

УДК 532.5:533.9

ПРОТЯЖЕННЫЕ СИЛЬНОТОЧНЫЕ ДУГОВЫЕ РАЗРЯДЫ ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ В ГАЗОВЫХ СРЕДАХ

© 2025 г. А. П. Глинов*, А. П. Головин**, П. В. Козлов***

МГУ им. М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт механики, Москва, Россия

*e-mail: glshur@imec.msu.ru

**e-mail: gnka_golovin_apsf@mail.ru

***e-mail: kalevala@mail.ru

Поступила в редакцию 07.10.2025 г.

После доработки 10.03.2025 г.

Принята к публикации 13.03.2025 г.

Экспериментально и теоретически исследованы протяженные (до нескольких десятков сантиметров) сильноточечные (сотни ампер) электрические дуги в разных газах атмосферного давления. Изучение таких разрядов проведено на электроразрядном стенде установки П-2000 НИИ механики МГУ. В работе уточнены данные о влиянии внешнего магнитного поля на устойчивость таких разрядов и образование разветвленных токовых каналов. Одно из направлений проведенных исследований — изучение влияния ориентации наложенного на дугу магнитного поля на процессы развития разряда в разных газовых средах, таких как воздух, CO_2 , Ar, N_2 . Наиболее полно представлены данные для аргона и азота. Эксперименты проведены в камере с прозрачными стенками. Расчетно-теоретическое исследование проведено на основе электротехнической модели с использованием эмпирических данных по вольт-амперным характеристикам дуг между графитовыми электродами. Выявлено, что на устойчивость горения сильноточечных дуг существенное влияние оказывает динамика электродных струй-факелов. Традиционные же модели дуг во внешнем магнитном поле без учета этих факторов показывают, что направление внешнего аксиального поля не влияет на стабильность дуг, влияя лишь на направление их закрутки при развитии винтовой неустойчивости.

Ключевые слова: протяженная электрическая дуга, магнитное поле, разрядная камера, графитовые электроды, инициирование разряда

DOI: 10.31857/S1024708425030057

Известно, что сильноточечные протяженные дуговые разряды атмосферного давления (без принятия специальных мер стабилизации) неустойчивы и склонны к самогашению, что продемонстрировано, например в [1–5]. Принятие специальных мер стабилизации (наложение внешнего магнитного поля, стабилизация изоляционными стенками или потоками газов, согласование электродных узлов и др.) позволяет существенно расширить границы стабильности разряда. Это дает принципиальную возможность применения его плазмы в некоторых технических приложениях, например, таких как якорь рельсовых ускорителей, или рабочей среды иных электрофизических установок, например плазмотронов. Ранее на электроразрядном стенде лаборатории общей гидромеханики института механики МГУ было показано, что оптимизация режимов раздвижки электродов и согласование электродных узлов позволяет получать стабильное горение дуг в открытой воздушной атмосфере. Этот результат обеспечивался вплоть до межэлектродных расстояний 30 см [6–11]. При этом для контроля характеристик плазмы могут применяться подходы на основе обработки данных ее спектральной диагностики, как например в [10, 12]. В настоящей работе приведены данные об исследованиях стабильности протяженных дуг в разрядных камерах за счет оптимизации (подбора) разрядной среды.

1. ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ

Основные эксперименты проведены в разрядной камере (рис. 1а) с цилиндрическими боковыми стенками из кварцевого электровакуумного стекла толщиной 7 мм. Камера снабжена системой колец Гельмгольца

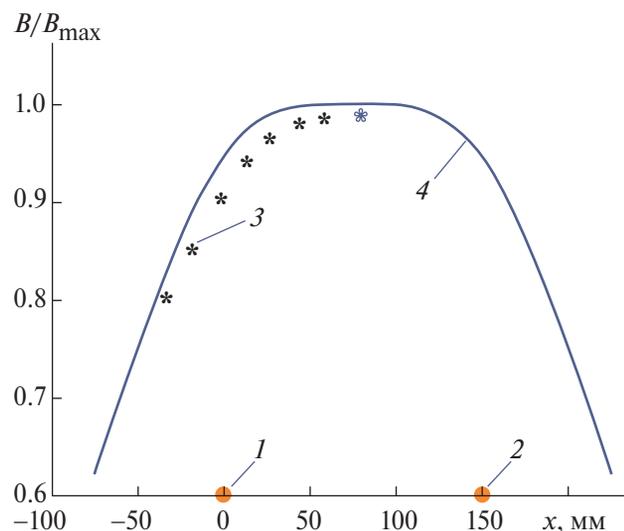


Рис. 1. Разрядная камера с магнитной системой в виде двух колец Гельмгольца (а) и распределение аксиального магнитного поля катушки вдоль вертикальной оси x : 1, 2 — кольца катушки; 3, 4 — экспериментальные и расчетные данные соответственно (б).

для создания вертикального магнитного поля (рис. 1б). Высота и диаметр — 250 мм. Рассмотрены вертикально ориентированные разряды. Исследовались дуги между графитовыми (ЗОПГ) электродами разных диаметров (6–150 мм). Теоретическое моделирование таких разрядов проведено в электротехническом приближении на основе классических эмпирических данных Г. Айртона.

Инициация дугового разряда осуществляется путем смыкания электродов, находящихся под электрическим напряжением, и дальнейшего их раздвижения до выбранного межэлектродного зазора l_0 (рис. 2). Типичные естественные возмущения зазора, обусловленные несовершенством (недостаточной настройкой) системы электромеханической раздвижки электродов даны на рис. 3а. Для проведения же специальных экспериментальных исследований заданных возмущений зазора используется устройство на основе линейных модулей фрезерных станков с программируемым законом раздвижки электродов [7]. Характерный вид налагаемых локальных возмущений приведен на рис. 3б.

Характерное время раздвижки электродов t_0 составляет в экспериментах 0.1–0.2 с. Синхронно с видеоизображениями снимались и осциллограммы тока $I(t)$ и напряжения $U(t)$ на разрядном промежутке. Проводятся также пирометрические измерения температуры катода пирометром типа “ДИЭЛТЕСТ”. В общем случае изучается протяженный электродуговой разряд с квазистационарными токами в газовой среде атмосферного давления на графитовых электродах, иногда и при наличии внешнего магнитного поля, обеспечиваемого той или иной магнитной системой (МС). Электроды графитовые. Разрядные токи — сотни А, напряжения — до 200 В. Основные катоды — стержневые, их диаметры $d_k = 6–16$ мм, аноды —

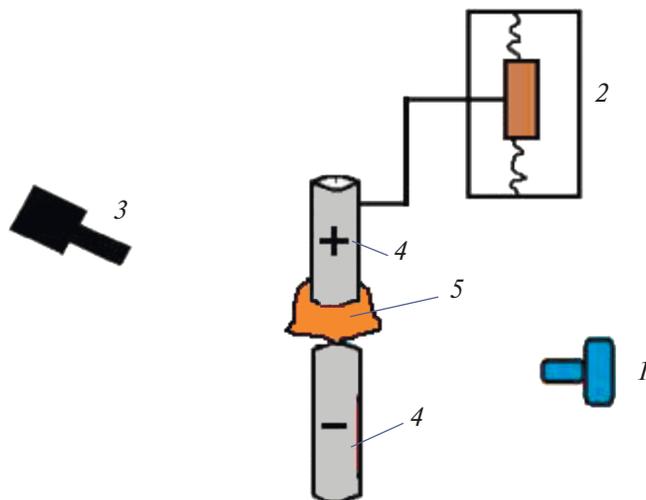


Рис. 2. Схема иницирования разряда и его визуализации и пирометрии: 1 — видеокамера, 2 — механизм раздвижки электродов, 3 — пирометр, 4 — электроды, 5 — дуга.

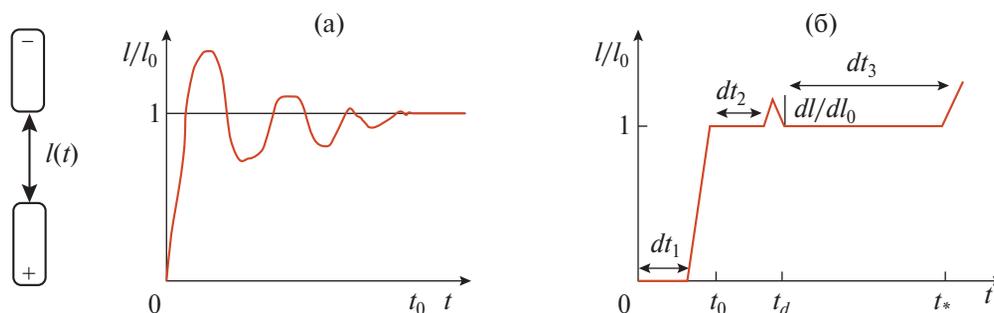


Рис. 3. Разрядная камера с магнитной системой в виде двух колец Гельмгольца (а) и распределение аксиального магнитного поля катушки вдоль вертикальной оси x : 1, 2 — кольца катушки; 3, 4 — экспериментальные и расчетные данные соответственно.

стержни диаметром $d_a = 16$ мм и прямоугольные призмы с контактной поверхностью $S_a = 600-2400$ мм². Теоретическое моделирование дуг — задача достаточно сложная и непростая, даже в рамках упрощенных физико-математических моделей. Одно из направлений — анализ устойчивости в линейном приближении [13, 14], другое — прямое численное моделирование [15, 16].

2. РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Математическое моделирование разрядных электродуговых процессов (с учетом всех существенных физических факторов) весьма сложная и на сегодняшний день не решенная задача. Это относится как к постановкам задач, так и к программно-алгоритмическим разработкам для них. Следует отметить, что наряду с физическими процессами в самом разрядном канале и окружающей среде важны процессы в электродах, изоляторах, внешней цепи. Большая сложность возникает в построении и замыкании моделей переноса зарядов и нейтральных частиц в пограничных зонах между разнородными средами. Проблемы доступности (наличия) баз данных и проблемы многих, сильно различающихся, пространственных и временных масштабов — тоже очень существенны. В результате исследователи в области электрофизики ограничиваются решением модельных задач [17, 18]. Зачастую оказывается быстрее провести только экспериментальные исследования [19].

Среди теоретических работ, посвященных изучению гидродинамических течений в зазорах (без учета протекающих токов) отметим работу [20]. В ней рассмотрены модельные автомодельные течения вязкой жидкости между раздвигающимися параллельными пластинами. Математически такие, даже чисто гидродинамические задачи, достаточно сложные. Поэтому нами была предпринята попытка промоделировать влияние раздвижки электродов на стабильность горения протяженных сильноточных дуг не только экспериментально, но и на основе решения задач в рамках электротехнической модели при различных начальных условиях и параметрах внешней цепи.

В настоящей работе применяется упрощенный инженерный электротехнический подход моделирования на основе эмпирических данных по вольтамперным аппроксимациям дуг [11, 21].

$$L \frac{dI}{dt} = \varepsilon - IR - u(l, I), \tag{2.1}$$

$$u = a + bl + \frac{c + dl}{I}, \tag{2.2}$$

$$l = l(t) = \begin{cases} V_0 t, & t < t_0 = l_0/V_0, \\ l_0 [1 + \alpha \exp(-\gamma(t - t_0)) \sin \omega(t - t_0)], & t \geq t_0. \end{cases} \tag{2.3}$$

В этих формулах: (2.1) — уравнение Кирхгофа, (2.2) — падение напряжения дуги U в межэлектродном зазоре l (так называемая аппроксимация Н. Ауртона [21]). Формула (2.3) — заданная форма изменения зазора l со временем t . Эта форма эмпирическая, основана на обработке и аппроксимации наших многолетних экспериментальных данных, приводилась ранее для расчетов в работе [10]. Величины L, R, I и ε — индуктивность, балластное сопротивление, разрядный ток и ЭДС источника его питания соответственно. Параметр модели: $V_0 = const$ — скорость раздвижки электродов на требуемое расстояние (зазор) l_0 . Константы Н. Ауртона (a, b, c, d) зависят прежде всего от разрядной среды и материалов электродов. Параметры γ, ω и α — декремент, частота и амплитуда колебаний межэлектродного зазора от его “рабочего” (стационарного) значения l_0 .

На рис. 4 даны безразмерные зависимости от времени зазора, тока и напряжения.

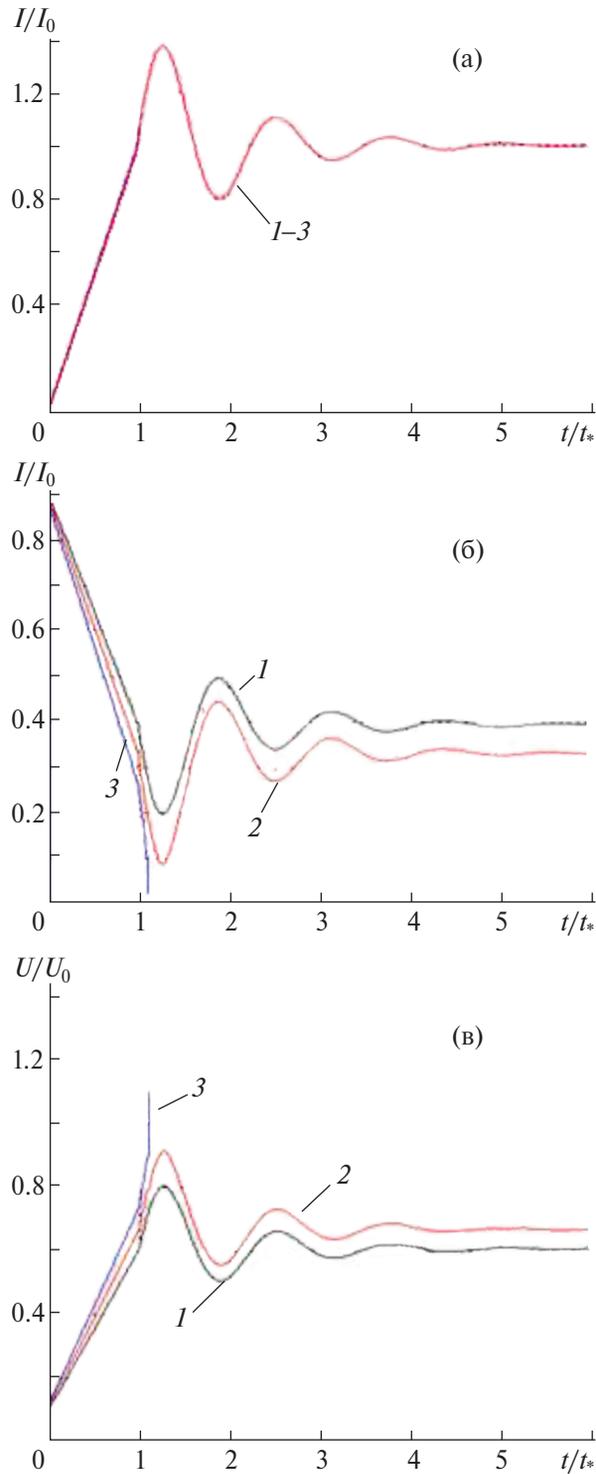


Рис. 4. Влияние нормированной ЭДС(ϵ), безразмерные: зазор (а), ток (б), напряжение (в); базовый вариант $\epsilon = \epsilon_6$ (1); $\epsilon_6/1.1$ (2); $\epsilon_6/1.12$ (3).

Масштабы обезразмеривания тока, напряжения, зазора и времени следующие:

$$I_* = \frac{I_m}{R}, \quad U_* = \epsilon, \quad l_* = l_0, \quad t_* = t_c.$$

Кривые базового варианта (2.1), отвечают следующим параметрам:

$$\frac{a}{\epsilon} = 0.1, \quad \frac{\omega l_0}{V_0} = 5, \quad \frac{b l_0}{\epsilon} = 0.5,$$

$$\frac{\gamma l_0}{V_0} = 1, \quad \frac{l_0 R}{V_0 L} = 2 \cdot 10^5, \quad \frac{dl_0}{c} = 60,$$

$$\frac{cR}{\varepsilon} = 1.7 \cdot 10^{-4}, \quad \alpha = 0.5.$$

Межэлектродное расстояние (l), разрядный ток (I) и напряжение (U) представлены на рис. 4а, в соответственно. Набором кривых (1–3) отмечены вариации параметра ЭДС. Он имеет ключевое значение на стабильность горения дуги при повышении технической надежности системы раздвижки. Тогда (при обеспечении этой надежности) соответствующий параметр пренебрежимо мал: $\alpha \ll 1$. В частности, вариант, отвечающий кривым (3), показывает пример самогашения дуги при недостаточности ЭДС для поддержания разряда. Как отмечено в [7], а также на основе экспериментальных данных данной работы, масштабные возмущения зазора ($l' = l - l_0$) от 10% и более от его стационарного значения l_0 также очень опасны, как и недостаточность ЭДС.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Если не оговорено противное, эксперименты в настоящей работе проведены при идеально (жестко) стабилизированной системе раздвижки электродов ($\alpha = 0$ при достижении заданного стационарного зазора l_0).

Были рассмотрены для межэлектродной среды разные газы: воздух и некоторые его важные для технических приложений составляющие: аргон, азот, углекислый газ. Оказалось, что из рассмотренных газов предпочтителен именно аргон (см. рис. 5, 6). Он требует меньших падений напряжения и обеспечивает более устойчивое горение. Однако, потенциал его ионизации выше, чем у его конкурентов, рассматриваемых газов. Возможно, что преимущества аргона обусловлены большей стабильностью катодной струи аргоновой плазмы и несколько большим испарением материала графитового катода в аргоновой среде. У графита потенциал ионизации ниже, чем у аргона. Для уточнения результатов необходимы дальнейшие расчетно-теоретические и экспериментальные исследования. Некоторые оценки гидродинамических характеристик электродных факелов приведены в табл. 1.

Здесь число Рейнольдса оценивалось по формуле

$$\text{Re} = \frac{\rho V \delta}{\mu}.$$

Величины ρ_0 , μ_0 — плотность и динамическая вязкость среды факелов при атмосферном давлении и температуре $T_0 = 300$ К. Температура $T = 6$ кК. Скорость V порядка 10 м/с. Эффективный (средний) диаметр $\delta = 6$ мм. Обычно в экспериментах последних лет на П2000 число Re находится в пределах 0.5–5.

Вязкость оценивалась по политропному закону [22]

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^n, \quad n = 0.76.$$

При составлении табл. 1 использовались справочники [23, 24].

Влияние амплитуды возмущений зазора отражено на рис. 7.

Видно, что возмущения зазора (l_0) от 10% и более от l_0 очень опасны (см. рис. 7в–е). Они вызывают резко нестационарные колебания большой амплитуды тока и напряжения на протяжении всего времени разряда. При этом форма токового столба дуги и электродных факелов также нестабильна.

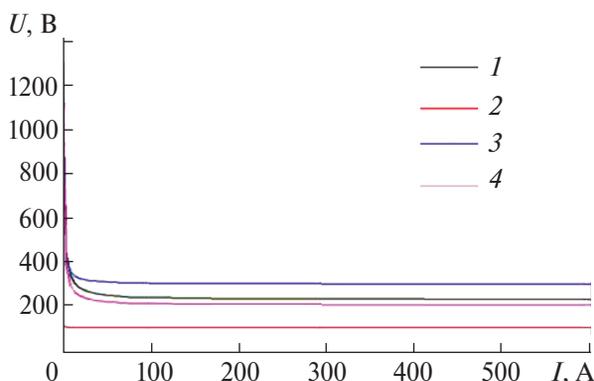


Рис. 5. Рассчитанные по модели [21] вольтамперные характеристики дуг между графитовыми электродами в разных газах: воздух (1), азот N_2 (2), аргон Ar (3), углекислый газ CO_2 (4)

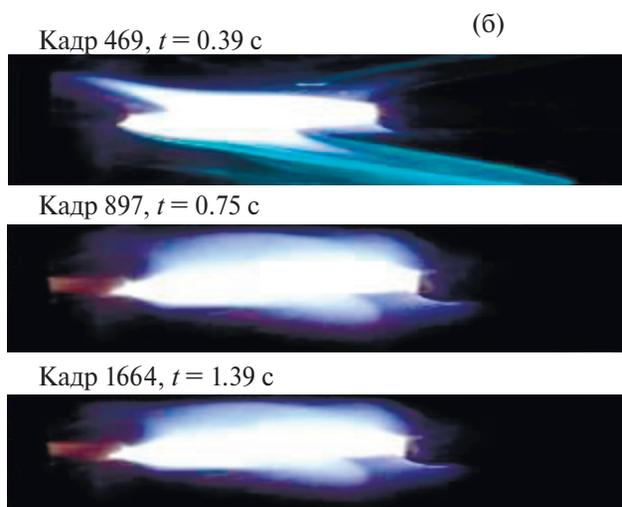
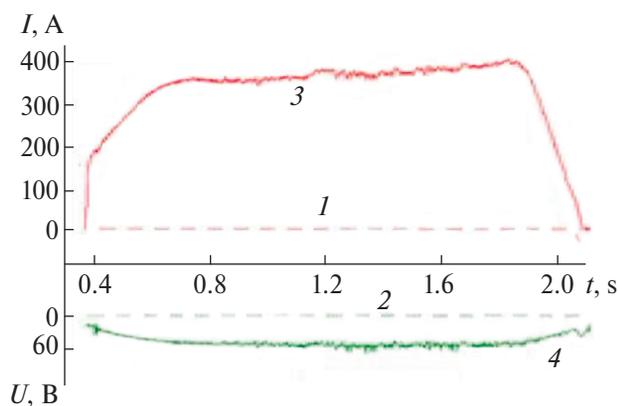


Рис. 6. Стабилизация разряда в аргонной среде: осциллограммы тока и напряжения (а) и видеокadres (б) в указанные моменты времени t ; зазор $l_0 = 50$ мм, частота видеорегистрации $f = 1200$ кадр/с.

Таблица 1.

Параметры	Воздух	Ar	N ₂	CO ₂	He	O ₂
ρ_0 , кг/м ³	1.29	1.784	1.25	1.98	0.179	1.47
μ_0 , мПа с	0.0182	0.02108	0.0175	0.147	0.0196	0.0202
Re	0.4364	0.5211	0.4398	0.8293	0.0562	0.4482

Сводный набор данных экспериментальных результатов без наложения на разряд внешнего магнитного поля представлен в табл. 2.

Как видно, аргонная среда способна обеспечивать стабильность разряда атмосферного давления при существенно меньших приложенных электрических напряжениях и разрядных зазорах, чем другие газовые среды.

В табл. 2 обозначены: активные поверхности анода и катода (S_a и S_k), ток и падение напряжения на разрядном промежутке (I , U), зазор (l).

Влияние ориентации внешнего аксиального магнитного поля в разных газах характеризуют рис. 8–12. На этих рисунках прослеживается достаточно подробно динамика изменения формы дугового столба и электродных факелов. Подробность представления кадров обусловлена стремлением отследить наиболее ощутимые эффекты воздействия ориентации магнитного поля.

Однако, как следует из приведенных подробных видеокadres разряда, эффекты с наложением на вертикальный разряд продольного магнитного поля, связанные со сменой его направления, проявляются достаточно слабо. В качестве примера приводятся результаты экспериментов в среде аргона. В них наиболее сильно заметно влияние наложения магнитного поля и смены его полярности на горение разряда.

Особый интерес авторов вызывает разряд в газе CO₂, и как одном из составных элементов воздушной среды и как продукт ее загрязнения вследствие бурного роста мировой экономики.

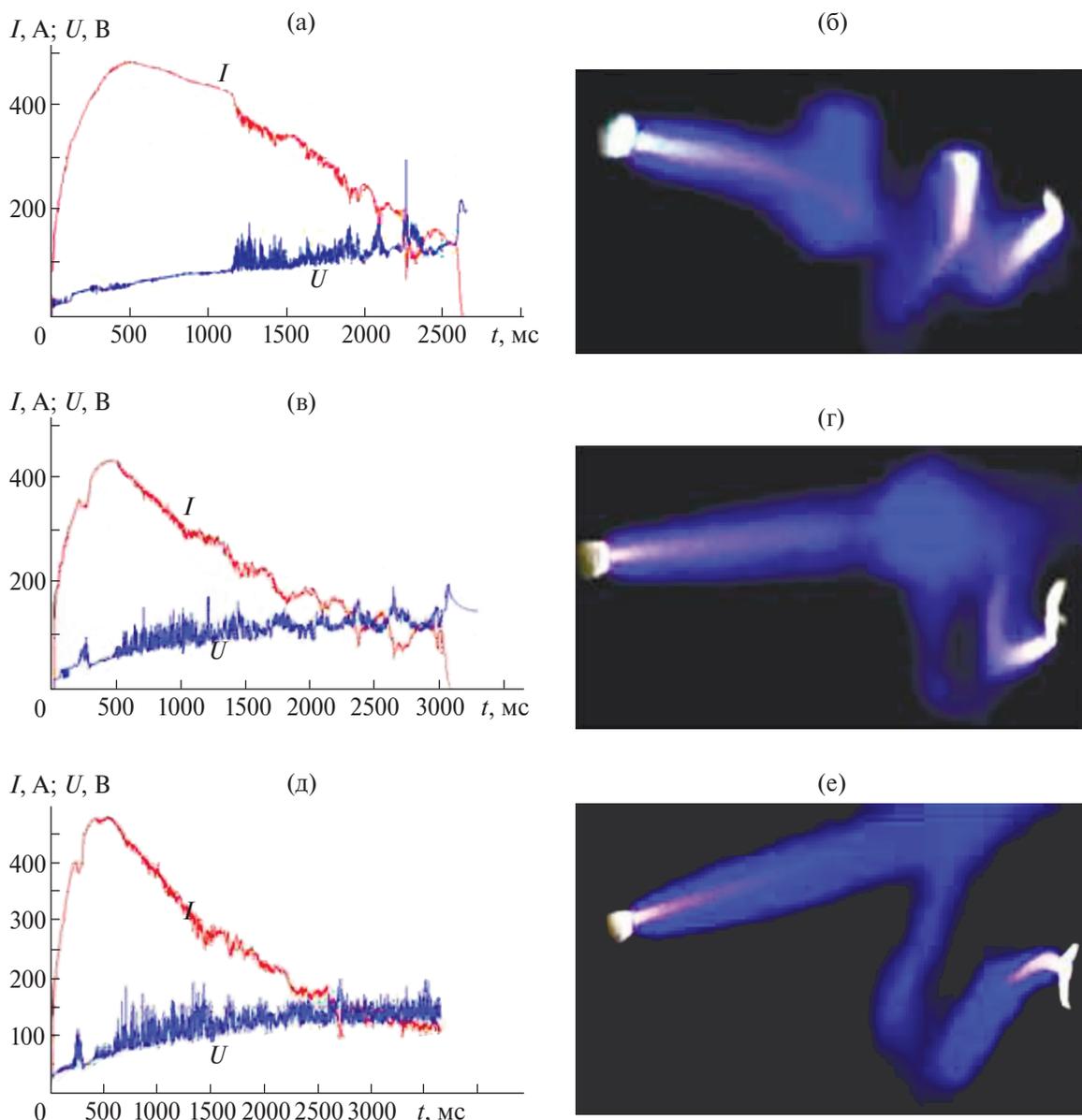


Рис. 7. Влияние амплитуды возмущений зазора ($l' - l_0$) на стабильность разряда в воздушной среде атмосферного давления: осциллограммы тока I и напряжения U (а, в, д) и соответствующие типичные видеокадры (б, г, е): $l_0 = 100$ мм; $(l' - l_0)/l_0 = 0\%$ (а, б), 10% (в, г), 50% (д, е). На видеокадрах ток $I = 135$ А (б), 120 А (г), 130 А (е).

Расчетный уровень излучения для плазмы CO_2 при $T = 10000^\circ\text{K}$ сильно превышал значения данных эксперимента. Наиболее близок к данным эксперимента оказался расчетный спектр для температуры 6000°K . Спектральные измерения проводились в 5-и мм от катода по методике, изложенной в работе [10].

Наибольшие расхождения данных расчетной модели и эксперимента фиксируются в красной области спектров. Здесь возрастает уровень сплошного спектра по сравнению с линейчатым составом спектра. Причиной этого может быть излучение горячих графитовых частиц (твердой фазы), находящихся в катодной струе в результате его эрозии.

Экспериментальные спектры, в которых появились линии атомарного кислорода (O) и углерода (C) отражены на рис. 13.

Расчеты спектров разрядной среды проведены по программе и базе данных [25].

Видно, что в разрядном промежутке имеются атомарные кислород и углерод. Но причиной их появления в разрядном промежутке может быть не только развал молекул CO_2 , но и эрозия графитового ЗОПГ катода и выход из его пор предварительно захваченного воздуха. Поэтому об эффективности утилизации дугowym разрядом CO_2 сказать ничего пока нельзя. Вопрос требует дальнейших исследований.

Таблица 2.

Пуск	$S_a, \text{мм}^2$	$S_{л}, \text{мм}^2$	U_{xx}	$I, \text{А}$	$U, \text{В}$	Продолжительность разряда, с	Газ	$d, \text{мм}$	Стабильность дуги
1	600	150	130	230	118	0.6	N_2	90	Самогашение по недостаточности U_{xx}
2	600	150	150	414	190	0.8	N_2	–	– (нет)
3	600	150	170	488	107	1.7	N_2	–	+ (есть)
4	600	150	180	505	89	1.8	N_2	–	+
5	600	150	100	165	56	0.3	CO_2	–	–
6	600	150	150	400	86	0.3	CO_2	–	–
7	600	150	170	340	56	0.15	CO_2	–	–
8	600	150	90	150	30	0.23	CO_2	–	–
9	600	150	90	200	65	0.46	Ar	–	нестабильность при спаде тока
10	600	150	110	246	68	0.45	Ar	–	нестабильность при спаде тока
11	600	150	130	448	69	1.8	Ar	–	+
12	600	150	120	390	67	1.9	Ar	–	нестабильность при спаде тока
13	600	150	70	164	49	2.0	Ar	–	+
14	600	150	50	65	17	0.4	Ar	–	–
15	600	150	60	129	44	0.6	Ar	–	–
16	600	150	70	127	56	1.9	Ar	–	+
17	600	150	60	118	50	0.55	Ar	–	–
18	600	150	100	186	83	0.36	CO_2	–	–

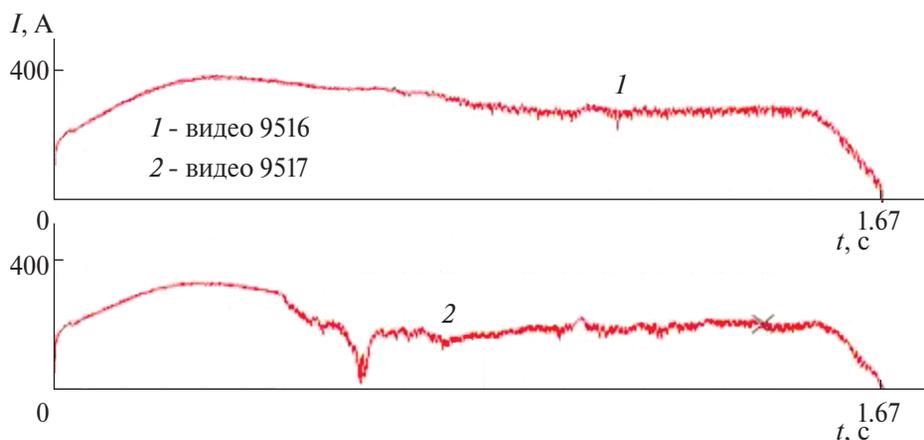


Рис. 8. Кривые тока разряда в аргоне атмосферного давления: магнитное поле B и ток I направлены противоположно (1) и в одном направлении (2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изготовлена и апробирована экспериментально модульная разрядная камера с прозрачными боковыми цилиндрическими стенками из кварцевого электровакуумного стекла для газовых сред при атмосферном давлении. Камера рассчитана на сильноточные квазистационарные разряды до токов и напряжений в сотни ампер и вольт соответственно.

В этой камере проведено как расчетно-теоретическое, так и экспериментальное исследование процессов инициирования, стабилизации и гашения протяженных сильноточных электрических дуг.

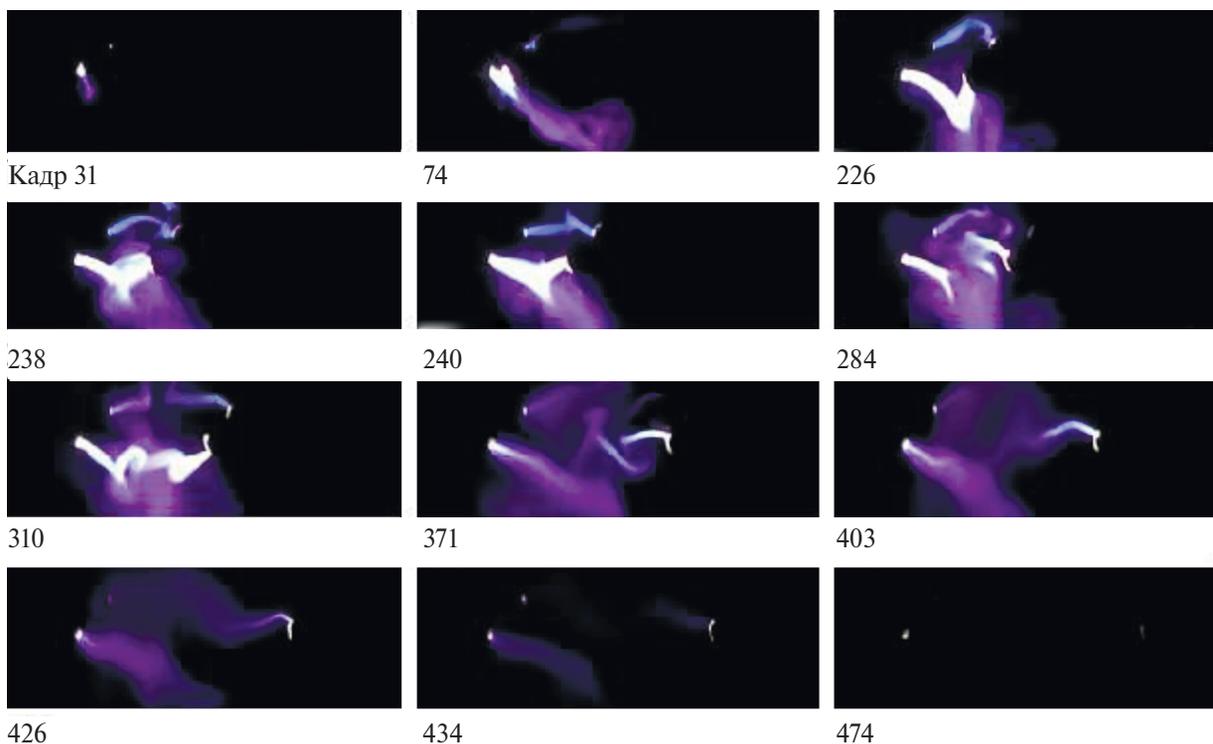


Рис. 9. Видеокадры вертикального разряда в азоте в аксиальном магнитном поле: фильм 9508, $f = 1200$ кадр/с, $p = 1$ атм, магнитное поле $B = 12$ мТл против направления тока I ; зазор $l_0 = 100$ мм, $U_{xx} = 170$ В.

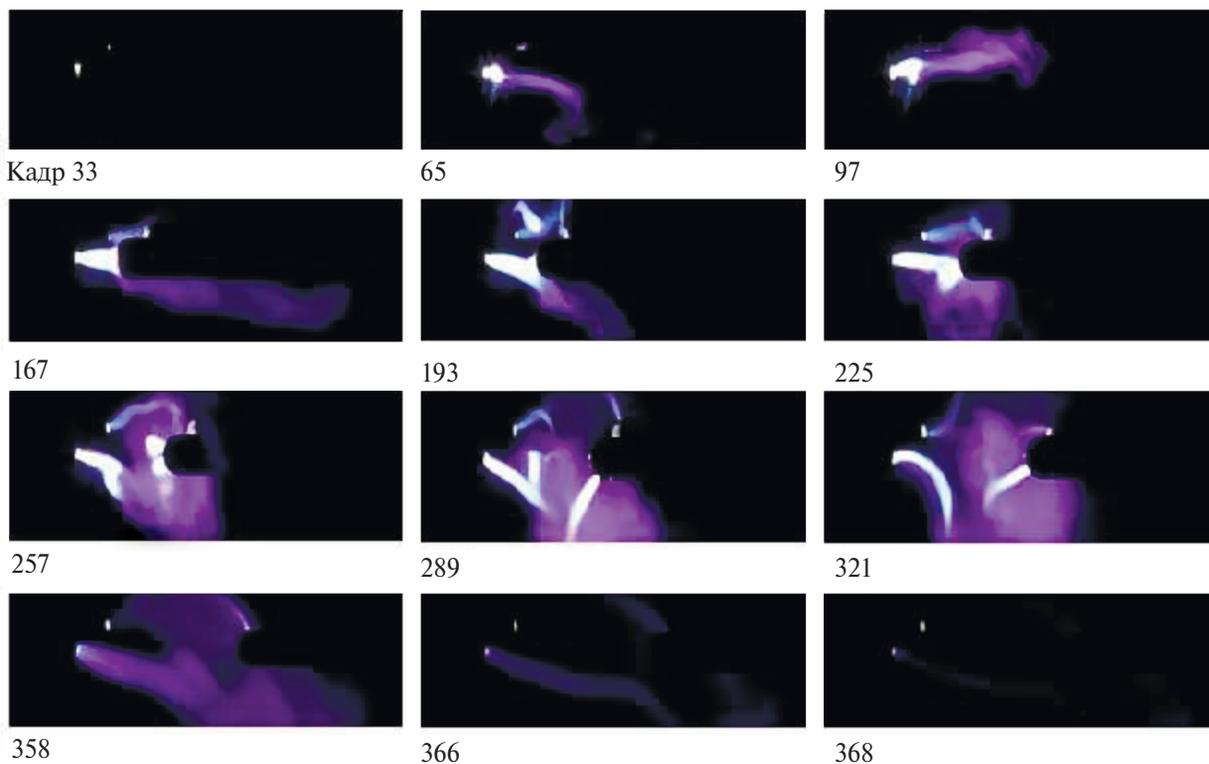


Рис. 10. Видеокадры вертикального разряда в азоте в аксиальном магнитном поле: фильм 9520, $f = 1200$ кадр/с, $p = 1$ атм, магнитное поле $B = 12$ мТл против направления тока I ; зазор $l_0 = 100$ мм, $U_{xx} = 170$ В.

Исследованы квазистационарные разряды в воздухе, азоте, аргоне и углекислом газе. Теоретическое моделирование дуг проведено в электротехническом приближении на основе классических эмпирических данных по вольт-амперным характеристикам дуг между графитовыми электродами.

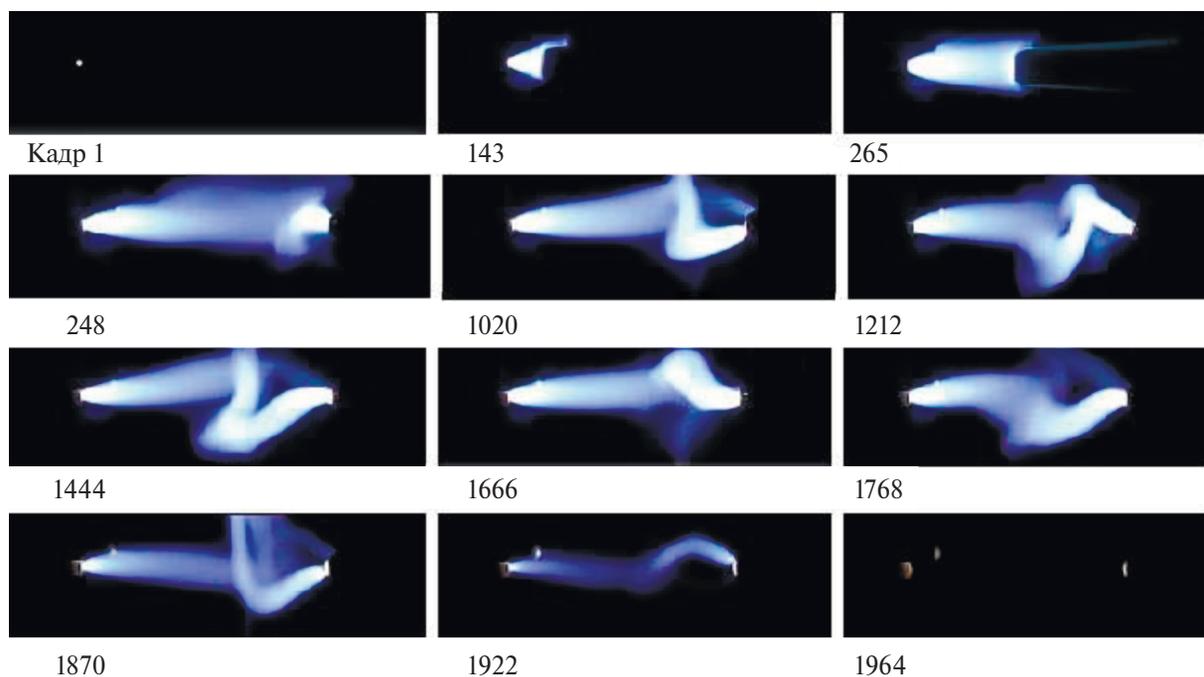


Рис. 11. Видеокадры вертикального разряда в азоте в аксиальном магнитном поле: фильм 9517, $f = 1200$ кадр/с, $p = 1$ атм, магнитное поле $B = 12$ мТл против направления тока I ; зазор $l_0 = 100$ мм, $U_{xx} = 110$ В.

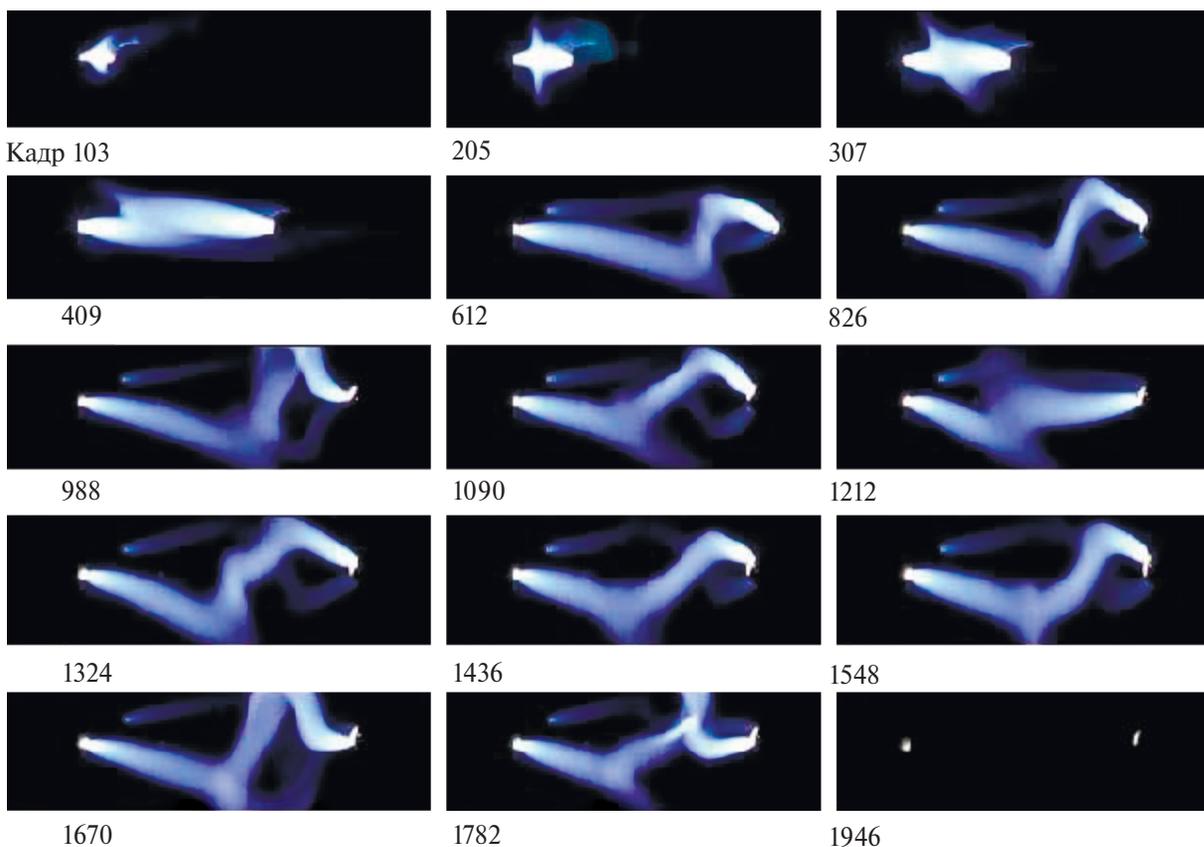


Рис. 12. Видеокадры вертикального разряда в азоте в аксиальном магнитном поле: фильм 9516, $f = 1200$ кадр/с, $p = 1$ атм, магнитное поле $B = 12$ мТл против направления тока I ; зазор $l_0 = 100$ мм, $U_{xx} = 110$ В.

Экспериментально прослежена динамика электропроводных газов в разрядном промежутке. Показаны возможности повышения стабилизации инициирования и горения дуговых разрядов за счет выбора разрядной среды. Подтвержден вывод прежних наших работ о необходимости согласования электродных узлов. Подтверждено, что протекание электрического тока существенно зависит от межэлектродной среды. Отме-

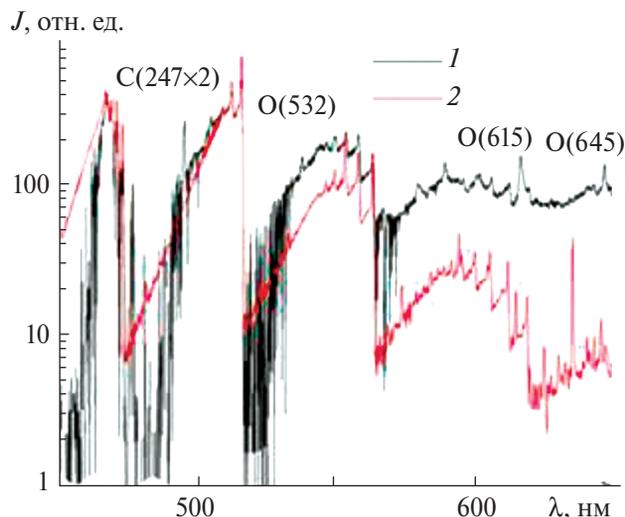


Рис. 13. Интенсивность излучения в относительных единицах в шнуре газового разряда атмосферного давления в CO_2 на расстоянии 5 мм от графитового катода: полосы Свана молекулы углерода (C_2), атомарные линии кислорода (O) и углерода (C — второй порядок 247 нм); 1 — данные наших экспериментов, 2 — расчет при температуре $T = 6$ кК.

чена необходимость оптимизации скорости размыкания электродов, их размеров и формы при обработке разрядных систем для квазистационарных дуг атмосферного давления. Определен оптимальный газ (аргон) для проведения исследований разрядов атмосферного давления при умеренной мощности источников тока (~ 100 кВт).

Полученные в настоящей работе результаты могут быть востребованы:

- для моделирования испытаний защитных покрытий летательных аппаратов при их входе в плотные слои атмосферы планет;
- при разработках систем инициирования и гашения протяженных электрических дуг;
- для разработок установок утилизации трудно разлагающихся при использовании традиционных химических технологий токсичных отходов;
- в обработке технологий плазменного напыления (например, графитовых) порошков на поверхности материалов.

Результаты работы частично докладывались на 50-й Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС [26] и XIII-ом Всероссийском съезде по теоретической и прикладной механике [27].

Работа выполнена в соответствии с планом исследований НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова, при частичном финансировании по гранту РФФИ № 18-29-21022.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Финкельнбург В., Меккер Г. Электрические дуги и термическая плазма. М.: ИЛ, 1961 с.
2. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. 592 с.
3. Жуков М.Ф., Коротеев А.С., Урюков Б.А. Прикладная динамика термической плазмы. Новосибирск: Наука, 1975. 296 с.
4. German V.O., Glinov A.P., Golovin A.P., Kozlov P.V., and Lyubimov G.A. Some Features of Imaging of the Processes Occurring in an Extended Arc Discharge in Atmospheric Pressure Air // Plasma Physics Reports. 2013. V. 39. No. 13. P. 1142–1148.
5. German V.O., Glinov A.P., Kozlov P.V., and Lyubimov G.A. Effect of the Design Parameters and the Atmosphere Composition on the Electric Discharge Shape // Fluid Dynamics. 2011. V. 46. No. 6. P. 958–966.
6. Glinov A.P., Golovin A.P., Kozlov P.V., Shaleev K.V., Lyubimov G.A. Study of arc discharges on the P-2000 facility // J. Phys.: Conf. 2019. Ser. 1250 012019. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1250/1/012019>
7. Glinov A.P., Golovin A.P., and Kozlov P.V. Studies of initiation and quenching of extensive high-current discharges // J. Phys.: Conf. 2021. Ser. 2055 012006. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2055/1/012006>
8. Глинов А.П., Головин А.П., Козлов П.В. Оптимизация струйных плазменных течений во внешнем магнитном поле // Прикладная физика. 2017. № 6. С. 26–32.

9. Глинов А.П., Головин А.П., Шалеев К.В. Влияние внешнего магнитного поля на устойчивость протяженного дугового разряда и формирование многоканальных токовых структур // Прикладная физика. 2018. № 2. С. 21–28.
10. Глинов А.П., Головин А.П., Козлов П.В. Изучение инициирования дуговых разрядов размыканием первоначально замкнутых электродов // Физико-химическая кинетика в газовой динамике, издательство НИИ механики МГУ (Москва, 2020). Т. 21. № 2.
<https://doi.org/10.33257/PhChGD.21.2.916>
11. Глинов А.П., Головин А.П., Козлов П.В., Шалеев К.В. Динамика формы электрической дуги и сопутствующих магнитогазодинамических течений, возникающих при размыкании изначально замкнутых электродов // Физико-химическая кинетика в газовой динамике, издательство НИИ механики МГУ (Москва, 2019). Т. 20. № 2.
<https://doi.org/10.33257/PhChGD.20.2.835>
12. German V.O., Glinov A.P., Kozlov P.V., Lyubimov G.A. Spectral Properties of a Diffuse-Constricted Arc Discharge // High Temperature. 2012. V. 50. No. 2. P. 167–177.
13. Glinov A.P. Stability of Conducting Medium Flows between Plane Continuous Electrodes Inclined to the Horizon // Fluid Dynamics. 2015. V. 50. No. 3. P. 322–331.
14. Glinov A.P. Two-Dimensional Analysis of the Stability of Conducting Medium Flows between Permeable Plane Electrodes Inclined to the Horizon // Fluid Dynamics. 2015. V. 50. No. 4. P. 483–493.
15. Васильев Е.Н., Нестеров Д.А. Вычислительное моделирование взаимодействия электрической дуги с потоком газа // Изв. РАН. МЖГ. 2013. № 2. С. 126–136.
16. Урусов Р.М., Урусова И.Р. Численное моделирование винтовой формы электрической дуги во внешнем аксиальном магнитном поле // ТВТ. 2017. Т. 55. Вып. 5. С. 661–668.
17. Недоспасов А.В., Хаит В.Д. Основы физики процессов в устройствах с низкотемпературной плазмой. М.: Энергоатомиздат, 1991. 224 с.
18. Жуков М.Ф., Коротеев А.С. Теория термической электродуговой плазмы. Ч. 1,2. Новосибирск: СО Наука, 1987. 576 с.
19. Брон О.Б., Сушков Л.К. Потоки плазмы в электрической дуге выключающих аппаратов. Л.: Энергия, 1975. 212 с.
20. Петров А.Г. Точное решение уравнений осесимметричного движения вязкой жидкости между параллельными плоскостями при их сближении и раздвижении // Изв. РАН. МЖГ. 2019. № 1. С. 58–67.
21. Ayrton H. The Electric Arc., The Electrician Series, D. Van Nostrand Company, Inc., N.Y., 1902. P. 120–130.
22. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1973. 736 с.
23. Григорьев И.С., Мейлихов Е.З. Физические величины. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1234 с.
24. Кухлинг Х. Справочник по физике. М.: Мир, 1982. 519 с.
25. Акимов Ю.В., Быкова Н.Г., Забелинский И.Е., Козлов П.В., Левашов В.Ю., Герасимов Г.Я. Программа расчета спектров двухатомных молекул “СПЕКТР” // Свидетельство о регистрации прав на ПО, базу данных № 2023687422 от 14 декабря 2023 года.
26. Глинов А.П., Головин А.П., Козлов П.В. Особенности горения протяженных сильноточных дуг во внешнем магнитном поле в разных газовых средах // I Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, 20–24 марта 2023, ISPAF-2023. Сб. тез. докл., М: ПЛАЗМАИОФАН 2023, 231 с.
27. Глинов А.П., Головин А.П., Козлов П.В. Исследование инициирования и протекания тока и межэлектродной среды разных газов атмосферного давления в протяженных разрядных камерах // XIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике / Сб. тез. доклад. в 4 Т. 21–25 августа 2023 года, Санкт-Петербург. Т. 2. Механика жидкости и газа. Санкт-Петербургский политехнический ун-т Петра Великого. Санкт-Петербург. 2023. С. 743–745.

Extended High-Current Arc Discharges in an External Magnetic Field in Gas Media

©2025 A. P. Glinov^{*}, A. P. Golovin^{**}, and P. V. Kozlov^{***}

Zhukovski Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI), Zhukovsky, Moscow oblast, Russia

^{*}*e-mail: glshur@imec.msu.ru*

^{**}*e-mail: gnka_golovin_apsf@mail.ru*

^{***}*e-mail: kalevala@mail.ru*

Extended (up to several tens of centimeters) high-current (hundreds of amperes) electric arcs in various gases at the atmospheric pressure are studied experimentally and theoretically. Such discharges have been studied on the electric discharge stand of the P-2000 facility of the Institute of Mechanics of Moscow State University. The data on the influence of an external magnetic field on the stability of such discharges and the formation of branched current channels are clarified. One of the areas of the research is the study of the effect of the orientation of the magnetic field imposed on the arc on the processes of development of the discharge in various gas media, such as air, CO₂, Ar, and N₂. The data for argon and nitrogen are presented most fully. The experiments were carried out in a chamber with transparent walls. The calculation and the theoretical study are carried out on the basis of an electrical engineering model using the empirical data on the volt-ampere characteristics of arcs between graphite electrodes. It is found that the stability of high-current arcs is significantly affected by electrode jet-flame dynamics. At the same time, the traditional models of arcs in the external magnetic field without taking these factors into account show that the direction of the external axial field does not affect the stability of the arcs, affecting only the direction of their twisting during the development of helical instability.

Keywords: extended electric arc, magnetic field, discharge chamber, graphite electrodes, discharge initiation