



Научная статья

УДК 537.528

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=189150>

EDN: <https://www.elibrary.ru/HAPYSN>

ПЛАЗМА ВЧИ-РАЗРЯДА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ СО СТРУЙНЫМ ЖИДКИМ ЭЛЕКТРОДОМ И ИЗДЕЛИЕМ 3D-ПЕЧАТИ

Р.Р. Каюмов¹, И. Ш. Абдуллин², А. Ф. Гайсин^{1✉}, Ф.М. Гайсин¹, И. Т. Фахрутдинова¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ», г. Казань, Республика Татарстан, Россия,

²Общество с ограниченной ответственностью «Плазма-ВСТ»,
г. Казань, Республика Татарстан, Россия

✉ almaz87@mail.ru

Цитирование: Каюмов Р.Р., Абдуллин И.Ш., Гайсин А.Ф., Гайсин Ф.М., Фахрутдинова И.Т. Плазма ВЧИ-разряда при взаимодействии со струйным жидким электродом и изделием 3D-печати Труды МАИ: электрон. журнал. № 149. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=189150>

Аннотация. В работе представлены результаты экспериментального исследования струйного высокочастотного индукционного разряда пониженного давления при взаимодействии с жидким электродом и поверхностью металлического образца, изготовленного методом аддитивного производства. Рассмотрены гидродинамические и электрофизические условия формирования плазменно-жидкостного разряда в системе жидкая струя – плазма – твёрдое тело. Показано, что изменение давления в диапазоне 0,1–0,7 кгс/см² приводит к существенному изменению скорости истечения струи и режима её течения, что оказывает определяющее влияние на структуру и устойчивость разряда. Установлено, что электрическая мощность струйного ВЧИ-разряда при фиксированном давлении возрастает нелинейно с увеличением тока и достигает значений порядка 1 кВт. Исследована морфология поверхности образцов до и

после плазменно-жидкостной обработки; показано снижение параметров шероховатости и повышение класса чистоты поверхности по ГОСТ. Выявлено изменение смачиваемости поверхности, сопровождающееся увеличением краевого угла, а также рост микротвёрдости поверхностного слоя более чем на 10 %. Полученные результаты свидетельствуют о возможности контролируемой модификации морфологических, межфазных и механических свойств поверхности аддитивно изготовленных металлических изделий с использованием струйного ВЧИ-разряда.

Ключевые слова: струйный ВЧИ-разряд; плазменно-жидкостная обработка; жидкий электрод; аддитивное производство; гидродинамика струи; электрофизические характеристики.

Финансирование: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-01610, <https://rscf.ru/project/25-29-01610/>.

RF-DISCHARGE PLASMA INTERACTING WITH A LIQUID JET ELECTRODE AND A 3D-PRINTED PRODUCT

R.R. Kayumov¹, I.Sh. Abdullin², A.F. Gaisin¹✉, F.M. Gaysin¹, I.T. Fakhrutdinova¹

¹Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev–KAI»,
Kazan, Republic of Tatarstan, Russia

²Plazma-VST Limited Liability Company, Kazan, Republic of Tatarstan, Russia

✉ almaz87@mail.ru

Citation: Kayumov R.R., Abdullin I.Sh., Gaisin A.F., Gaisin F.M., Fakhrutdinova I.T. RFI discharge plasma interacting with a liquid jet electrode and a 3D-printed product // Trudy MAI. 2026. No. 149. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=189150>

Abstract. The paper presents the results of an experimental study of a low-pressure high-frequency inductive jet discharge interacting with a liquid electrode and the surface of a metal sample manufactured by additive manufacturing. The hydrodynamic and electrophysical conditions for the formation of a plasma-liquid discharge in the "liquid jet - plasma - solid" system are considered. It is shown that a change in pressure in the

range of 0.1–0.7 kgf/cm² leads to a significant change in the jet outflow velocity and its flow regime, which has a decisive effect on the structure and stability of the discharge. It is found that the electric power of the RFI jet discharge at a fixed pressure increases nonlinearly with increasing current and reaches values of the order of 1 kW. The surface morphology of the samples before and after plasma-liquid treatment is studied; a decrease in roughness parameters and an increase in the surface cleanliness class according to GOST are demonstrated. A change in surface wettability, accompanied by an increase in the contact angle, was detected, as well as an increase in surface layer microhardness by more than 10%. The obtained results demonstrate the possibility of controlled modification of the morphological, interfacial, and mechanical properties of the surface of additively manufactured metal products using a jet RFI discharge.

Keywords: jet, RFI discharge; plasma-liquid processing; liquid electrode; additive manufacturing; jet hydrodynamics; electrophysical characteristics.

Funding: the study was supported by grant No. 25-29-01610 from the Russian Science Foundation, <https://rscf.ru/project/25-29-01610/>.

Введение

Современное развитие плазменных и плазменно-жидкостных технологий сопровождается устойчивым ростом интереса к разрядам, формируемым в многофазных системах жидкость – газ – плазма – твёрдое тело [4–10]. Особое место среди них занимают высокочастотные индукционные разряды, которые благодаря бесконтактному способу ввода энергии позволяют формировать устойчивую плазму без использования твёрдых электродов в зоне горения разряда [1; 11]. Это обстоятельство определяет их перспективность для задач модификации поверхности материалов, плазмохимических процессов и обработки изделий сложной формы [11–13].

В последние годы значительное внимание уделяется струйным конфигурациям плазменно-жидкостных разрядов, в которых жидкая струя одновременно выполняет функции плазмообразующей среды и электрода [2; 3; 7; 10]. Такие системы представляют собой сложный объект исследования с точки зрения механики жидкости, газа и плазмы, поскольку в зоне взаимодействия

реализуется тесная связь гидродинамики струи, процессов испарения, формирования парогазовой оболочки и развития плазмы в высокочастотном электромагнитном поле [5; 9; 10]. Нестационарный и многофазный характер этих процессов определяет специфические условия энерговода, тепло- и массообмена вблизи обрабатываемой поверхности [4; 9].

Дополнительным фактором, существенно влияющим на структуру и свойства плазмы высокочастотного индукционного (ВЧИ) разряда, является геометрия индуктора. В отличие от традиционных замкнутых кольцевых индукторов, разомкнутая индукционная система формирует иное распределение высокочастотного электромагнитного поля, что приводит к изменению условий возбуждения, устойчивости и пространственной структуры разряда [1; 11]. При взаимодействии плазмы с жидким струйным электродом это особенно важно, поскольку локальные неоднородности поля напрямую отражаются на динамике парогазовой оболочки, конфигурации плазменной зоны и характере воздействия на поверхность твёрдого тела [5; 10].

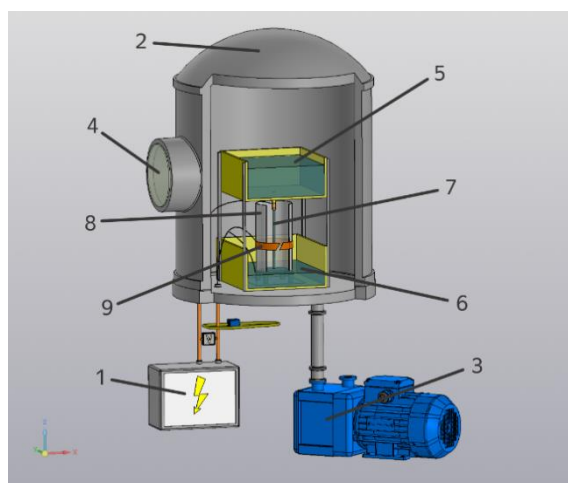
Практический интерес к подобным системам усиливается в связи с развитием аддитивных технологий. Изделия, изготовленные методом 3D-печати из металлических порошков, обладают развитым микрорельефом, остаточной пористостью и неоднородным поверхностным состоянием, что существенно влияет на их эксплуатационные свойства. Применение плазменно-жидкостных методов обработки открывает возможности управляемого изменения морфологии и межфазных свойств поверхности таких изделий без использования механической обработки и высокотемпературных вакуумных процессов [12; 15].

Несмотря на наличие работ, посвящённых высокочастотным индукционным и плазменно-жидкостным разрядам [1; 11–13], физические особенности плазмы ВЧИ-разряда при её взаимодействии со струйным жидким электродом и поверхностью изделия 3D-печати, особенно в условиях разомкнутого индуктора, остаются недостаточно изученными. В частности, требуют детального анализа закономерности формирования плазменной области, устойчивость разряда и роль многофазного взаимодействия в системе жидкость – плазма – твёрдое тело с позиций механики жидкости, газа и плазмы [5; 9; 11].

Целью настоящей работы является исследование плазмы высокочастотного индукционного разряда при взаимодействии со струйным жидким электродом и изделием 3D-печати в условиях разомкнутой индукционной системы. Основное внимание уделено анализу физических особенностей формирования и устойчивости разряда, а также рассмотрению характера плазменно-жидкостного взаимодействия, определяющего воздействие плазмы на поверхность аддитивно изготовленного изделия.

Материалы и методы

Экспериментальные исследования струйного высокочастотного индукционного разряда пониженного давления с жидкой плазмообразующей средой проводились на специализированной лабораторной установке (рисунок 1).



а



б

Рисунок 1 - Функциональная схема (а) и фотография установки (б) для исследования плазмы ВЧИ-разряда при взаимодействии со струйным жидким электродом и изделием 3D-печати, где: 1 – ВЧ-источник питания; 2 – вакуумная камера; 3 – вакуумный насос; 4 – иллюминатор; 5 – ячейка для подачи электролита; 6 – ячейка для стока электролита; 7 – струя электролита; 8 – кварцевая трубка; 9 – разомкнутый индуктор.

Экспериментальная установка включала высокочастотный источник питания, вакуумную камеру с газоразрядным модулем, систему подачи и циркуляции электролита, вакуумную систему и измерительно-диагностический комплекс. Формирование ВЧИ-разряда осуществлялось внутри кварцевой трубки при индукционном вводе энергии с использованием разомкнутого индуктора,

расположенного вблизи области взаимодействия струи жидкого электрода с поверхностью образца. Такая конфигурация обеспечивала локализованный энерговод и позволяла реализовать устойчивое горение плазмы в межфазной области. Разряд формировался между струёй электролита, выполнявшей роль жидкого электрода, и металлической поверхностью изделия.

В качестве источника питания использовался высокочастотный генератор УГПН-1, подключаемый к трёхфазной сети напряжением 380 В и частотой 50 Гц. Генератор обеспечивал выходную мощность до 4 кВт при рабочей частоте 1,76 МГц. Регулирование анодного напряжения осуществлялось в диапазоне 8...9,5 кВ при токе 0,2...1,5 А, при этом ток сетки не превышал 1,5 А. Стабильность анодного напряжения при колебаниях питающего напряжения в пределах $\pm 5\%$ составляла не более 8 %. Для обеспечения тепловой устойчивости генератора применялась проточная система водяного охлаждения с расходом не менее 0,2 м³/ч.

Поддержание пониженного давления в зоне горения ВЧИ-разряда осуществлялось с использованием пластинчато-роторного вакуумного насоса 2НВР-5ДМ с предельным остаточным давлением до $6,7 \times 10^{-2}$ Па и производительностью 5 л/с по воздуху. Регулирование рабочего давления в камере выполнялось дозирующим клапаном, а контроль давления — вакуумметром, установленным на выходе вакуумной камеры. Это обеспечивало воспроизводимое задание режимов формирования парогазовой и плазменной области в зоне взаимодействия струи с поверхностью изделия.

В качестве плазмообразующей среды использовался 6-процентный водный раствор сульфата аммония $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, приготовленный на основе очищенной технической воды. Для обеспечения стабильности состава и температуры раствора применялась термостатированная ванна электролита с циркуляционным охладителем рефрижераторного типа. Обновление электролита в рабочей зоне осуществлялось за счёт системы подачи и отвода, что предотвращало накопление примесей и продуктов разрядного взаимодействия; в контуре циркуляции дополнительно использовался фильтр грубой очистки.

Объектом исследования являлись образцы, изготовленные методом аддитивного производства (селективного лазерного сплавления) из порошка

ферритной нержавеющей стали AISI 430L. Применяемый порошок был получен методом газового распыления и характеризовался высокой сферичностью частиц (более 90 %), узким фракционным составом с размером частиц 15...53 мкм и высокой чистотой материала (около 99,3 %). Химический состав порошка соответствовал требованиям к стали AISI 430L и включал 16,0...18,0 % хрома при минимальном содержании углерода ($\leq 0,03$ %) и никеля ($\leq 0,5$ %). Низкое содержание газовых примесей ($O_2 < 800$ ppm, $N_2 < 400$ ppm) обеспечивало стабильность процесса аддитивного формирования и воспроизводимую структуру получаемых изделий. Изделия после печати использовались без дополнительной механической обработки, что позволяло исследовать влияние ВЧИ-разряда на характерную для аддитивных технологий поверхностную морфологию.

Параметры струйной ВЧИ-обработки подбирались таким образом, чтобы обеспечить устойчивое горение разряда и воспроизводимость условий эксперимента. Диаметр струи электролита составлял 1 мм, длина плазменной струи — 30 мм, рабочее давление в вакуумной камере — 0,5...1 кгс/см². Инициация ВЧИ-разряда происходила при частоте 1,76 МГц и скорости истечения струи около 0,8 м/с. Напряжение горения разряда составляло порядка 0,5...0,9 кВ при токе до 1,5 А, что соответствовало формированию насыщенной плазменной области с высокой плотностью энерговода.

Удельная мощность разряда в зоне контакта струи с поверхностью изделия достигала значений порядка 1,2 кВт при площади взаимодействия около $1,77 \times 10^{-6}$ м². Это обеспечивало высокую плотность теплового и энергетического воздействия, приводящую к интенсивному испарению жидкости, формированию парогазовой оболочки и развитию плазмы вблизи поверхности аддитивно изготовленного образца.

Для диагностики процессов, протекающих в зоне струйного ВЧИ-разряда, применялся комплекс экспериментальных методов:

1. Визуализация динамики течения струи, парогазовой области и плазмы осуществлялась с использованием высокоскоростной видеокамеры Casio EX-F1 при частоте съёмки 600 и 1200 кадров в секунду.

2. Электрические параметры разряда, включая временные зависимости тока и напряжения, регистрировались с использованием цифрового осциллографа АКТАКОМ АСК-2067.

3. Морфология поверхности, параметры микрорельефа и трёхмерная топография образцов до и после обработки исследовались методом конфокальной лазерной сканирующей микроскопии с применением микроскопа Olympus LEXT OLS4100.

4. Микротвёрдость поверхностного слоя измерялась на автоматическом твердомере Tukon 2500 по методу Виккерса при нагрузке 0,2 Н и времени выдержки индентора 5 с.

5. Для оценки изменений поверхностных свойств образцов определялся краевой угол смачивания, что позволяло анализировать влияние струйной ВЧИ-обработки на гидрофильность и адгезионные характеристики поверхности.

Результаты

На рисунке 2 представлены характерные формы струйного высокочастотного индукционного разряда пониженного давления при различных значениях давления в рабочей камере, что позволяет проследить эволюцию пространственной структуры плазмы и характера плазменно-жидкостного взаимодействия в системе жидкая струя – плазма – твёрдое тело.

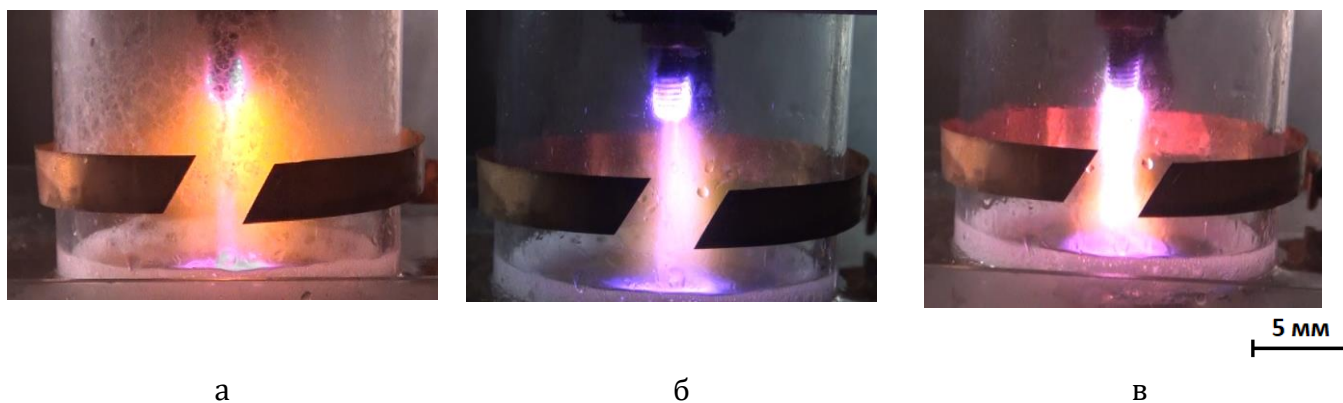


Рисунок 2 - Формы струйного ВЧИ-разряда при (а) – $P = 0,7 \text{ кгс/см}^2$, (б) – $P = 0,5 \text{ кгс/см}^2$ и (в) – $P = 0,1 \text{ кгс/см}^2$.

При давлении $P = 0,7 \text{ кгс/см}^2$ (рисунок 2а) разряд характеризуется компактной, локализованной формой горения, сосредоточенной вблизи выхода, струи из сопла. Плазменная область имеет относительно малую протяжённость вдоль струи и выраженную неоднородность свечения. Вблизи сопла наблюдается интенсивное

жёлто-оранжевое свечение, связанное с высокой концентрацией паров электролита и продуктов его термического разложения, а также с локализованным энерговодом в область формирования парогазовой оболочки. В этих условиях доминируют процессы интенсивного испарения жидкости и быстрого формирования плотной парогазовой среды, экранирующей электромагнитное поле и ограничивающей распространение плазмы вдоль струи. Разряд носит квазистационарный характер и отличается повышенной чувствительностью к гидродинамическим колебаниям струи.

При снижении давления до $P = 0,5 \text{ кгс/см}^2$ (рисунок 2б) наблюдается качественное изменение структуры разряда. Плазменная область становится более вытянутой и охватывает значительную часть длины струи жидкого электрода. Свечение приобретает более равномерный характер, при этом доминирующим становится фиолетовый цвет тела разряда, равномерно распределённый вдоль струи. Ослабление или практически полное исчезновение жёлтого свечения вблизи сопла свидетельствует о перераспределении энерговода в объём плазмы и снижении роли локальных процессов нагрева жидкости. В этих условиях формируется более устойчивая и структурированная плазменная зона, что указывает на оптимальное соотношение между плотностью парогазовой среды, глубиной проникновения высокочастотного электромагнитного поля и условиями возбуждения индукционного разряда.

При дальнейшем снижении давления до $P = 0,1 \text{ кгс/см}^2$ (рисунок 2в) разряд приобретает выраженно диффузный характер. Плазменная область существенно расширяется в радиальном направлении, а интенсивность свечения заметно снижается. Разряд становится менее структурированным, с размытыми границами и пониженной концентрацией плазмы вблизи поверхности жидкой струи. В условиях пониженной плотности парогазовой среды уменьшается эффективность индукционного энерговода, возрастает роль диффузионных процессов, а устойчивость разряда снижается. Наблюдаемая форма горения свидетельствует о переходе к режиму, при котором плазма слабо связана с жидким электродом и воздействие на поверхность твёрдого тела носит менее локализованный характер.

Изменение давления в системе оказывает определяющее влияние на

пространственную структуру и устойчивость струйного ВЧИ-разряда. При промежуточных значениях давления реализуются условия, обеспечивающие формирование протяжённой, квазистационарной и энергетически насыщенной плазменной области, наиболее благоприятной для контролируемого плазменно-жидкостного воздействия на поверхность аддитивно изготовленных изделий.

На рисунке 3 представлены гидродинамические и электрофизические характеристики струйного высокочастотного индукционного разряда, определяющие условия формирования и устойчивости плазменно-жидкостного взаимодействия в системе жидкая струя – плазма – твёрдое тело.

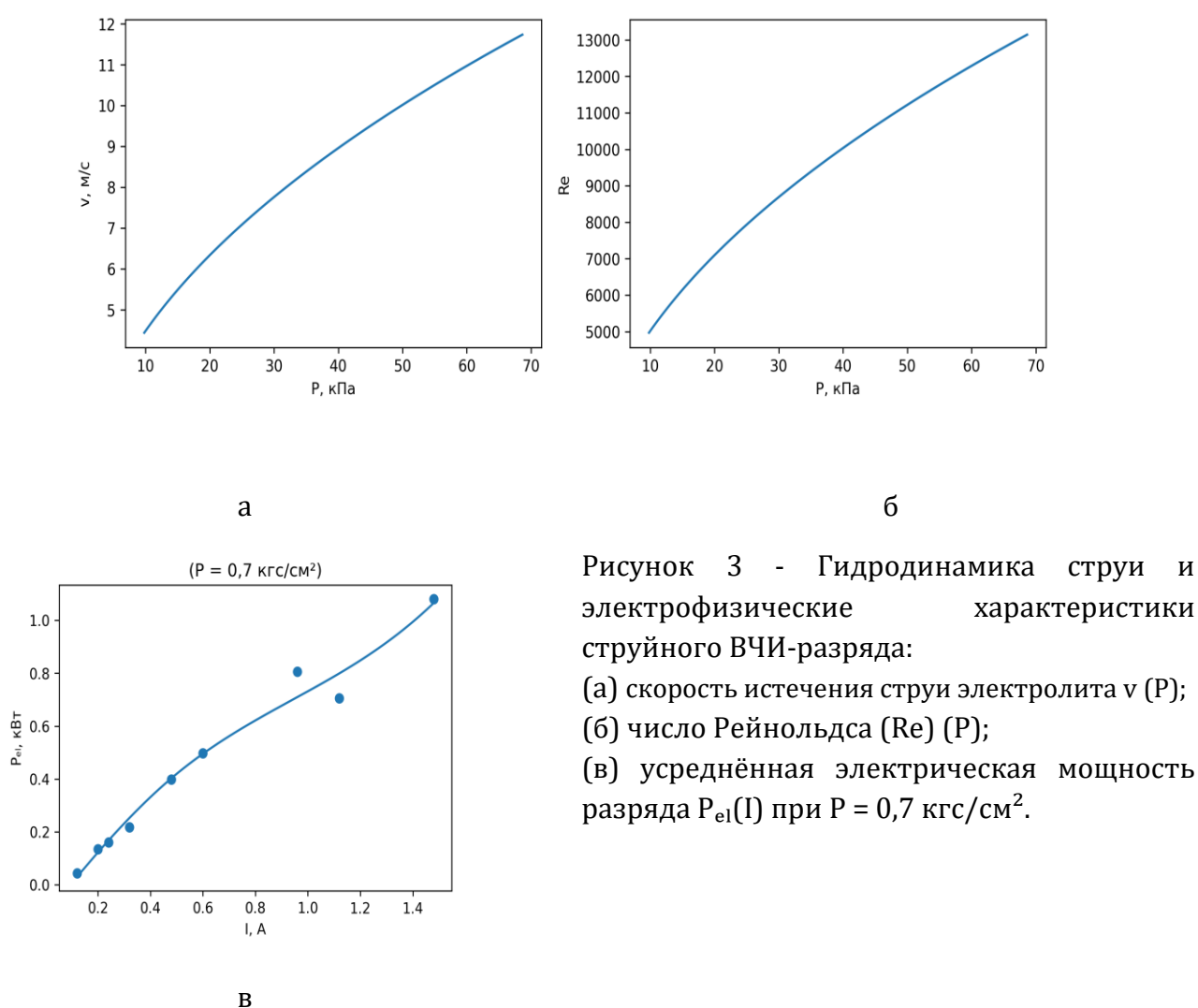


Рисунок 3 - Гидродинамика струи и электрофизические характеристики струйного ВЧИ-разряда:
 (а) скорость истечения струи электролита v (P);
 (б) число Рейнольдса (Re) (P);
 (в) усреднённая электрическая мощность разряда $P_{el}(I)$ при $P = 0,7 \text{ кгс/см}^2$.

На рисунке 3а показана зависимость скорости истечения струи электролита от давления в системе. Скорость определялась оценочно в предположении квазистационарного истечения несжимаемой жидкости по уравнению Бернулли. В исследуемом диапазоне давления $P = 0,1\text{--}0,7 \text{ кгс/см}^2$ скорость струи возрастает от

приблизительно 4,4 до 11,7 м/с. Увеличение скорости истечения сопровождается ростом расхода электролита и уменьшением характерного времени пребывания элемента жидкости в зоне высокочастотного электромагнитного поля. Это приводит к изменению условий тепло- и массообмена, интенсивности испарения жидкости и параметров формирующейся парогазовой оболочки, которая играет ключевую роль в возбуждении и поддержании ВЧИ-разряда.

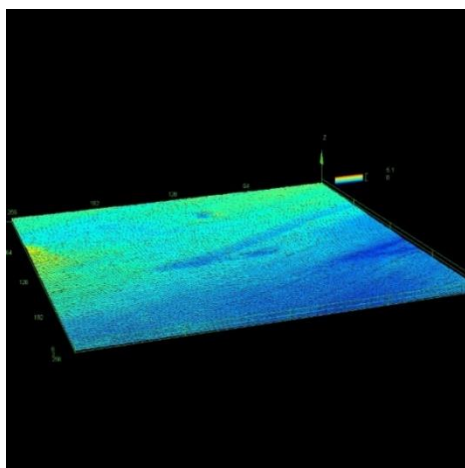
Рисунке 3б иллюстрирует изменение числа Рейнольдса струи в зависимости от давления. Значения Re , рассчитанные по характерному диаметру струи $d = 1$ мм и скорости истечения, лежат в диапазоне порядка $(5-13) \times 10^3$, что соответствует переходному и турбулентному режимам течения. Рост числа Рейнольдса при увеличении давления указывает на усиление инерционных эффектов и возрастание роли гидродинамических неустойчивостей струи. Такие неустойчивости приводят к флуктуациям формы струи и толщины парогазовой оболочки, что, в свою очередь, отражается на пространственной структуре плазменной области и степени нестационарности струйного ВЧИ-разряда. Таким образом, гидродинамический режим струи является одним из определяющих факторов, контролирующих характер горения разряда.

На рисунке 3в представлена усреднённая зависимость электрической мощности струйного ВЧИ-разряда от тока при давлении $P = 0,7$ кгс/см². Мощность рассчитывалась как произведение измеренных значений напряжения и тока разряда; для одинаковых значений тока выполнено усреднение по сериям измерений, после чего зависимость аппроксимирована сглаживающей кривой. Видно, что электрическая мощность возрастает нелинейно с увеличением тока и достигает значений порядка 1 кВт. Нелинейный характер зависимости свидетельствует о перераспределении энерговода в плазменной области, росте её проводимости и увеличении плотности носителей заряда по мере интенсификации разряда. Повышение вводимой мощности сопровождается переходом от локализованных к более протяжённым и энергетически насыщенным формам струйного ВЧИ-разряда, наблюдаемым при визуализации.

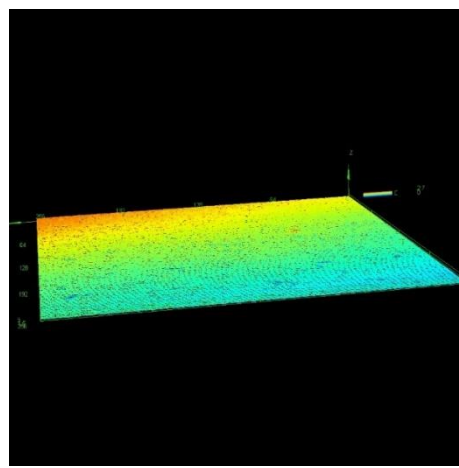
В совокупности представленные зависимости демонстрируют тесную взаимосвязь между гидродинамическими параметрами жидкой струи и

электрофизическими характеристиками разряда. Изменение давления приводит одновременно к изменению скорости и режима течения струи, структуры парогазовой оболочки и условий энерговвода в плазму, что определяет пространственную форму и устойчивость струйного ВЧИ-разряда и, как следствие, характер его воздействия на поверхность аддитивно изготовленного изделия.

На рисунке 4 представлены трёхмерные модели морфологии поверхности образца, изготовленного методом аддитивного производства, до и после плазменно-жидкостной обработки в режиме струйного ВЧИ-разряда.



а



б

Рисунок 4 - 3D модель морфологии поверхности образца (а) до и (б) после плазменно-жидкостной обработки.

На поверхности образца до обработки (рисунок 4а) отчётливо прослеживается характерный для аддитивных технологий микрорельеф, сформированный в результате послойного лазерного сплавления порошка. Морфология поверхности отличается выраженной неоднородностью, наличием локальных выступов и впадин, обусловленных частичным оплавлением частиц порошка, а также остаточной микропористостью. Количественный анализ шероховатости показывает, что исходное состояние поверхности характеризуется значениями параметров $R_z = 0,351$ мкм и $R_a = 0,091$ мкм, что соответствует умеренно развитому микрорельефу с выраженными высотными неоднородностями.

После плазменно-жидкостной обработки (рисунок 4б) наблюдается заметное сглаживание микрорельефа поверхности. Трёхмерная модель демонстрирует снижение амплитуды высотных неоднородностей, уменьшение количества острых микровыступов и более равномерное распределение неровностей по поверхности.

При этом сохраняется общий характер текстуры, типичный для аддитивно изготовленных изделий, однако микрорельеф становится более однородным и изотропным.

Измерения параметров шероховатости подтверждают выявленные морфологические изменения: после обработки значения R_z и R_a уменьшаются до 0,322 мкм и 0,079 мкм соответственно. Снижение параметра R_z указывает на уменьшение максимального перепада высот микронеровностей, тогда как уменьшение R_a свидетельствует об общем сглаживании поверхности и снижении средней арифметической высоты профиля. Такие изменения могут быть связаны с локальным перераспределением материала в поверхностном слое под действием плазменно-жидкостного разряда, а также с интенсивными процессами теплообмена и кратковременного микроплавления вершин микронеровностей.

Сопоставление полученных значений параметра R_a с классификацией шероховатости по ГОСТ 2789–73 показывает, что исходное состояние поверхности образца с $R_a = 0,091$ мкм соответствует восьмому классу шероховатости. После плазменно-жидкостной обработки значение R_a уменьшается до 0,079 мкм, что соответствует переходу поверхности к девятому классу шероховатости.

На рисунке 5 представлены результаты измерения краевого угла смачивания поверхности образца до и после плазменно-жидкостной обработки в режиме струйного ВЧИ-разряда.



Рисунок 5 - Краевой угол смачивания поверхности образца (а) до и (б) после плазменно-жидкостной обработки.

Для поверхности до обработки (рисунок 5а) величина краевого угла смачивания составляет 67,6°, что соответствует умеренно гидрофильному состоянию поверхности. Такое значение характерно для аддитивно изготовленных металлических образцов с развитым микрорельефом и наличием поверхностных оксидных и адсорбированных слоёв, формирующих относительно высокую поверхностную энергию.

После плазменно-жидкостной обработки (рисунок 5б) наблюдается увеличение краевого угла смачивания до 72,4°. Рост угла смачивания свидетельствует об уменьшении гидрофильности поверхности и смещении её состояния в сторону более гидрофобного. Данное изменение указывает на перераспределение поверхностной энергии и модификацию приповерхностного слоя материала под действием плазменно-жидкостного разряда.

Увеличение краевого угла смачивания может быть связано с совокупным влиянием нескольких факторов. Во-первых, плазменно-жидкостная обработка приводит к сглаживанию микрорельефа поверхности, что подтверждается снижением параметров шероховатости (R_a и R_z). Согласно моделям Вензеля и Касси – Бакстера, уменьшение микрошероховатости на исходно гидрофильной поверхности может приводить к росту краевого угла за счёт ослабления капиллярного эффекта. Во-вторых, воздействие плазмы и парогазовой оболочки может сопровождаться изменением химического состояния поверхностного слоя, в частности перераспределением оксидных фаз и удалением адсорбированных полярных групп, что также способствует снижению поверхностной энергии.

В таблице 1 приведены результаты измерения микротвёрдости поверхностного слоя образца после плазменно-жидкостной обработки в режиме струйного ВЧИ-разряда.

Таблица 1

Микротвёрдость поверхностного слоя образца, измеренная по методу Виккерса при нагрузке 0,2 Н.

№	Первое значение HV0,2	Второе значение HV0,2	Ср. значение	$\Delta H = \frac{H - H_0}{H_0} 100\%$
1.	183	190	186,5	11,34%

Измерения проводили по методу Виккерса при нагрузке 0,2 Н (HV0,2); для повышения достоверности результатов микротвёрдость определялась в двух независимых точках, после чего рассчитывалось среднее значение.

Полученные значения микротвёрдости составили 183 и 190 HV0,2 при среднем значении 186,5 HV0,2. Для количественной оценки эффекта плазменно-жидкостной обработки использовалась относительная величина изменения микротвёрдости, определяемая как ΔH , где H — микротвёрдость после обработки, H_0 — микротвёрдость исходного состояния поверхности. В результате установлено, что относительное увеличение микротвёрдости поверхностного слоя составляет 11,34 %.

Рост микротвёрдости после плазменно-жидкостной обработки может быть обусловлен комплексом факторов, включая локальное термическое воздействие плазмы, высокие скорости нагрева и охлаждения поверхностного слоя, а также возможное формирование мелкодисперсной структуры и упрочняющих оксидных или субоксидных фаз. Существенную роль также может играть релаксация остаточных растягивающих напряжений, характерных для аддитивно изготовленных изделий, и их частичная замена сжимающими напряжениями в приповерхностной области.

Заключение

В работе экспериментально исследованы особенности формирования и воздействия струйного высокочастотного индукционного разряда пониженного давления при взаимодействии с жидким электродом и поверхностью аддитивно изготовленного металлического образца. Показано, что давление в системе является ключевым параметром, определяющим скорость истечения струи, режим её течения и, как следствие, структуру и устойчивость плазменно-жидкостного разряда. В исследуемом диапазоне параметров реализуются переходный и турбулентный режимы течения струи, оказывающие существенное влияние на динамику парогазовой оболочки и условия энерговода в плазму. Установлено, что электрическая мощность струйного ВЧИ-разряда при фиксированном давлении возрастает нелинейно с увеличением тока, что связано с ростом проводимости плазменной области и перераспределением энерговода в системе «жидкая струя –

плазма». Плазменно-жидкостная обработка приводит к сглаживанию микрорельефа поверхности, снижению параметров шероховатости Ra и Rz и повышению класса шероховатости по ГОСТ на один уровень. Одновременно наблюдается контролируемое изменение смачиваемости поверхности и увеличение микротвёрдости поверхностного слоя более чем на 10 %, что свидетельствует о комплексном характере модификации приповерхностной области материала.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Список источников

1. Райзер Ю.П., Шнейдер М., Яценко Н.Н. Высоочастотный ёмкостный разряд: физика, техника эксперимента, приложения. М. : Наука, 1995. 320 с.
2. Влияние параметров разряда с жидким электродом на свойства образующихся частиц ферромагнитного материала / Л.М. Котляр, Е.А. Кочнева, Г.Ю. Шакирова, Т.Е. Заборовски // Физика и химия обработки материалов. 2015. № 5. С. 83–88.
3. Кинетика искровых разрядов на жидком электроде / А.М. Орлов, И.О. Явтушенко, О.Г. Рыикова, Д.С. Боднарский // Физика и химия обработки материалов. 2016. № 2. С. 83–90.
4. О динамике развития и результатах действия электрического разряда в водной среде / А.В. Хлюстова, Н.А. Сироткин, А.В. Агафонов, М.А. Степович, М.Н. Шипко // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2023. № 2. С. 57–62.
5. Тазмеев Г.Х., Тазмеев А.Х., Тазмеев Х.К. Особенности протекания тока в разряде с жидким катодом, приготовленным из водного раствора хлорида натрия // Прикладная физика. 2023. № 3. С. 33–38.
6. Получение фитоактивных продуктов путём газоразрядной обработки водной суспензии хитозана / И.К. Наумова, В.А. Титов, А.В. Хлюстова, А.В. Агафонов // Прикладная физика. 2023. № 5. С. 84–90.

7. Баринов Ю.А., Школьник С.М. Разряд с жидким неметаллическим катодом (водопроводная вода) в потоке воздуха атмосферного давления // Журнал технической физики. 2016. Т. 86, № 11. С. 155–158.
8. Создание неравновесной плазмы в гетерофазных средах газ – жидкость при атмосферном давлении и демонстрация её возможностей для стерилизации / Ю.С. Акишев, М.Е. Грушин, В.Б. Каральник и др. // Физика плазмы. 2006. Т. 32, № 12. С. 1142–1152.
9. Кинетика двухфазных газожидкостных сред в процессах электролиза / Р.Н. Кашапов, Л.Н. Кашапов, Н.Ф. Кашапов, В.Ю. Чебакова // Теплофизика высоких температур. 2021. Т. 59, № 6. С. 869–876.
10. Сироткин Н.А., Титов В.А. Экспериментальное исследование нагрева жидкого катода и переноса его компонентов в газовую фазу под действием разряда постоянного тока // Прикладная физика. 2016. № 6. С. 25–31.
11. Гайсин Ал.Ф., Сон Э.Е., Петряков С.Ю. Высокочастотный ёмкостный разряд с проточными жидкими электродами при понижении давления // Физика плазмы. 2017. Т. 43, № 7. С. 625–633.
12. Гайсин Ал.Ф., Гильмутдинов А.Х., Мирханов Д.Н. Электролитно-плазменная обработка поверхности детали, изготовленной с применением аддитивной технологии // Металловедение и термическая обработка металлов. 2018. № 2. С. 69–74.
13. Гайсин Ал.Ф. Исследование воздействия низкотемпературной плазмы парогазовых разрядов с электролитическими электродами при пониженном давлении на изделие сложной геометрической формы // Физика и химия обработки материалов. 2016. № 3. С. 22–26.
14. Панов В.А., Савельев А.С., Куликов Ю.М. Направленный электрический разряд в воде по каналу с ионами соли NaCl // Прикладная физика. 2025. № 6. С. 38–43.
15. Анализ течений при лазерно-акустической обработке нержавеющей стали AISI 316L / С.А. Никифоров, И.В. Шварц, А.Х. Гильмутдинов, А.И. Горунов // Вычислительная механика сплошных сред. 2024. Т. 17, № 2. С. 133–142.

References

1. Raizer Yu.P., Schneider M., Yatsenko N.N. *Vysokochastotnyi emkostnyi razryad: fizika, tekhnika eksperimenta, prilozheniya* [High-Frequency capacitive discharge: physics, experimental techniques, applications], Moscow, Nauka, 1995. 320 p.
2. Kotlyar L.M., Kochneva E.A., Shakirova G.Yu., Zaborovski T.E. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*, 2015, no. 5, pp. 83–88.
3. Orlov A.M., Yavtushenko I.O., Rynkova O.G., Bodnarskii D.S. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*, 2016, no. 2, pp. 83–90.
4. Khlyustova A.V., Sirotkin N.A., Agafonov A.V., Stepovich M.A., Shipko M.N. Dynamics and effects of electric discharge development in water medium. *Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2023, vol. 17, no. 2. pp. 273–278.
5. Tazmeev G.Kh., Tazmeev A.Kh., Tazmeev Kh.K. *Prikladnaya fizika*, 2023, no. 3, pp. 33–38.
6. Naumova I.K., Titov V.A., Khlyustova A.V., Agafonov A.V. *Prikladnaya fizika*, 2023, no. 5, pp. 84–90.
7. Barinov Yu.A., Shkol'nik S.M. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 2016, vol. 61, no. 11. pp. 1727–1730.
8. Akishev Yu.S., Grushin M.E., Karal'nik V.B. et al. *Fizika plazmy*, 2006, vol. 32, no. 12. pp. 998–1008.
9. Kashapov R.N., Kashapov L.N., Kashapov N.F., Chebakova V.Yu. *Teplofizika vysokikh temperature*, 2021, vol. 59, no. 6, pp. 823–830.
10. Sirotkin N.A., Titov V.A. *Prikladnaya fizika*, 2016, no. 6, pp. 25–31.
11. Gaisin Al.F., Son E.E., Petryakov S.Yu. *Fizika plazmy*, 2017, vol. 43, no. 7, pp. 741–748.
12. Gaysin Al.F., Gil'mutdinov A.K., Mirkhanov D.N. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2018, vol. 60, no. 1–2. pp. 128–132.
13. Gaisin Al.F. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*, 2017, vol. 8, no. 3, pp. 392–396.
14. Panov V.A., Savel'ev A.S., Kulikov Yu.M. *Prikladnaya fizika*, 2025, no. 6, pp. 38–43.

15. Nikiforov S.A., Shvarts I.V., Gil'mutdinov A.Kh., Gorunov A.I. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred*, 2024, vol. 17, no. 2, pp. 133–142.

Информация об авторах

Рушан Рашитович Каюмов, к.т.н., доцент кафедры технической физики ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ», Казань, Россия; специалист в области механики жидкости, газа и плазмы; e-mail: almaz87@mail.ru

Ильдар Шаукатович Абдуллин, д.т.н., профессор, научный сотрудник ООО «Плазма - ВСТ», Казань, Россия; специалист в области физики и применения ВЧ-разрядов; e-mail: plasma.vst@gmail.com

Фивзат Миннебаевич Гайсин, д.ф.-м.н., профессор кафедры технической физики ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ», Казань, Россия; специалист в области физики и применения плазменно-жидкостных систем; e-mail: almaz87@mail.ru

Алмаз Фивзатович Гайсин, д.т.н., заведующий кафедрой технической физики ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ», Казань, Россия; специалист в области физики и применения плазменно-жидкостных систем; e-mail: almaz87@mail.ru

Ирина Тагировна Фахрутдинова, к.т.н., доцент кафедры технической физики ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ», Казань, Россия; специалист в области механики жидкости, газа и плазмы; e-mail: almaz87@mail.ru

Information about the authors

Rushan R. Kayumov, Candidate of Technical Sciences (Ph.D. in Engineering), Associate Professor of the Department of Technical Physics, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia; specialist in the field of fluid, gas, and plasma mechanics; e-mail: almaz87@mail.ru

Ildar Sh. Abdullin, Doctor of Engineering, Professor, Research Associate at Plasma-VST LLC, Kazan, Russia; specialist in the physics and application of RF discharges; e-mail: plasma.vst@gmail.com

Fivzat M. Gaisin, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Department of Technical Physics, KNITU-KAI, Kazan, Russia; specialist in the physics and application of plasma-liquid systems; e-mail: almaz87@mail.ru

Almaz F. Gaisin, Doctor of Engineering, Head of the Department of Technical Physics, KNITU-KAI, Kazan, Russia; specialist in the physics and application of plasma-liquid systems; e-mail: almaz87@mail.ru

Irina T. Fakhrutdinova, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Department of Technical Physics, KNITU-KAI, Kazan, Russia; specialist in fluid, gas, and plasma mechanics; e-mail: almaz87@mail.ru

Получено 28 мая 2026 ● Принято к публикации 01 августа 2026 ● Опубликовано 31 августа 2026
Received 28 May 2026 ● Accepted 01 August 2026 ● Published 31 August 2026
