

# Development of the P-2000 Facility and Key Results Achieved on It

A. P. Glinov, A. P. Golovin, P. V. Kozlov

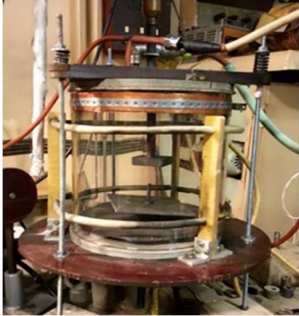

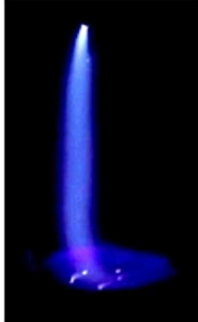
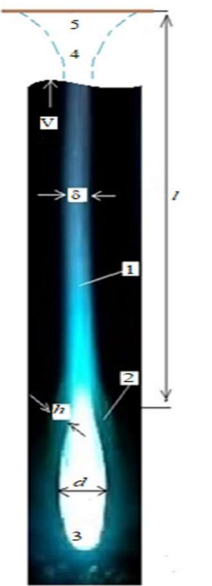
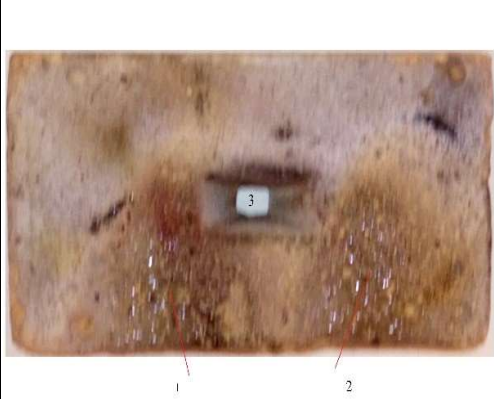
*Institute of Mechanics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

krestytroitsk@mail.ru

## Abstract

The paper provides a brief overview and clarification of the main results obtained over the past ten years at the P-2000 facility. Current data on the development of the electric discharge stands of this facility are provided. The possibilities of using these stands for various applications are considered.

Keywords: porous electrodes, electric arc, discharge initiation, low-temperature plasma.

 <p>Arc discharge chamber: <math>p \approx 1 \text{ bar}</math></p>	 <p>Unstable arcs</p>	 <p>Stabilized atmospheric pressure air arc: gap 30 cm, current 720 A, voltage 185 V</p>
 <p>Diagram of a plasma jet (1) in an air environment. Labels: 2 – anode wall; 3 – oblique outlet section of the plasma generator channel; 4 – conventional region of interaction of the jet with the obstacle; 5 – diameter of the outlet nozzle. Dimensions: <math>d = 8 \text{ mm}</math> – diameter of the outlet nozzle, <math>h = 4 \text{ mm}</math> – thickness of the anode wall of the channel; <math>\delta = 3 \div 5 \text{ mm}</math>, <math>l = 70 \text{ mm}</math>, <math>V = 200 \text{ m/s}</math> – diameter, length and velocity of the plasma jet.</p>	<p>Plasma jet (1) in an air environment at atmospheric pressure: 2 – anode wall; 3 – oblique outlet section of the plasma generator channel; 4 – conventional region of interaction of the jet with the obstacle (5); <math>d = 8 \text{ mm}</math> – diameter of the outlet nozzle, <math>h = 4 \text{ mm}</math> – thickness of the anode wall of the channel; <math>\delta = 3 \div 5 \text{ mm}</math>, <math>l = 70 \text{ mm}</math>, <math>V = 200 \text{ m/s}</math> – diameter, length and velocity of the plasma jet</p>	 <p>Trial tests of a pumice block under the influence of thermal radiation and a flow of dusty plasma of a cathode jet, vertical discharge: 1, 2 – zones of influence on the surface of the sample; 3 – hole. From the discharge axis to the surface 10 mm, current 200 ÷ 300 A, voltage on the arc gap approximately 90 V, <math>\Delta t \approx 2 \text{ c}</math>; 4 – arc; 5 – heated gas zone. Block length and height are 100 and 50 mm</p>

УДК (533.9:537.52)

# Развитие установки П-2000 и ключевые результаты, достигнутые на ней

А. П. Глинов, А. П. Головин, П. В. Козлов

*Научно-исследовательский институт механики  
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова,  
Москва, 119192, Мичуринский проспект, 1*

krestytroitsk@mail.ru

## Аннотация

В работе проведён краткий обзор и уточнение основных результатов, полученных за последние десять лет на установке П-2000. Приводятся актуальные на текущий момент времени данные о развитии электроразрядных стенов этой установки. Рассмотрены возможности использования этих стенов для различных приложений.

Ключевые слова: электрическая дуга, скоростная видеорегистрация, магнитное поле, плазменная струя, плазмотрон.

## 1. Введение

Главная цель проводимых исследований – изучение неустойчивостей дугового разряда и отработка способов их стабилизации с помощью наложения внешних магнитных полей, согласования размеров и формы катодного и анодного узлов, и формирования развитых электродных факелов. Для стабилизации положительного столба разрядной плазмы создан ряд магнитных систем (МС), позволяющих проводить исследования устойчивости электродуговых разрядов в магнитном поле [1–3]. Основной акцент сделан на изучении влияния режимов инициирования разряда на формирование и развитие как токового канала, так и сопутствующих ему течений межэлектродной среды.

Одной из технических проблем при экспериментальном изучении протяженных (несколько см и более) дуг является проблема стабильного инициирования разряда и обеспечение минимальных помех на измерительные цепи. В частности, при инициировании разряда в воздушной среде атмосферного давления при межэлектродных расстояниях 15–18 мм требовались (как отмечалось в [4]) высокие, более 50 кВ, напряжения осциллятора. Поэтому при изучении протяженных электрических дуг на разрядной установке НИИ механики МГУ применяется инициация разряда посредством смыкания электродов с последующим их раздвижением до выбранного межэлектродного расстояния. Система инициирования разряда [1] обеспечивала раздвижение электродов в малом диапазоне скоростей порядка 200 мм/с и отличалась недостаточной стабильностью работы. В настоящее время на установке П-2000 [5, 6] разработан стенд для получения протяженной (вплоть до полуметра) электродуговой плазмы, образующейся при инициировании квазистационарной воздушной дуги атмосферного давления при разных режимах раздвижки электродов, в частности, создано и испытано устройство раздвижки электродов при разных (40 ÷ 400 мм/с) скоростях. Подготовлены модули и для более быстрых систем инициирования разряда на основе разведения первоначально сомкнутых электродов. Стабильность работы таких систем повышена за счет как подбора нагрузочных балансов, так и – выбора управляющего напряжения на электродвигателе системы раздвижки. Развита система диагностики: межэлектродного зазора, трех компонент вектора индукции магнитного поля, тока дуги и напряжения межэлектродного зазо-

ра, температуры электродов. Визуализация разряда осуществляется с помощью проведения высокоскоростной (1200 кадр/с) панорамной видеосъемки разрядного промежутка.

Регистрации межэлектродного зазора обеспечивается на основе оцифровки показаний потенциометра (с точностью до долей мм), связанного тросом системой раздвижки. Для регистрации компонент вектора индукции магнитного поля был разработан измерительный зонд на основе созданной сборки трех взаимно перпендикулярных пластин-датчиков Холла типа Honeywell ss495A1.

На новом стенде возможно проведение экспериментальных исследований протяженных (вплоть до 50 см) дуговых разрядов как в свободной воздушной атмосфере, так и в модульной разрядной камере в среде разных газов атмосферного давления между графитовыми электродами – стержневым катодом и массивными анодами. Экспериментально достигнутые разрядные токи – до 700 А. Показано, что оптимизация режимов раздвижки электродов и согласование электродных узлов позволяет получать стабильное горение протяженных электрических дуг в открытой воздушной атмосфере вплоть до 32 см.

Другое направление исследований на П-2000 – создание стендов для изучения непосредственно потоков низкотемпературной плазмы. Эти потоки (наряду с электродными струями-факелами самих дуговых разрядов) позволяют изучать их возможности применения для практических приложений при разработке различных технологий.

## 2. Установка П-2000

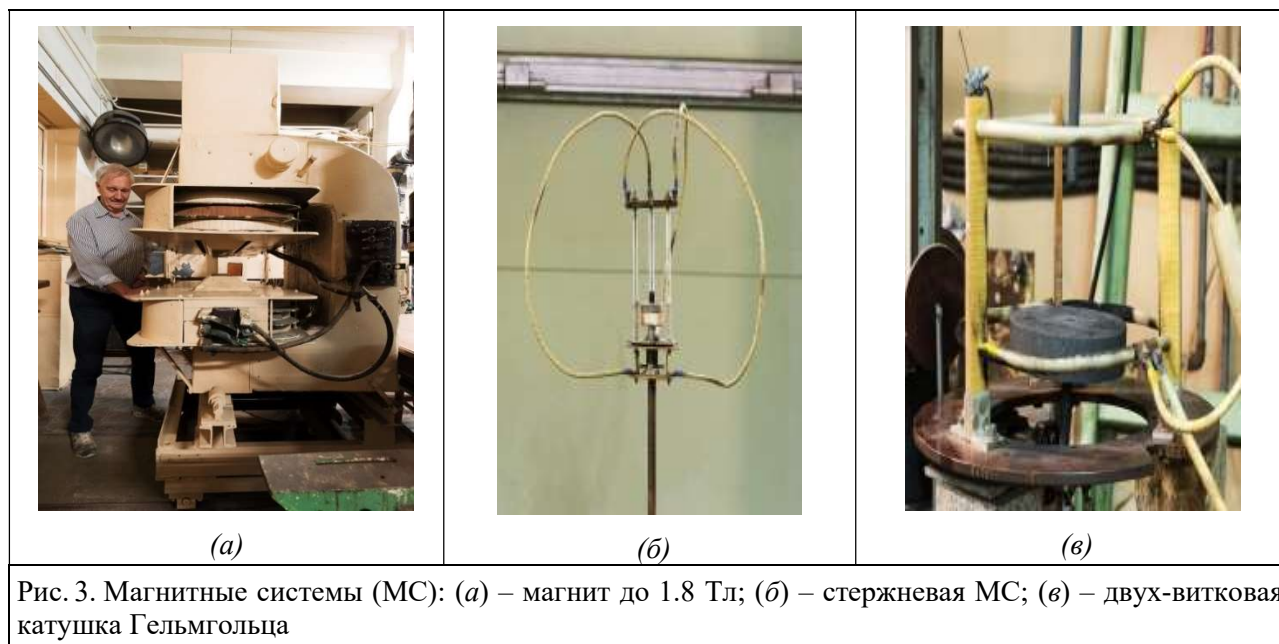
Физическая установка П-2000 – это площадка для испытаний опытных образцов сильноточного электрофизического оборудования и проведения исследований плотной низкотемпературной плазмы ([5,6]). Создана в лаборатории общей гидродинамики в начале 1960-х годов для исследования структуры плазменного потока и решения различных задач взаимодействия потока плазмы со стенками канала, с магнитным полем и решения ряда технических задач.

Под термином «Установка П-2000» понимается то, что она объединяет несколько экспериментальных стендов, расположенных в одном экспериментальном зале и управляемых с единого пульта управления

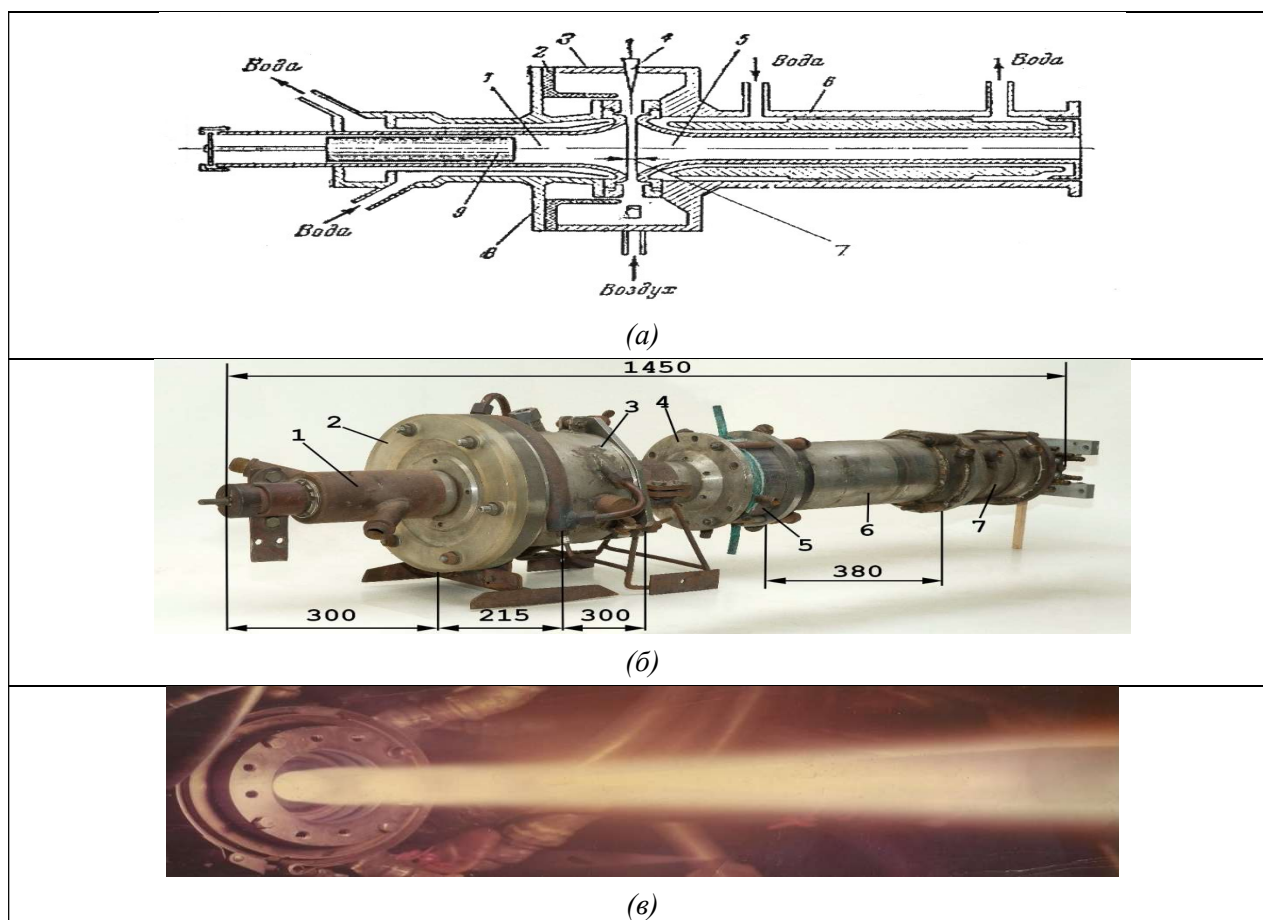
На рис. 1–3 представлены основные источники электропитания, балластные реостаты и магнитные системы соответственно.



В качестве примера созданных на П-2000 ещё в 2000-е годы стендов можно привести плазматрон П-3 Германа В.О. и Любимова Г.А. [5] (рис. 4)



Общий вид основного плазматрона установки П-2000, его принципиальная схема и плазменная струя представлены на рис. 4, а, б, в, соответственно



Этот плазмотрон, получивший маркировку П-3, позволял получать на выходе из его сопла струю плазмы диаметром  $\sim 30$  мм, с температурой в струе  $\sim 2500$  К и скоростью потока плазмы до 500 м/сек. Рабочий газ – воздух, аргон [5].

Рабочие характеристики П-3 значительно превосходили параметры новых инициативных разработок микроплазмотронов на П-2000 (их скорость, диаметр и длина струи 200 м/с,  $3 \div 5$  мм и 70 мм, соответственно) [7].

На П-2000 нами [7] (с использованием в конструкции элементов капиллярного разряда [8]) созданы менее мощные импульсные плазмотроны (без водяного охлаждения ресурс электродов – порядка 1 мин), но позволяющие получать более интенсивные узкие плазменные потоки.

Для стабилизации разрядной плазмы создан ряд магнитных систем, позволяющих также проводить исследования по устойчивости электродуговых разрядов в магнитном поле.

Установка оборудована так называемым «большим или жёлтым» электромагнитом (см. рис. 3, а), спроектированном в НИИЭлектро и изготовленном на ХЭМЗ еще до 1968 г. Его основные технические данные следующие [9]: ширина на полюсных наконечников – 100 мм, длина 800 мм, зазор между наконечниками изменяется в пределах  $0 \div 120$  мм. На каждом полюсном наконечнике между четырьмя охладителями установлено по три катушки обмотки возбуждения. Допустимая длительность работы электромагнита 5 и 15 минут при токах 460 и 320 А соответственно. Величина индукции магнитного поля определяется током обмотки и величиной зазора в центре башмака магнита. В частности, в зазоре 80 мм индукция магнитного поля составляет 0.6 и 1.8 Тл при токе в обмотке 100 и 500 А соответственно (рис. 5).

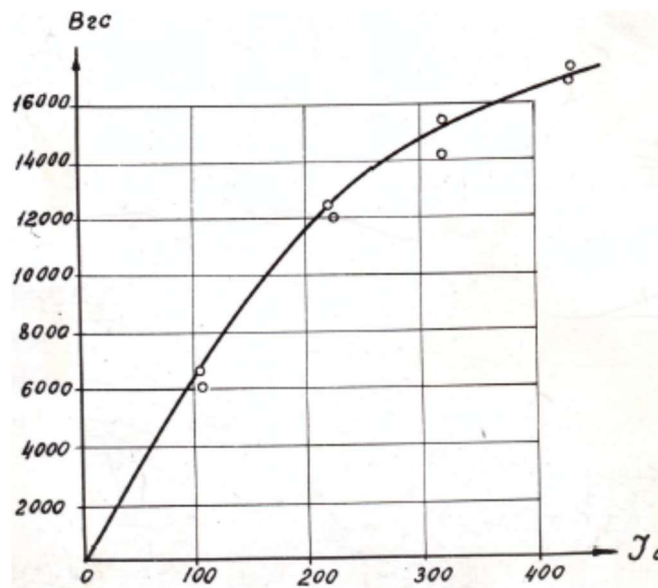


Рис. 5. Индукция большого магнита в зависимости от питающего тока: экспериментальные данные и аппроксимационная кривая

### 3. Исследования дуговых разрядов

Для проведения исследований были специально разработаны устройства, инициирования и гашения протяженных дуг, позволяющие осуществлять разные режимы выхода разрядного промежутка  $l(t)$  на заданное межэлектродное расстояние  $l_0$  и обеспечивать возможность наложения возмущений  $dl$  в зависимости от времени  $t$  [10]. Одно из подобных устройств позволяет реализовать движение электродов под управлением специальной программы. Это даёт возможность проводить исследования по оптимизации режимов инициирования и гашения дуг. Также возможно исследование устойчивости их горения.

### 3.1. Формулировка проблемы

Возможности экспериментального изучения протяженных (несколько см и более) дуг могут ограничиваться проблемой стабильного инициирования разряда и обеспечения минимальных помех на измерительные цепи [2, 3]. Поэтому в последние годы при изучении протяженных электрических дуг на электроразрядной установке НИИ механики МГУ применяется инициация разряда посредством смыкания электродов с последующим их раздвижением до выбранного межэлектродного расстояния  $l_0$  (рис. 6, а).

При этом применяются следующие механизмы раздвижки электродов:

1. устройство на основе координатного механизма принтеров, обеспечивающее примерно постоянную (но разную в зависимости от питающего двигателя напряжения механизма раздвижки) скорость раздвижения;
2. устройство, состоящее из набора координатных механизмов, способное обеспечить режимы раздвижки с кусочно-постоянными во времени скоростями;
3. устройство на основе линейных модулей фрезерных станков с программируемым законом раздвижки электродов.

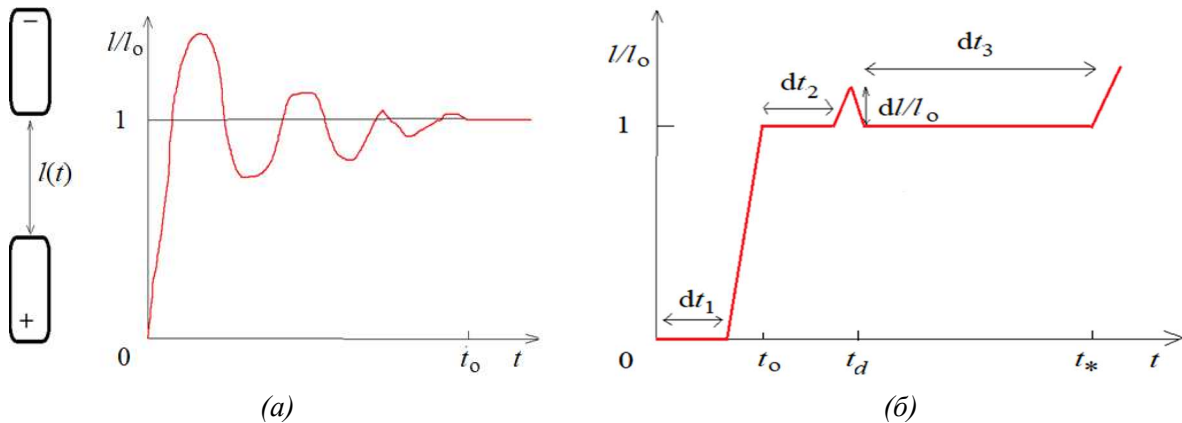


Рис. 6. Эволюция межэлектродного промежутка при разных способах раздвижки электродов: на основе подходов 1–2 (а) и – программируемом приводе 3 (б):  $dt_1$  –  $dt_3$  – задаваемые интервалы времени;  $t_0, t_d, t_*$  – времена раздвижки, локализации возмущений, старта гашения дуги

Характерное время раздвижки электродов  $t_0$  составляет в экспериментах  $0.1 \div 0.2$  с. Синхронно с видеоизображениями снимались и осциллограммы тока  $I(t)$  и напряжения  $U(t)$  на разрядном промежутке. Проведено две разных серии измерений: первая – с анодами с соизмеримыми катоду размерами  $\varnothing = 15$  мм; вторая – с массивными анодами, многократно превосходящими по размерам катод. Материал электродов графит. В общем случае изучается протяженный электродуговой разряд с квазистационарными токами в воздушной среде атмосферного давления на графитовых электродах и при наличии внешнего магнитного поля, обеспечиваемого той или иной магнитной системой (МС). Эксперименты дают информацию о структуре плазменных якорей, важным элементом различных электрофизических установок. Эффективность и ресурс их работы существенно зависит от компактности и степени пространственной однородности таких якорей. Основное внимание уделено визуализации процессов, связанных с протеканием тока с помощью высокоскоростной (1200 кадр/с) съемки в видимом диапазоне длин волн ( $0.4 \div 0.8$  мкм). Дополнительно могут синхронно проводиться пирометрические измерения температуры на поверхности электродов. Возможность наложения разных (по амплитуде и форме) возмущений  $dI$  в зависимости от времени (см. рис. 6, б) позволяет проследить их влияние на стабильность дуг. Конкретная схема технического устройства раздвижки представлена на рис. 7.

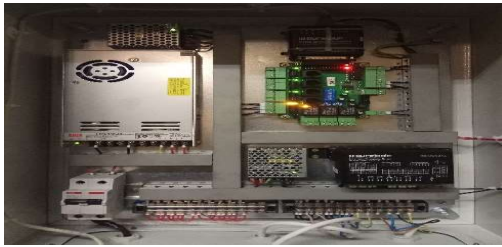
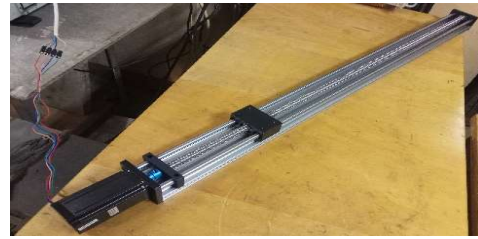
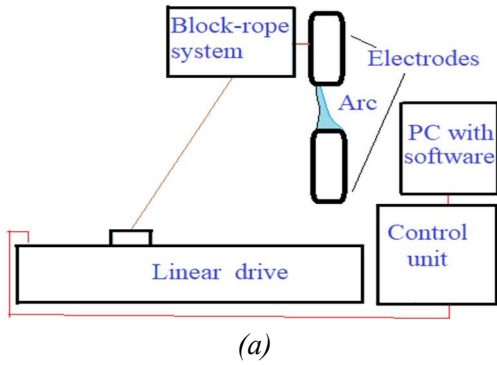


Рис. 7. Блок-схема автоматизированной системы управления движением электродов (а) и фото некоторых её модулей: линейный привод (б) и шкаф с устройствами его управления (в), ПК с ПО PUMOTIX в ЧПУ-системе Purelogic (г)

### 3.2. Результаты

Влияние амплитуды импульсных возмущений зазора  $dI$  при соизмеримых электродах (рис.8).

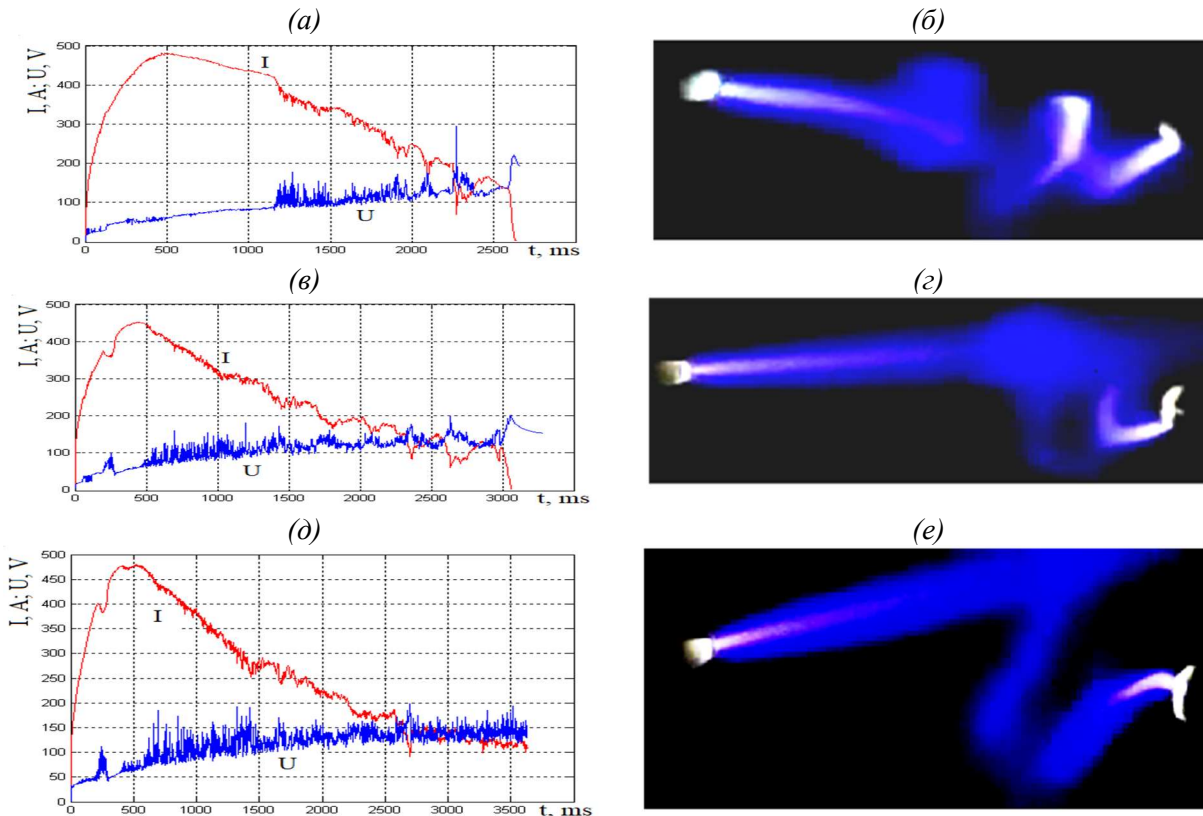


Рис. 8. Влияние амплитуды возмущений зазора  $dI$  на стабильность разряда: осциллограммы тока  $I$  и напряжения  $U$  (а, в, д) и соответствующие типичные видеокдры (б, г, е):  $l_0 = 100$  мм;  $dI/l_0 = 0\%$  (а, б),  $10\%$  (в, г),  $50\%$  (д, е)

Изучение влияния амплитуды возмущений межэлектродного зазора на стабильность инициирования и горения протяжённых электрических дуг позволило усилить требования к стабильности работы систем раздвижки электродов (достаточно жёстко удерживать заданный межэлектродный зазор).

В случае массивных анодов ( $\varnothing 150$  мм) спиральные [4] нестабильности длинных дуг ( $l > 35$  мм) удаётся преодолеть при специальном выборе формы электродов и закона их раздвижки, даже без применения стабилизации внешним магнитным полем [1, 5]. Достигнутые результаты, изложенные в [11, 12], характеризует рис. 9.

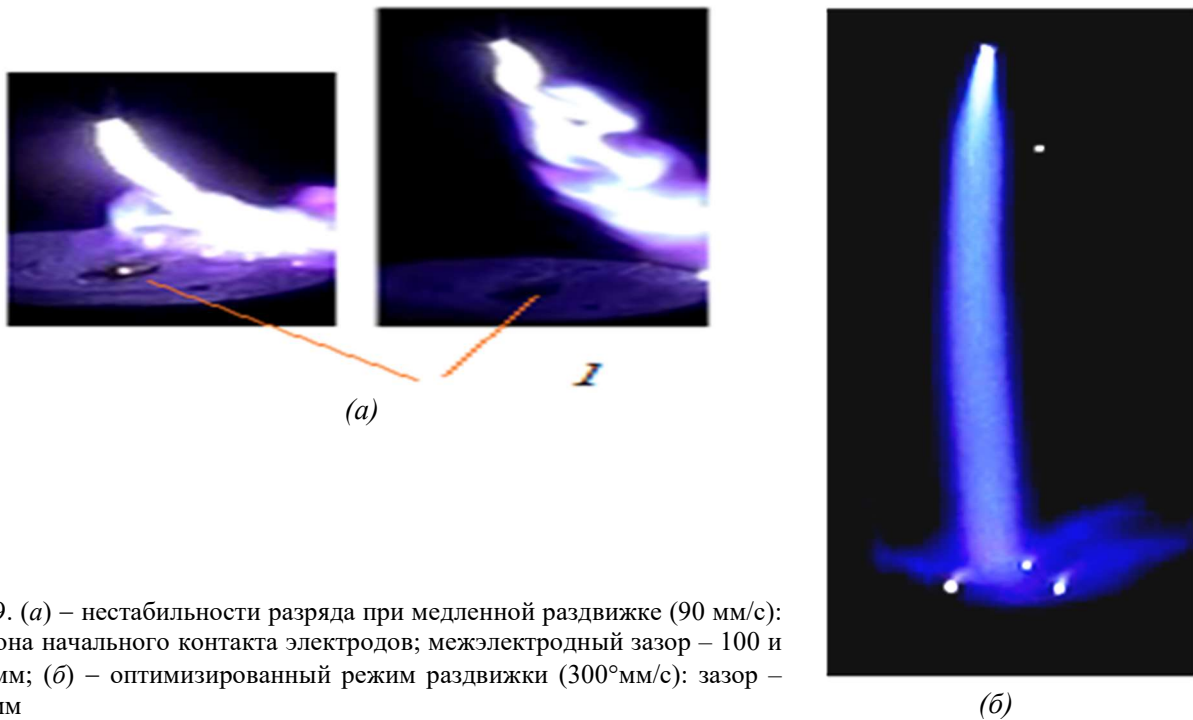


Рис. 9. (а) – нестабильности разряда при медленной раздвижке (90 мм/с):  $l$  – зона начального контакта электродов; межэлектродный зазор – 100 и 200 мм; (б) – оптимизированный режим раздвижки (300<sup>о</sup>мм/с): зазор – 300 мм

По проведенным исследованиям можно констатировать, что разработана автоматизированная система инициирования и гашения дуг путем разведения первоначально замкнутых электродов. С помощью системы раздвижки электродов под управлением специальной подпрограммы в системе программного комплекса PURELOGIC достигнуты первые результаты в реализации автоматического гашения дуг в заданный момент времени. Процесс гашения дуг реализуется без непосредственного участия оператора пульта управления экспериментальной установки и применения коммутационных устройств цепи. Это позволяет повысить ресурс системы гашения и упростить синхронизацию действий операторов установки. Показано, что оптимизация режимов раздвижки электродов и согласование электродных узлов позволяет получать стабильное горение протяженных электрических дуг в открытой воздушной атмосфере вплоть до 32 см. Результаты работы могут быть полезны при разработках систем инициирования и гашения протяженных электрических дуг и для моделирования испытаний защитных покрытий летательных аппаратов. Такие испытания возможны не только в потоках электродуговых струй-электродных факелов, но и специально созданных потоках плазмотронов.

#### 4. Некоторые нестабильности разряда и неоднородности распределения тока в межэлектродном зазоре

Для протяжённых (десятки сантиметров и более) низковольтных (десятки - сотни вольт) сильноточных (сотни – первые тысячи ампер) квазистационарных (до кГц) электрических дуг атмосферного давления на установке П-2000 характерно проявление в первую очередь перегревно-конвективной [13–15] и винтовой [16, 17] неустойчивости.



Теоретическое изучение перегревно-конвективной неустойчивости электропроводящей среды с учётом объёмного источника тепла в виде джоулева тепловыделения проведено в рамках тепловой модели разряда и гидродинамики в приближении Буссинеска. Было показано, что проявление этой неустойчивости возможно в достаточно узких (несколько мм) зазорах с ростом числа Грасгофа.

В экспериментах показано, что проявление этой неустойчивости может способствовать образованию многоканальных токовых структур [2] (рис. 10).

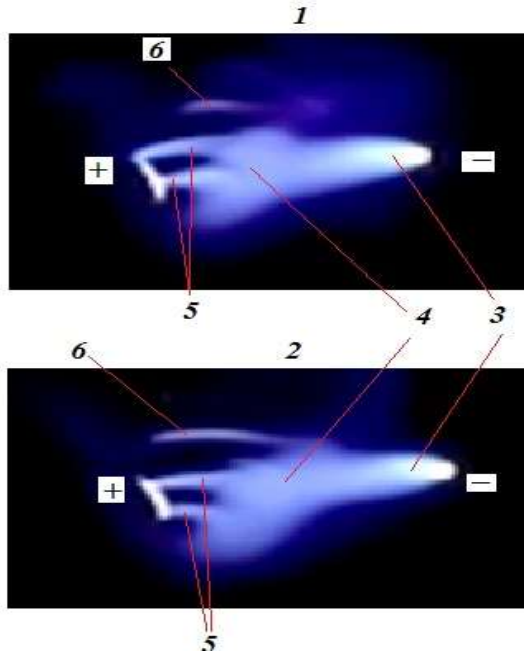


Рис. 10. Видеокадры (1, 2) формирования третьего токового канала в прианодной области: моменты времени  $t_2 > t_1$ ; 3 – области основного дугового канала (столба), совпадающие с зоной катодного факела; 4 – зона, переходная к области с расслоением дуги; 5 – прианодные токовые каналы ( $\varnothing \sim 2.5$  мм); 6 – плазменная область-предвестник нового токового канала

Были экспериментально изучены некоторые особенности проявления и винтовой неустойчивости дугового разряда [2] (см. рис. 11), в том числе, связанные с изменением ориентации внешнего аксиального магнитного поля [18] при наличии электродных факелов (скорость до 200 м/с, индукция магнитного поля до 10 мТл), что может приводить как к увеличению, так и уменьшению разрядного тока в пределах 20 % при разных интенсивностях факелов, обусловленных как нагревом электродов, так и силой самого тока.

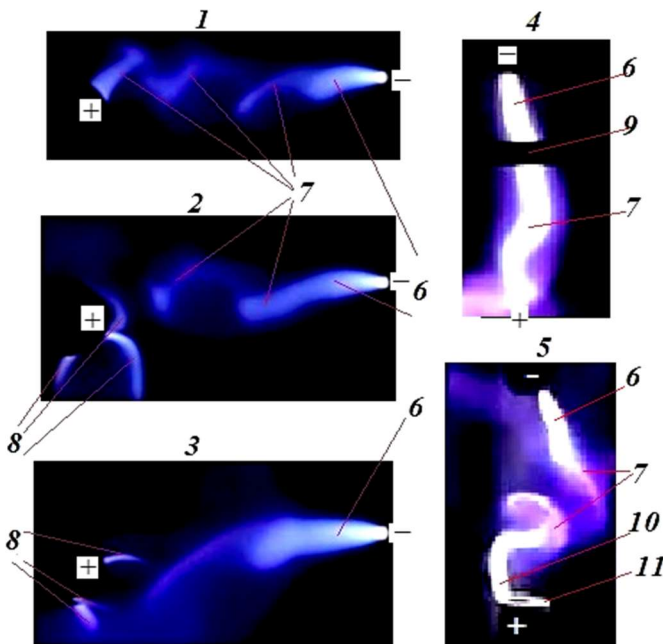


Рис. 11. Видеокадры (1–5) формирования и распада винтовых структур канала дуги: разряды – горизонтальный (1–3,  $t_3 > t_2 > t_1$  – моменты времени, соответствующие этим кадрам, межэлектродный зазор  $l_{мэ} = 150$  мм) и вертикальные (4, 5); 6 – области основного дугового канала (столба), совпадающие с зоной катодного факела; 7 – витки спиральной структуры; 8 – анодные плазма-газо-пылевые факелы; на кадре 4 – виток МС (9) запитан ток  $I_m = 600$  А, ток разряда  $I = 400$  А,  $l_{мэ} = 150$  мм, внешнее магнитное поле аксиально ( $B = 4$  мТл); на кадре 5 –  $I = I_m = 300$  А,  $l_{мэ} = 60$  мм, внешнее магнитное поле азимутально ( $B$  – до 20 мТл),  $N = 3$ ; 10 – прианодный шнур; 11 – круговой трек опорного анодного пятна

## 5. Исследования плазменных струй

Плазменные струи на плазматроне типа «ФАКЕЛ» [7] (рис. 12), созданном под влиянием технологий капиллярных разрядов [8].

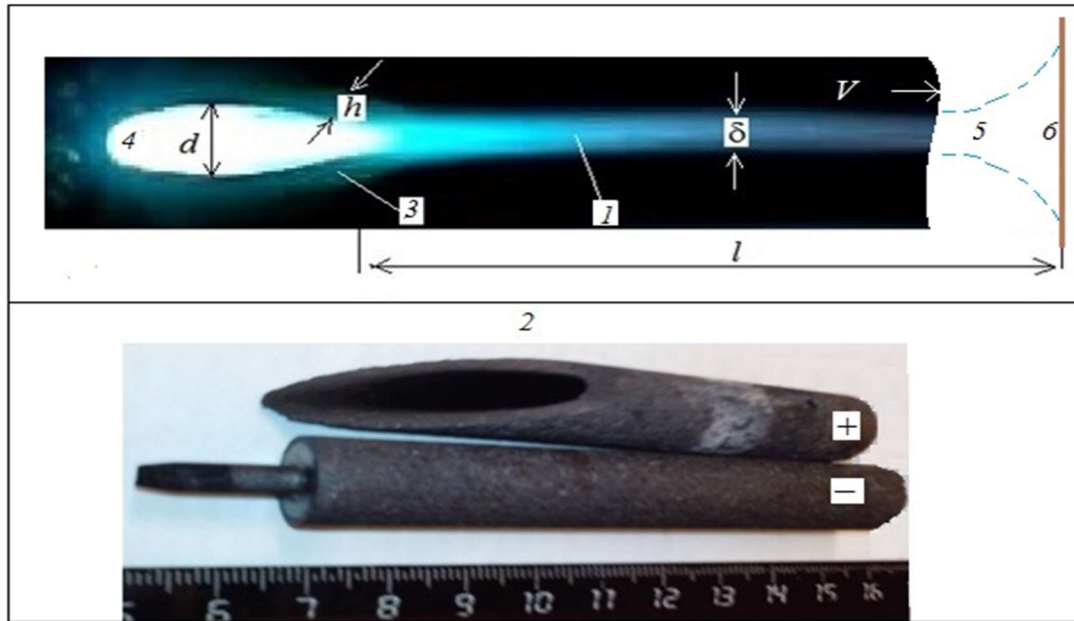


Рис. 12. Плазменная струя (1) в воздушной среде атмосферного давления и типичные электроды (2): 3 – анодная стенка; 4 – косое выходное сечение канала генератора плазмы; 5 – условная область взаимодействия струи с преградой (6);  $d = 8$  мм – диаметр выходного сопла,  $h = 4$  мм – толщина анодной стенки канала;  $\delta = 3 \div 5$  мм,  $l = 70$  мм,  $V = 200$  м/с – диаметр, длина и скорость плазменной струи

Представляется, что полученные в настоящей работе результаты могут быть востребованы:

1. для моделирования испытаний защитных покрытий летательных аппаратов при их входе в плотные слои атмосферы планет [19];
2. при разработках систем инициирования и гашения протяженных электрических дуг [6, 10];
3. для разработок установок утилизации отходов, трудно разлагающихся при использовании традиционных химических технологий [20];
4. в отработке технологий плазменного напыления [21] (например, графитовых) порошков на поверхности материалов.

Каждое из приведенных направлений достойно внимания в прикладных электрофизических разработках. Наиболее простое приложение нашей системы инициирования и стабилизации разряда касается направления 2. Но наиболее актуальным применением в свете современных тенденций по освоению и изучению космического и околоземного пространства может быть направление 1.

## 6. Некоторые возможности проведения испытаний термостойких материалов

Обеспечение условий стабильной работы самой системы раздвижки электродов, оптимизация её скорости, согласование размеров и формы электродных узлов позволило получать стабильные результаты с устойчивым горением дуг и соответственно с устойчивыми потоками электродных факелов. Это даёт возможность рассматривать и изучать практические приложения электроразрядных стендов установки П-2000.

На электроразрядном стенде установки П-2000 (рис. 13) в модульной разрядной камере [19] (рис. 14) были проведены пробные испытания бруска из пемзы под воздействием теплового излучения и потока пылевой плазмы катодной струи, вертикального разряда в воздушной среде (рис. 15).

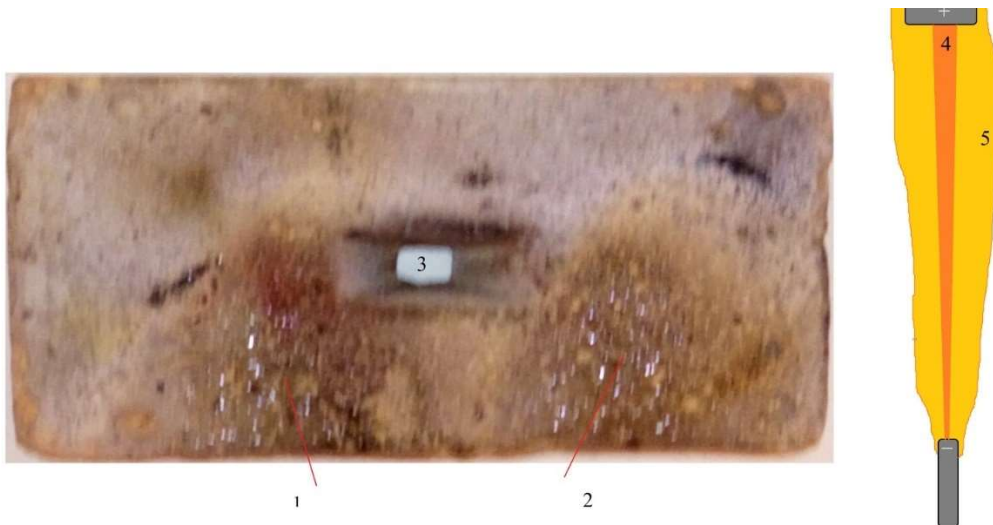
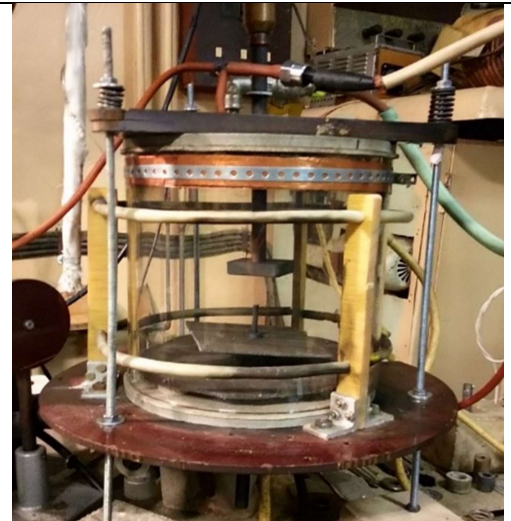
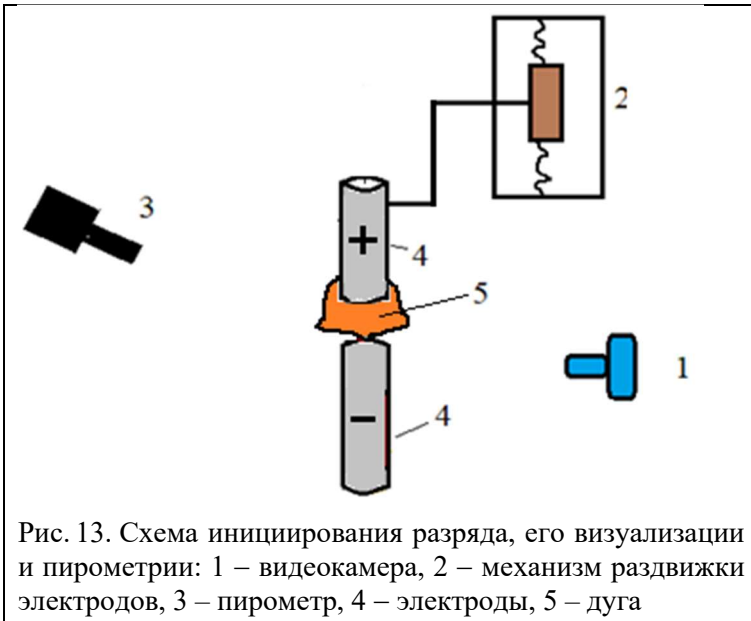


Рис. 15. Фотокадр поверхности прогретого около катодной области дуги образца пемзы в пусках 1 и 2 после завершения разряда

Здесь 1, 2 – зоны воздействия плазмы на поверхность образца в разных идентичных пусках, но с разным смещенным положением образца в нижней части разрядной камеры рядом с ЗОПГ-катодом; 3 – технологическое отверстие образца. Минимальное расстояние от оси разряда до поверхности пластины составляло 10 мм в обоих пусках. Ток разряда –  $200 \div 300$  А, напряжение на дуговом промежутке – примерно 90В, разрядная среда – воздух атмосферного давления. Зона 4 – область дуги, 5 – зона прогретого потоком горячего газа (порядка 3 кК) от плазмы канала дуги 4 (с температурой до  $6 \div 10$  кК) [22]. Размеры пластины  $110 \times 52 \times 28$  мм (длина, высота, толщина). Межэлектродный зазор составлял 100 мм. Разряд проводился в дуговой камере. Инициирование дуги осуществлялось разведением первоначально сомкнутых ЗОПГ- графитовых электродов с подбором оптимальной скорости раздвижки.

Температура поверхности пластины, измеряемая в зонах максимального нагрева, составляла  $1.5 \div 2.5$  кК в течение процесса горения дуги. Видно, что достигнуто оплавление и вытекание из пор материала на поверхность жидкой массы и остекление.

Детальный расчётно-теоретический анализ процессов и состояния различных опытных образцов от воздействия высоких тепловых нагрузок в рамках реальных физико-математических 3-D моделей может проводиться в специализированных организациях и лабораториях заказчика конкретных испытаний после проведения этих испытаний, например на нашей установке. Упрощённые же теоретические исследования (расчётные и аналитические) теплового состояния образцов в рамках заданных 2-D моделей сред возможны и нашими силами.

Экспериментальное исследование динамики изменения состояния и формы поверхности испытываемых образцов защитных покрытий будет возможно с приобретением для П-2000 современных высокоскоростных видео, инфракрасной и спектральной камер с высоким пространственным разрешением и освоением работы на них.

## 7. Заключение

Сделан краткий обзор результатов, достигнутых на электроразрядных стендах установки П-2000 за последние годы. Развита система инициирования и гашения дуг путем разведения первоначально замкнутых электродов с переменной скоростью. Экспериментальное исследование протяженных сильноточных электрических дуг проведено как в открытой воздушной среде, так и в модульной камере в разных газах атмосферного давления, что позволяет оптимизировать состав разрядной среды. За счет оптимизации процесса раздвижения электродов и согласования их размеров и формы удается до 10 раз увеличить длину стабильно горящей сильноточной дуги без применения специальных мер её стабилизации внешним магнитным полем. Рекордная длина (32 см) стабильной воздушной дуги достигнута в двухмодульной камере при питании стенда от блока генераторов постоянного тока 9-10ГП. Проведенная стабилизация работы электроразрядного стенда позволяет проводить испытания теплозащитных материалов при тепловых нагрузках до  $20 \div 30$  кВт в течение нескольких секунд. С обеспечением практической реализации возможности применения на сегодняшний день на установке П-2000 на порядок более мощного генератора постоянного тока ГП-2000, позволит проводить испытания теплозащитных материалов при тепловых нагрузках вплоть до нескольких сот кВт при полной мощности генератора 2 МВт.

Следует отметить, что изучению процессов взаимодействия горячих газовых потоков с твёрдыми преградами посвящено огромное количество публикаций в связи с бурным развитием различных прикладных технологий. Существенное значение при этом имеет плотность и температура газовой среды и время её воздействия на ту или иную преграду. В качестве примера воздействия горячих газов в разреженных средах отметим работы [23–25]. Пример изучения воздействия плотного горячего газа (воздуха при давлении до 5 атм, нагретого до  $600^\circ\text{C}$ ) на парафиновую пластину отражён в [26]. В ней экспериментально и теоретически показывается сложный характер взаимодействия разных сред с развитием гидродинамических неустойчивостей при фазовых переходах плавления парафина. Результаты нашей работы как раз относятся к случаю горячих плотных потоков, но не просто газов, а пылевой плазмы, что существенно сложнее для будущих комплексных исследований процессов такого взаимодействия.

## Благодарности и ссылки на гранты

Статья посвящена светлой памяти бывших сотрудников НИИ механики МГУ, проявлявших большой интерес к изложенным работам, заложивших философские, теоретические и инженерные основы создания установки П-2000 ещё в советские годы: академика РАН А. Г. Куликовского, академика РАЕН А. А. Бармина, проф. Г. А. Любимова, талантливого

«Кулибина» к.т.н. В. О. Германа, позволяющей проводить актуальные исследования в области механики и физики потоков электропроводных газов и в наше время.

Работа выполнена по планам НИИ механики МГУ имени М. В. Ломоносова при финансовой поддержке РФФИ (грант №18-29-21022).

## Литература

1. Герман В.°О., Глинов А.°П., Головин А.°П., Козлов П.°В. О динамике и особенностях структуры анодных пятен в электродуговом разряде на графитовых электродах во внешнем магнитном поле // Прикладная физика. 2015. № 5. С.°33–38.
2. Глинов А.°П., Головин А.°П., Шалеев К.°В. Влияние внешнего магнитного поля на устойчивость протяженного дугового разряда и формирование многоканальных токовых структур //., 2018. № 2. С.°21–28.
3. Герман В.°О., Глинов А.°П., Головин А.°П., Козлов П.°В., Шалеев К.°В. Стабилизация электродуговых разрядов во внешнем азимутальном магнитном поле // Прикладная физика. 2016. № 6. С.°18–24.
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. Vol. 39. no. 13. pp. 1142–1148.
5. Герман В. О., Любимов Г. А., Шалеев К. В. Установка П-2000 Института механики МГУ и некоторые полученные с её помощью научно-технические результаты // НТО НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова № 5351. 2017. 173 с.
6. A. P. Glinov et al 2019 Study of arc discharges on the P-2000 facility // J. Phys.: Conf. Ser. **1250** 012019 / APhM2018 IOP Publishing doi:10.1088/1742-6596/1250/1/012019
7. Глинов А. П., Головин А. П., Козлов П. В. Оптимизация струйных плазменных течений во внешнем магнитном поле // Прикладная физика. 2017. № 6. С. 26–32.
8. Боброва Н. А. Динамика капиллярных разрядов и диссипативные процессы в многокомпонентной плазме // Автореферат докторской диссертации. М.: 2010, ГНЦ РФ ИТЭФ им. А. И. Алиханова, 31 с.
9. Герман В. О. Экспериментальное исследование приэлектродного падения потенциала в потоке воздуха, содержащего присадку калия // Диссертация канд. техн. наук, научн. рук. – д.ф.-м.н. Г. А. Любимов / НИИ механики МГУ, М. 1968, 173 с.
10. A. P. Glinov et al 2021 Studies of initiation and quenching of extensive high-current discharges // Journal of Physics: Conference Series **2055**. 2021. 012006 // ICPAF 2021 IOP Publishing doi:10.1088/1742-6596/2055/1/012006
11. Glinov A. P., Golovin A. P., Kozlov P. V., and Shaleev K. V. Dynamics of the Shape of the Electric Arc and the Associated Magnetogasdynamic Flows Arising from the Opening of Initially Closed Electrodes // Fluid Dynamics. 2023. Vol. 58. No. 2, pp. 313–319. © Pleiades Publishing, Ltd., 2023.
12. Glinov A. P., Golovin A. P., and Kozlov P. V. Study of the Initiation of Arc Discharges by Separating Initially Closed Electrodes // Fluid Dynamics. 2023. Vol. 58. No. 4, pp. 731–738. © Pleiades Publishing, Ltd., 2023.
13. Глинов А. П. Перегревно-конвективная неустойчивость электрического разряда // Известия Академии наук СССР. Механика жидкости и газа. 1983. Т. 2. С. 120–123.
14. Глинов А. П. Устойчивость течений электропроводной среды между сплошными плоскими электродами, наклоненными к горизонту // Известия Российской Академии наук. Механика жидкости и газа. 2015. № 3. С. 12–21.
15. Глинов А. П. Двумерный анализ устойчивости течений электропроводящей среды между проницаемыми плоскими электродами, наклоненными к горизонту // Известия Российской Академии наук. Механика жидкости и газа. 2015. № 4. С. 25–36.

16. Урусов Р. М., Урусова И. Р. Численное моделирование винтовой формы электрической дуги во внешнем аксиальном магнитном поле // *Теплофизика Высоких Температур*. 2017. Том 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. 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, Санкт-Петербург, 21-25 августа 2023 года.
19. Глинов А. П., Головин А. П., Козлов П. В. Особенности горения протяжённых сильноточных дуг во внешнем магнитном поле в разных газовых средах // L Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, 20–24 марта 2023, ICRAF-2023. Сборник тезисов докладов. М: ПЛАЗМАИОФАН. 2023. С. 231.
20. Рутберг А. Ф., Васильева О. Б., Кумкова И. И., Сафронов А. А. Возможности применения плазменных технологий для переработки органосодержащих веществ // *Теплофизика Высоких Температур*. 2013. Том 51. № 2. С. 191–197.
21. Лебедев А. Д., Урюков Б. А. Импульсные ускорители плазмы высокого давления. Ин-т Теплофизики СО АН СССР. Новосибирск 1990, 290 с.
22. German V. O., Glinov A. P., Kozlov P. V., Lyubimov G. A. Spectral Properties of a Diffuse Constricted Arc Discharge // *High Temperature*. 2012. Vol. 50. No. 2, pp. 167–177.
23. Знаменская И. А., Муратов М. И., Богданова М. А., Карнозова Е. А., Сысоев Н. Н. Эволюция тепловых полей на обтекаемой поверхности, нагретой ударной волной и плазмой импульсного поверхностного разряда // *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*. 2024. Т. 25, вып. 6. <http://chemphys.edu.ru/issues/2024-25-6/articles/1150/>
24. Гордеев А. Н., Чаплыгин А. В. Экспериментальное исследование теплообмена диссоциированного потока воздуха с плоской пластиной под углом атаки в ВЧ-плазмотроне // *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*. 2019. Т. 20, вып. 1. <http://chemphys.edu.ru/issues/2019-20-1/articles/780/>
25. Колесников А. Ф., Лукомский И. В., Сахаров В. И., Чаплыгин А. В. Экспериментальное и численное моделирование теплообмена поверхности графита в недорасширенных струях диссоциированного азота // *Известия РАН. Механика Жидкости и Газа*. 2021, № 6, С. 136–144.
26. Сиваков Н. С., Усанов В. А., Экспериментальное и численное исследование плавления парафина под воздействием потока нагретого воздуха // *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*. 2024. Т. 25, вып. 7. <http://chemphys.edu.ru/issues/2024-25-7/articles/1137/>

## References

1. German V. O., Glinov A. P., Golovin A. P., Kozlov P. V., Dynamics and features of anode spots structure in electric arc discharge on graphite electrodes in an external magnetic field, *Applied Physics*, 2015, no. 5, pp. 33–38 [in Russian].
2. Glinov A. P., Golovin A. P., Shaleev K. V., Influence of an external magnetic field on the stability of an extended arc discharge and the formation of multichannel current structures, *Applied Physics*, 2018, no. 2, pp. 21–28 [in Russian].
3. German V. O., Glinov A. P., Golovin A. P., Kozlov P. V., Shaleev K. V., Stabilization of an electric arc in the external azimuthal magnetic field, *Applied Physics*, 2016, no. 6, pp. 18–24 [in Russian].
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, vol. 39, no. 13, pp. 1142–1148.

5. German V. O., Lyubimov G. A., Shaleev K. V. *The P-2000 facility of the Institute of Mechanics of Moscow State University and some scientific and technical results obtained with its help*, Scientific and Technical Report of the Institute of Mechanics M.V. Lomonosov Moscow State University, no. 5351, 2017, 97 p. [in Russian].
6. Glinov A. P., et al., Study of arc discharges on the P-2000 facility, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2019, vol. 1250, 012019. doi:10.1088/1742-6596/1250/1/012019
7. Glinov A. P., Golovin A. P., Kozlov P. V., Optimization of jet plasma flows in an external magnetic field, *Applied Physics*, 2017, no. 6, pp. 26–32 [in Russian].
8. Bobrova N. A., *Dynamics of capillary discharges and dissipative processes in multicomponent plasma*, Abstract of doctoral dissertation. Moscow: 2010, State Research Center of the Russian Federation ITEP named after A. I. Alikhanov, 31 p. [in Russian].
9. German V. O., *Experimental study of the near-electrode potential drop in an air flow containing a potassium additive*, Dissertation of Cand. Sci. (Eng.), scientific supervisor – D. Sci. (Phys. and Mathematics) G. A. Lyubimov / Institute of Mechanics, Moscow Lomonosov State University, Moscow, 1968, 173p. [in Russian].
10. Glinov A. P., Golovin A. P., and Kozlov P. V., Studies of initiation and quenching of extensive high-current discharges, *Journal of Physics: Conference Series* 2055, 012006, ICPAF 2021 IOP Publishing. Doi:10.1088/1742-6596/2055/1/012006
11. Glinov A. P., Golovin A. P., Kozlov P. V., and Shaleev K. V., Dynamics of the Shape of the Electric Arc and the Associated Magnetogasdynamic Flows Arising from the Opening of Initially Closed Electrodes, *Fluid Dynamics*, 2023, vol. 58, no. 2, pp. 313–319.
12. Glinov A. P., Golovin A. P., and Kozlov P. V., Study of the Initiation of Arc Discharges by Separating Initially Closed Electrodes, *Fluid Dynamics*, 2023, vol. 58, no. 4, pp. 731–738. DOI: 10.1134/S001546282360092X
13. Glinov A. P., Overheating-convective instability of electric discharge, *Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Mechanics of Liquids and Gases*, 1983, vol. 2, pp. 120–123 [in Russian].
14. Glinov A. P., Stability of Conducting Medium Flows between Plane Continuous Electrodes Inclined to the Horizon, *Fluid Dynamics*, 2015, vol. 50, no. 3, pp. 322–331.
15. Glinov A. P., Two-Dimensional Analysis of the Stability of Conducting Medium Flows between Permeable Plane Electrodes Inclined to the Horizon, *Fluid Dynamics*, 2015, vol. 50, no. 4, pp. 483–493. DOI: 10.1134/S0015462815040031
16. Urusov R. M., Urusova I. R., Numerical modeling of the helical shape of an electric arc in an external axial magnetic field, *High Temperature*, 2017, vol. 55, iss. 5. pp. 661–668. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0018151X17050182>
17. Nedospasov A. V., Khait V. D., *Basic physics of processes in low-temperature plasma devices*, Moscow: Energoatomizdat, 1991, 224 p. [in Russian].
18. Glinov A. P., Golovin A. P., Kozlov P. V., Study of initiation and flow of current and interelectrode medium of various atmospheric pressure gases in extended chambers, *XIII International Conference on Theoretical and Practical Mechanics*, St. Petersburg, August 21-25, 2023 [in Russian].
19. Glinov A. P., Golovin A. P., Kozlov P. V., Features of combustion of extended strong arcs in an external magnetic field in various gas environments, *L International (Zvenigorodskaya) Conference on Plasma Physics and UTS*, 20–24 March 2023, ICPAF-2023. A collection of theoretical data, M: PLAZMAIOFAN 2023, p. 231 [in Russian].
20. Rutberg A. F., Vasil'eva O. B., Kumkova I. I., and Safronov A. A., Possibilities of application of plasma technologies to recycle organic-containing substances: Particularities of high current free burning arcs, *High Temperature*, 2013, vol. 51, iss. 2. DOI: 10.31857/S0040364422040019
21. Lebedev A. D., Uryukov B. A., *Pulsed high-pressure plasma accelerators*, Institute of Thermal Physics, Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences. Novosibirsk, 1990, 290 p. [in Russian].

22. German V. O., Glinov A. P., Kozlov P. V., Lyubimov G. A., Spectral Properties of a Diffuse Constricted Arc Discharge, *High Temperature*, 2012, vol. 50, no. 2, pp. 167–177.
23. Znamenskaya I. A., Muratov M. I., Bogdanova M. A., Karnozova E. A., Sysoev N. N., Evolution of thermal fields on a streamlined surface heated by a shock wave and plasma of a pulsed surface discharge, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2024, vol. 25, no. 6 [in Russian].  
<http://chemphys.edu.ru/issues/2024-25-6/articles/1150/>
24. Gordeev A. N., Chaplygin A. V., Experimental study of heat transfer of a dissociated air flow with a flat plate at an angle of attack in a high-frequency plasma torch, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2019, vol. 20, no. 1 [in Russian]. <http://chemphys.edu.ru/issues/2019-20-1/articles/780/>
25. Kolesnikov A. F., Lukomsky I. V., Sakharov V. I., Chaplygin A. V., Experimental and numerical modeling of heat transfer on the graphite surface in underexpanded jets of dissociated nitrogen, *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Mechanics of Liquids and Gases*, 2021, no. 6, pp. 136–144 [in Russian].
26. Sivakov N. S., Usanov V. A., Experimental and numerical study of paraffin melting under the influence of a heated air flow, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2024, vol. 25, no. 7 [in Russian]. <http://chemphys.edu.ru/issues/2024-25-7/articles/1137/>

Статья поступила в редакцию 24 ноября 2024 г.