

рения профиля плотности по радиусу с помощью интерферометра на рубиновом лазере. Изогнутый θ -пинч представляет собой 1/3 тора с большим радиусом 100 см и малым радиусом 5 см без продольного магнитного поля. На концах установки расположены электроды, через которые пропускается ВЧ-ток с амплитудой 6 кА. Длительность протекания тока 4 мксек. Переменное магнитное поле составляет 20 кэ с периодом 10 мксек. Получена плазма плотностью 10^{16} см⁻³ с температурой электронов 50 эв. При протекании ВЧ-тока предел Крускала — Шафранова увеличивается примерно в 10 раз.

Готовятся эксперименты по стабилизации неустойчивостей обратными связями в θ -пинче с большой величиной $\beta = 8\pi lT/H^2$. Длина установки около 100 см, диаметр 5 см, энергия конденсаторной батареи 20 кДж при напряжении 36 кВ. Эти эксперименты аналогичны работам, проводимым в Лос-Аламосе (США), и будут осуществляться в контакте с американскими специалистами.

Влияние вращающегося магнитного поля на поведение плазмы исследуется на установке длиной 150 см и диаметром 10 см. На концах трубы имеются электроды, через которые пропускается продольный ток, создающий азимутальное магнитное поле. Энергия батареи 3 кДж, период тока 5 мксек. Продольное магнитное поле достигает 2 кэ при частоте 2,5 МГц от генератора мощностью 8 Вт и вместе с полем продольного тока создает вращающееся магнитное поле. Получена плазма плотностью 10^{15} см⁻³.

Для исследования распространения волн в плазме плотностью 10^8 — 10^{10} см⁻³ с температурой электронов 3—5 эв построена установка «плазменный ящик». Она представляет собой вакуумный объем диаметром около 100 см, внутри которого находятся постоянные магниты, выложенные по поверхности ящика размером $50 \times 30 \times 30$ см; магниты создают большое число антипробоктронов. В центре магнитное поле равно нулю, а в пробках оно достигает 2 кэ. В институте хорошо поставлены работы по лазерной диагностике. Ведутся работы с лазерами на СО₂.

Другим центром по исследованиям в области физики плазмы является Физический институт при университете в г. Фрибурге (директор О. Хубер). Группа, занимающаяся физикой плазмы, состоит из 12 сотрудников.

Основная тема — исследование магнитозвукового резонанса. Для создания плазмы использовался быстрый θ -пинч с энергосодержанием батареи 120 кДж. В настоящее время монтируется установка с квазистационарным магнитным полем 10 кэ. Вдоль оси намечается пропускать ток 400 кА за время 80 мксек. На установке «Сигма» исследуется электрическая проводимость в распадающейся плазме. Эта работа проводится с целью имитации явлений в космической слабоионизированной плазме.

Имеется установка для создания лазера на ИСН с длиной волны 0,3 мкм, для этого через смесь Н₂ и СN пропускают ток, равный 1 А, при напряжении 10^3 В.

Изучением физики плазмы занимаются также небольшие группы в высших школах в Берне и Цюрихе. Группа в Берне занимается в основном получением плазмы с помощью лазеров и разрабатывает проекты по применению лазера при термоядерных исследованиях.

В Цюрихе изучают поглощение волн типа геликонов в плазме плотностью 10^{13} см⁻³ с температурой электронов 20 эв в магнитном поле 30 эс.

Прикладные исследования ведутся в основном в фирмах. Фирма «Пьер Холдинг», имеющая отделения в городах Тун и Ваберн, исследует взаимодействия лазерного излучения с веществом. Для получения малых отверстий в рубиновых камнях, используемых при изготовлении часов, созданы полностью автоматизированные лазерные установки. В Ваберне имеются лазеры на СО₂, аргоне и ртути. Мощность аргонового лазера непрерывного действия достигает 150 Вт.

В фирме «Браун» (Боверн, центр ее находится в Бадене) создан прибор для измерения профиля скорости при течи жидкостей, газов и плазмы. Прибор основан на эффекте Доплера при рассеянии лазерного света от частиц присадки размером до 1 мкм. Он позволяет измерять скорость жидкости в пределах 10^{-3} — 10^5 см/сек. Ведутся работы по голографии на рубиновом лазере и созданию размыкателей тока до 500 кА за время около 20 мксек. В отделении фирмы в районе Цюриха изготавливаются сверхпроводящие соленоиды из проволоки NbTi, рассчитанные на магнитные поля до 45 кэ.

ПИСТУНОВИЧ В. И

Выставки

Низкотемпературная плазма на службе народного хозяйства

Развитие работ по исследованию физических и химических свойств низкотемпературной плазмы и создание плазменных генераторов с широким спектром технических характеристик позволили перейти к интенсивному внедрению плазменных процессов в современное производство. Благодаря широкому диапазону параметров низкотемпературная плазма является не только удобным средством интенсификации и удешевления уже существующих процессов различных производств, но и способствует разработке ряда принципиально новых технологических схем. В этих новых схемах специфические свойства плазмы совершенно неотделимы как от характеристик самого процесса (в иных условиях он не мог бы даже существовать), так и от свойств конечного продукта или изделия.

Накопленный к настоящему времени опыт промышленного использования плазменных процессов, наличие ряда перспективных разработок, еще нуждающихся во внедрении, а также проблемы дальнейшего развития привели к необходимости проведения специального общесоюзного межведомственного мероприятия, рассчитанного на привлечение всех организаций, относящихся как к области практического использования низкотемпературной плазмы в народном хозяйстве СССР, так и ведущих экспериментально-теоретические исследования.

Указанное мероприятие было проведено по инициативе ГКАЭ СССР на ВДНХ с сентября 1972 г. по февраль 1973 г. В павильоне «Атомная энергия» была развернута тематическая выставка «Установки различ-

ного назначения с использованием низкотемпературной плазмы», на базе которой проводились совещания и семинары, организованы встречи специалистов.

На выставке общей площадью в 400 м² было размещено 52 экспоната. Большинство из них — действующие установки, которые выпускаются серийно отечественной промышленностью, а часть — опытно-промышленные образцы. Выставка состояла из пяти тематических разделов, четыре из которых были посвящены промышленным установкам в плазмохимических, металлургических, машиностроительных, горных и других отраслях промышленности, а пятый — методам получения и исследования плазмы.

Основная часть установок промышленного назначения разработана на основе дуговых плазматронов постоянного тока. Для дуговых плазматронов малой и средней мощности (до 50 кВт) можно считать проблему ресурса решенной: он определяется стойкостью электродов, в конструировании которых достигнуты существенные успехи. Это дает возможность создавать установки, рассчитанные на автоматическое или полуавтоматическое управление, что повышает их экономическую эффективность. Среди крупномасштабных заводских установок следует выделить машину СГУ, изготовляемую на заводе «Автогенмаш» (г. Одесса). Эта установка снабжена дуговым плазматроном «Киев»

мощностью 50 кВт, использующим в качестве плазмаобразующего газа воздух. Она обеспечивает автоматическую резку по фигурному шаблону листов размером 2000 × 8000 мм и толщиной (по алюминию) 60 мм. Применение воздушно-плазменной резки, по сведениям завода, повышает ее скорость на 10—15% по сравнению с плазменным резаком на инертном газе, что позволяет получить высокий экономический эффект. Весьма совершенна и пользовалась на выставке большим успехом установка ИТЭФ-20м, предназначенная для плазменно-дуговой резки металлов. За время работы выставки она была установлена на пяти предприятиях страны (причем запросов на нее было значительно больше).

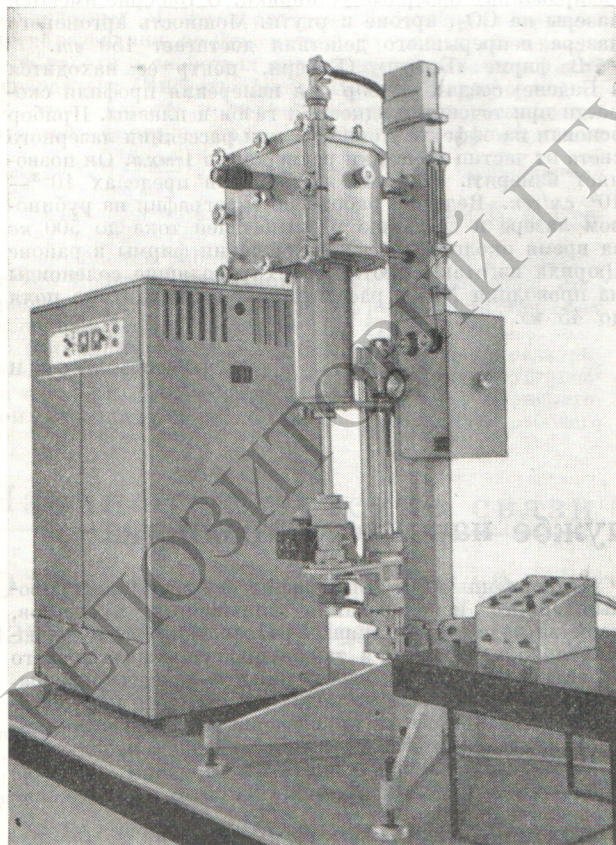
Кроме установок, использующих тепловой эффект плазменной струи для обработки металлов резанием и сваркой, заметное место занимают приборы, в основу которых положены транспортные свойства плазменных струй. Используя высокую температуру и высокую скорость плазменных струй, можно наносить покрытия на поверхность как керамических, так и металлических изделий самых различных габаритов и сколь угодно сложных форм. К таким установкам относится УМП-5, разработанная ВНИИавтогенмаш и изготовляемая серийно. Используя для работы различные плазмообразующие газы, в том числе азот, установка позволяет наносить в 1 м до 5 кг металлического вольфрама, 3 кг окиси циркония и других материалов при мощности 30 кВт. Установка универсальна, ее можно применять для термообработки, сварки, резки, а также для химических процессов.

Из дуговых плазменно-химических реакторов на выставке был представлен оригинальный трехфазный генератор плазмы ЗПГ, разработанный в Казанском политехническом институте. Этот генератор позволяет нагревать рабочий газ до 15000°С при мощности до 100 кВт и расходе газа (водород) 4 г/сек. Таким образом, генератор ЗПГ, мощность которого позволяет использовать его как в металлургической, так химической промышленности, весьма перспективен, он может работать, т. е. его ресурс, в течение нескольких сот часов.

Институт металлургии им. А. А. Байкова АН СССР представил плазменно-дуговую установку «Монокристалл ПД-3», работающую на инертных газах. Она позволяет выращивать в непрерывном процессе без вакуумной оболочки монокристалльные стержни тугоплавких металлов (молибден, вольфрам) диаметром до 40 мм и длиной до 1 м (рис. 1).

Перечисленные экспонаты выставки не исчерпывают всех возможностей применения представленных на ней дуговых плазматронов, но дают достаточно полное представление о путях развития использования плазменных струй в народном хозяйстве. Следует напомнить, что в плазматронах этого типа образование плазмы и область нагрева рабочего газа отделены от места использования пространственно.

На выставке заметное место занимают плазматроны, в которых образование и нагрев плазмы происходят в результате взаимодействия плазмаобразующего газа с электромагнитным ВЧ-полем. Особенностью ВЧ-плазматронов является возможность совмещения рабочего объема с областью разогрева плазмы. Кроме того, ВЧ-плазматроны могут работать при малых расходах плазмаобразующего газа. Отсутствие изнашивающихся частей (электродов) делает их ресурс зависящим практически только от эксплуатационных характеристик питающего ВЧ-генератора. Благодаря перечисленным качествам этот тип генераторов плазмы весьма пер-



Р и с. 1. Плазменно-дуговая установка «Монокристалл ПД-3».



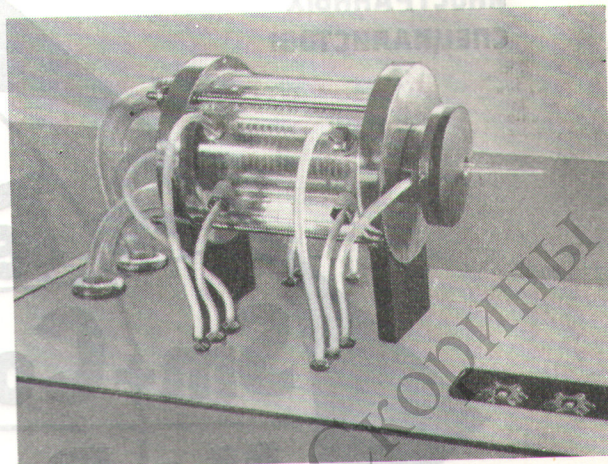
Р и с. 2. Лабораторный факельный плазматрон ЛФП-3.

спективен, особенно, если учесть, что состояние плазмы может быть сделано резко неравновесным, с большим отрывом электронной температуры от газовой.

Из двух типов ВЧ-плазматронов, отличающихся друг от друга характером связи плазмы с ВЧ-полем, на выставке были представлены только факельные ВЧ-плазматроны. Лабораторный факельный плазматрон ЛФП-3, представленный Московским инженерно-физическим институтом, вводит в плазму до 1 *квт* мощности при температуре плазмы (давление атмосферное) до 6000° С в зависимости от плазмообразующего газа (рис. 2). Скорость струи достигает 100 *м/сек*, тепловые потоки на срезе сопла до 1 *квт/см²*. Особенность плазматрона — использование факельного ВЧ-разряда, в котором источники тепла не контактируют со стенками плазматрона, что обеспечивает создание чистых плазменных струй и плазменных объемов с заданной степенью неравновесности. ВЧ-мощности можно подводить к плазматрону с помощью гибкого кабеля, что позволяет механически отделить плазматрон от генератора.

Плазмахимический реактор типа взвешенного слоя, представленный Томским политехническим институтом, состоит из обычного аппарата взвешенного (кипящего) слоя, соединенного с плазматроном факельного типа. Благодаря температуре плазмы (до 5000° К) повышается скорость химических процессов. Потребляемая мощность до 7 *квт*, частота генератора 5—40 *Мгц*.

В последнем разделе выставки были представлены интересные приборы, предназначенные для измерения различных параметров плазмы с целью диагностики и управления ее характеристиками.



Р и с. 3. Дуговой источник плазмы для исследования спектров испускания в вакуумной ультрафиолетовой области.

Институт высоких температур АН СССР представил устройство для непрерывного автоматического измерения температуры плазмы спектральным методом. Такое устройство создано впервые и может быть использовано для автоматизации управления состоянием плазмы в любом технологическом процессе.

Серия плазменных источников типа дуг, стабилизированных охлаждаемыми стенками, была представлена Институтом высоких температур АН СССР. Эти источники позволяют изучать зависимость коэффициентов электропроводности, теплопроводности, вязкости и спектральной излучательной способности различного состава плазм от температуры.

Преимущества таких устройств — высокая стабильность работы, высокие температуры плазмы (до 30000° С) делают их весьма удобными и во многих случаях незаменимыми источниками непрерывного излучения в широком спектральном интервале. На выставке был представлен весьма компактный и удобный в обращении источник излучения, рассчитанный на установку непосредственно на скамью спектрального прибора.

Подобную установку экспонировал Московский инженерно-физический институт — дуговой источник плазмы, предназначенный для исследования излучения и поглощения газов в вакуумной ультрафиолетовой области спектра. Благодаря применению системы газовой защиты электродов дуги и наличию газовых оптических окон, прозрачных в области 2500—1000 Å, каналовая дуга этого источника работает на любом газе, в том числе воздухе, углекислом газе и кислороде при атмосферном давлении. Внешний вид указанной установки показан на рис. 3. Этот источник может применяться как эталонный для калибровки спектральной аппаратуры в области вакуумного ультрафиолета, так как помимо стабильности он имеет практически неограниченный ресурс работы.

Выставка, ставшая эффективной базой для обучения специалистов различных отраслей народного хозяйства, успешно выполнила свои задачи как пропагандист и стимулятор новых достижений в области плазменной технологии.

ТРЕХОВ Е. С.