments. The finite element method is based on the fundamental laws of heat transfer (Fourier, Newton-Richmann, Stefan-Boltzmann) and the conservation equation. The scientific novelty of this study lies in its comparative measurement of the wall thickness of the MAK-6.5 anode assembly, ensuring the most efficient heat-removal water cooling system, preventing the formation of an air-vapor zone, and anode wall burnout. As a result of this study, recommendations were developed for manufacturers and consumers of plasma torch equipment on the selection of anode wall thickness. The findings presented in this article have practical implications for improving plasma equipment used in mining operations

For citation: Okulov R.A., Konovalova E.S. Influence of plasma torch anode wall thickness on heat removal efficiency of water cooling system. *Mining Equipment and Electromechanics*, 2025; 6(182):75-86 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2025-6-75-86, EDN: XWXHDM

REFERENCES

1. Liu H., Wu D., Ding F., Wang W., Pan S., Chen P., Liu H. Machine learning-enhanced laser cladding process for high-entropy alloy coatings with concurrent strength and ductility optimization. *Materials Science and Engineering: A*. 2025; 943:148788. DOI: 10.1016/j.msea.2025.148788.
2. Liu M., Cai Y., Duan C., Li G. Key techniques in parts repair and remanufacturing based on laser cladding: A review. *Journal of Manufacturing Processes*. 2024; 132:994-1014. DOI: 10.1016/j.jmapro.2024.11.039.
3. Singh R., Pratap R., Narayanan J.A., Thangamani G., Krishnan V.V., Arjunan A., Hughes D. Advances in additive manufacturing of fuel cells: A review of technologies, materials, and challenges. *Sustainable Materials and Technologies*. 2025; 43:e01317. DOI: 10.1016/j.susmat.2025.e01317.
4. Askarova A., Georgiev A., Bolegenova S., Maximov V., Bolegenova S., Toktarov D., Nugymanova A. Highly efficient plasma technology for ignition and thermochemical preparation of high-ash fuel in various power boilers in Kazakhstan. *Energy*. 2025; 322:135677. DOI: 10.1016/j.energy.2025.135677.
5. Cai Z., Yan J., Qiao Y., Li R., Shi Y., Zhang J., Zhang Z. Impact wear behavior of austenitic steel bucket teeth based on machine learning. *Journal of Materials Research and Technology*. 2025; 36:6128-6141. DOI: 10.1016/j.jmrt.2025.04.258.
6. Ingabire C., Liang D., Li L. Progress on additive manufacturing technology of solid propellants. *Energetic Materials Frontiers*. 2025. DOI: 10.1016/j.enmf.2025.06.001.
7. Shchitsyn Yu.D., Belinin D.S., Ol'shanskaya T.V., Karunakaran K.P., Kazantsev A.V., Nikulina S.G. Features of weld formation in plasma welding of butt joints of large-sized copper products. *Vestnik PNI-PU. Mashinostroenie, Materialovedenie [Bulletin of PNRPU. Mechanical Engineering, Materials Science]*. 2022; 24(3):71-79. (In Russ.). DOI: 10.15593/2224-9877/2022.3.09.
8. Isaev A.P., Gorshkaliev D.A., Sorokovikov V.A. Plasma-mechanical treatment in mechanical engineering. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики [Actual Problems of Aviation and Cosmonautics]*. 2022; 1:27-29. (In Russ.)
9. Vatan H.N., Ardekani A.H. Plasma electrolytic oxidation (PEO) coatings on AZ31 magnesium alloy: An interpretable machine-learning study of nano-SiC and process parameters. *Next Materials*. 2025; 9:101301. DOI: 10.1016/j.nxmte.2025.101301.
10. Volkov A.E., Volkov A.A. Production of metals, non-metals, energy and energy carriers by plasma-arc electrolytic centrifugal conversion method. *Computational Nanotechnology*. 2023; 10(4):122-139. (In Russ.)
11. Boenzi F., Iavagnilio R. Preliminary results of the ecological impacts assessment of the preheating process of a steel ladle via a DC plasma torch compared to a natural gas burner and economic considerations. *International Journal of Thermofluids*. 2025; 27:101196. DOI: 10.1016/j.ijft.2025.101196.
12. Maier S., Mayr C., Hoffmann M., Mauthner G., Bleicher F. Consistent layer height in plasma metal deposition by adjusting wire feed. *Procedia CIRP*. 2025; 134:963-968. DOI: 10.1016/j.procir.2025.02.226.
13. Caliri F.R., Miranda F.S., Reis D.A.P., Filho G.P., Charakhovski L.I., Essiptchouk A. Plasma torch for supersonic plasma spray at atmospheric pressure. *Journal of Materials Processing Technology*. 2016; 237:351-360. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2016.06.027.
14. Stepanov E.Yu., Dolinovskaya R.V., Shabalin S.A. Experimental study of electric arc combustion processes in AC plasma torches with changes in the type and flow rate of the plasma-forming medium. *Global'naya energiya [Global Energy]*. 2012; 3-2(154). (In Russ.)
15. Vasil'ev V.V., Zaleskij D.Y., Samokhvalov N.V., Strel'nitskij V.E. Effect of hydrogen concentration in argon-hydrogen mixtures on parameters of electric arc in gas-vortex plasmatrons for diamond coating synthesis. *Diamond and Related Ma-*

terials. 1998; 7(6):761-764. DOI: 10.1016/S0925-9635(97)00298-7.

16. Narayanan B., Lakshmanan K., Gurusamy S. Fabrication of highly efficient FeNi-based electrodes using thermal plasma spray for electrocatalytic oxygen evolution reaction. *Surfaces and Interfaces*. 2024; 46:104091. DOI: 10.1016/j.surf.2024.104091.

17. Ivanov A.A., Petrov B.S. Thermal processes in DC plasma torches. *Plazmennye protsessy v tekhnike i tekhnologii [Plasma Processes in Engineering and Technology]*. 2021; 15(3):45-52. (In Russ.)

18. Safronov A.A., Kuznetsov V.E., Vasil'eva O.B., Dudnik Yu.D., Shiryaev A.A. AC plasma torches. Arc initiation systems. Design and application features. *Priboiy i tekhnika eksperimenta [Instruments and Experimental Techniques]*. 2019;2:58-66. (In Russ.)

19. Syundyukov I., Skotnikova M., Padgurskas J., Tsvetkova G., Tarasenko E. Wearproof structural and phase status of the surface of preparation of steel 45 after plasma spraying of powder PN85Y15. *Materials Today: Proceedings*. 2020; 30(Part 3):650-655. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.01.454.

20. Wang K., Zhang H., Ananthanarasimhan J., Rao L., Lin X., Wan J., Long Y., Gao M., Wang W., Tu X., Li X., Huang Q. Bi-reforming of methane in a carbon deposit-free plasmatron with high operational adaptability. *Fuel Processing Technology*. 2023; 248:107826. DOI: 10.1016/j.fuproc.2023.107826.

21. Okulov R.A., Krashaninin V.A., Gel'chinskiy B.R., Rempel' A.A. Influence of the shape of the anode unit inner channel on the plasma flow velocity. *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta [Proceedings of Kazan University]*. 2024; 166(1):58-73. (In Russ.). DOI: 10.26907/2541-7746.2024.1.58-73.

22. Petrov K.V., Sidorov A.N. Application of plasma surfacing for the restoration of worn parts of mining equipment. *Gornoe oborudovanie i el-*

ektromekhanika [Mining Equipment and Electromechanics]. 2023; 5:45-52. (In Russ.)

23. Starovoytenko E.I. On the formation of a new layout and structural scheme of PREP technology installations for powder production. *Tekhnologiya legkikh splavov [Technology of Light Alloys]*. 2024; 1. (In Russ.)

24. Zhou X., Yu Y., Wang X. Preparation of WC coatings via additive manufacturing technology: Microstructure, friction properties, and finite element simulation. *Materials Letters*. 2025; 384:138072. DOI: 10.1016/j.matlet.2025.138072.

25. Liu J., Zhang H., Min Q., Li P., Yang J., Xia Z. Geometrically nonlinear isogeometric topology optimization via extended finite element method. *Computers & Structures*. 2025; 316:107871. DOI: 10.1016/j.compstruc.2025.107871.

26. Li Q., Zhang N., Gao Y., Qing Y., Zhu Y., Yang K., Zhu J., Wang H., Ma Z., Gao L., Liu Y., He J. Effect of the core-shell structure powders on the microstructure and thermal conduction property of YSZ/Cu composite coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2021; 424:127658. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2021.127658.

27. Golewski P., Sadowski T. Technological and strength aspects of layers made of different powders laminated on a polymer matrix composite substrate. *Molecules*. 2022; 27(4):1168. DOI: 10.3390/molecules27041168.

28. Okulov R.A., Krashaninin V.A., Popov E.V. Plasma jet stream simulation for formation coating and powder manufacturing processes. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021; 1954(1):012033. DOI: 10.1088/1742-6596/1954/1/012033.

29. Okulov R.A., Krashaninin V.A., Gelchinsky B.R., Rempel A.A. The Effect of Gravity on the Motion of Titanium Powder Particles in a Plasma Flow. *Metally*. 2023; 3:3-10. DOI: 10.31857/S0869573323030011.

© 2025 The Author. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the author:

Roman A. Okulov, Senior Researcher, FGBUN "Academician N.A. Vatolin Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences" (620016, Russia, Yekaterinburg, Str. Amundsen 101); Associate Professor, FGAOU VO "Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin" (620062, Russia, Yekaterinburg, Str. Mira 19), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4488-9190>, e-mail: okulov.roman@gmail.com

Ekaterina S. Konovalova, student, FGAOU VO "Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin" (620062, Russia, Yekaterinburg, Str. Mira 19), ORCID: <https://orcid.org/0000-0000-0000-0002>, e-mail: konoekaterina5@gmail.com

Contribution of the authors:

Roman A. Okulov – conceptualization of research, problem statement, computer modeling, data analysis, writing the source text of the manuscript.

Ekaterina S. Konovalova – analysis of literary sources, verification of the model, discussion of the results, editing and formatting of the text of the article

Authors have read and approved the final manuscript.

