

возможность изучалась экспериментально. Показано, что при 30%-ном содержании метана, расходе Ar 2500 л/ч и затратах энергии 9 *квт* можно добиться значительного выхода ацетилена. Однако энергетические затраты еще очень велики и мало рентабельны.

В докладе М. Джонкина (США) излагаются результаты высокомолекулярного химического синтеза с использованием техники взрывающихся проволок. Метод позволяет получить в течение нескольких микросекунд плазму с температурой до  $10^6$  °K. Взрыв проволоки осуществляется в окружении твердого, жидкого или газообразного неметаллического вещества. Таким образом были приготовлены йодиды, сульфиды, галоиды, карбиды магния и алюминия. Выход реакций составляет 20 ÷ 60%. Особое внимание уделяется производству нитридов Mg, Ti, Zr, Ta, Al. Возможно приготовление нитридов Fe, Pt, Cu, Zn, Cd. Рассмотрено приложение метода к органической химии.

В работе А. Монроя (Великобритания) изучены реакции фиксации азота с помощью техники плазменной дуги. Плазма азотной дуги в условиях эксперимента легко реагирует с такими веществами, как O, C, CCl<sub>3</sub>CH<sub>4</sub>, пропан. В докладе обсуждается экономический аспект получения связанного азота.

Струя низкотемпературной плазмы как источник энергии для химико-металлургической технологической обработки материалов хороша тем, что температуру, мощность, тепловой поток, скорость потока, состав и давление газовой среды сравнительно легко регулировать в широких пределах. Так, *T* легко изменить от 0,1 эв до нескольких электронвольт, а мощность

дуги от киловатт до мегаватт. Поэтому плазма широко используется в таких процессах обработки, как резка, сварка, наплавка, нанесение покрытий, сфероидизация, испарение, термическая обработка. В докладе Н. И. Рыкалина и И. Д. Кулагина (СССР) отмечается, что в области плазменной металлургии еще недостаточно изучены обработка рудного сырья, извлечение металлов из руд, плавка металлов и сплавов. Для создания плазменных струй перспективен дуговой разряд или высокочастотный разряд. В отличие от кислородной резки, плазма позволяет производить резку цветных металлов и сплавов, неэлектропроводящих материалов. Наиболее важное применение — это нанесение покрытий (W, Ta, Mo, Nb, WC, TiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>, MgO, бориды, нитриды и т. д.). Плазму используют также и для восстановления окислов металлов.

С начала 1963 г. в польской промышленности стали применять плазменные установки для резки легированных сталей и цветных металлов (Cu, Al). Разработано несколько типов установок мощностью 30 ÷ 100 *квт*, работающих на плазме Ar, Ar — H, N — H. В работе В. Бжозовского, Я. Рэды и Н. Микоса доложена установка на азоте мощностью 100 *квт*.

Интересные доклады и широкая дискуссия на Симпозиуме способствовали пониманию многих физических явлений. Контакт ученых различных стран оказался очень плодотворным.

Труды Симпозиума предполагается издать в виде отдельного сборника.

Л. П. Кудрин

## II Всесоюзная конференция по генераторам низкотемпературной плазмы

В июне 1965 г. в Новосибирске проходила конференция, посвященная физическим и прикладным аспектам низкотемпературной плазмы. В работе конференции приняли участие представители нескольких десятков организаций Москвы, Ленинграда, Миска, Новосибирска, Алма-Аты, Киева и других городов страны. Было заслушано 115 докладов.

На конференции работали три тематические секции:

1) электродуговые генераторы низкотемпературной плазмы и их характеристики; 2) получение и свойства плазмы, методы исследования; 3) применение генераторов низкотемпературной плазмы.

Конференция продемонстрировала значительные успехи как в области сравнительно «старой» физики и техники (газового разряда, методов диагностики плазмы), так и успехи молодых наук (плазмохимия, плазмометаллургия). Большое число доложенных экспериментальных работ вносит существенный вклад в понимание физики плазмы и способствует разработке промышленных плазменных установок. Конференция вместе с тем отметила отставание теоретических исследований от экспериментальных. В расчетах все еще слабо используются электронные вычислительные машины. Развитие теоретических исследований сильно тормозится из-за отсутствия данных о кинетических и термодинамических свойствах низкотемпературной плазмы. Чрезвычайно бедна информация о сечениях элементарных процессов в плазме, в частности, очень мало данных по сечениям рассеяния медленных электронов атомами и молекулами. Термодинамика неидеальной

плазмы, когда тепловая энергия сравнима с кулоновской на среднем расстоянии между частицами, совсем не исследована теоретически и очень слабо — экспериментально. Это же относится и к кинетическим коэффициентам низкотемпературной плазмы. Недосток физических исследований в этой области сильно сказывается на качестве инженерных расчетов и затрудняет проектирование конкретных плазменных установок.

Конференция отметила успех инженерных расчетов, основанных на теории подобия. Значительно повышены к. п. д. и ресурс генераторов низкотемпературной плазмы, созданы плазмотроны, не нуждающиеся в стабилизации тока. Однако темпы работ все еще отстают от запросов промышленности.

В своем решении конференция отметила необходимость дальнейшего исследования термодинамических и кинетических свойств низкотемпературной плазмы, необходимость разработки стандартных методов диагностики физических характеристик плазмы, исследования химической диагностики плазмы сложного химического состава, создания новой схемы диагностики неравновесной плазмы.

Конференция обратила внимание на важность разработки источников питания для мощных плазмотронов, исследования взаимодействия электрической дуги с внешней электрической цепью, изучения стабильности горения дуги и устойчивости газоразрядной плазмы, исследования возможностей использования плазмы СВЧ-разрядов в химических процессах, исследования процессов теплообмена между низкотемпературной

плазмой и обрабатываемыми материалами, а также на другие важные вопросы. Конференция отметила в решении недостаточную координацию научно-исследовательских работ в области низкотемпературной плазмы.

Большое число работ, доложенных на конференции, было посвящено физическим методам диагностики низкотемпературной плазмы. Эксперименты включали измерение температуры плазмы, электронной концентрации, оптических характеристик, а также измерение атомных констант.

В столь кратком изложении нет возможности остановиться на всех работах. Отметим лишь некоторые из них.

В докладе С. Г. Зайцева, Т. В. Баженовой, Ю. С. Лобастого и Ю. С. Лазаревой (ЭНИИ) предлагается опробованный на аргоновой плазме метод измерения концентрации электронов с помощью поглощения радиоволн и оптической рефракции. Поскольку коэффициент преломления света в оптической области определяется в основном электронами и  $(n_e - 1) \sim N_e \lambda^2$ , то измерение коэффициента преломления света электронной компонентой  $n_e(\lambda)$  по интерференционной картине, развернутой по спектру, позволяет определять плотность электронов  $N_e$  в области  $N_e < N_e^{\text{макс}} = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , причем  $N_e^{\text{макс}}$  определяется мощностью источника.

Диагностике холодной плазмы с помощью пучка электронов был посвящен доклад А. М. Трохана (Институт теоретической и прикладной механики — ИТиПМ, Новосибирск). Проведены измерения структуры и скорости потока, плотности электронов, а также других параметров плазмы. Эксперимент Трохана отличается большой изобретательностью и изяществом исполнения. Скорость потока холодной плазмы (азот) измерялась с точностью до 1% методом флуоресцирующих присадок. Измерение концентрации электронов проводилось по интенсивности тормозного излучения электронов пучка, дававших жесткий рентген. С помощью этой методики можно измерять распределение плотности, а также флуктуации плотности в точке. Температура струи измерялась в этой работе с точностью до 10% по доплеровскому уширению линий.

Экспериментальному определению сил осцилляторов в цезии посвящена работа Г. А. Касабова (ИАЭ им. И. В. Курчатова, Москва). Измерялись сдвиги и штарковское уширение спектральных линий атомов Cs в низкотемпературной плазме ( $T_e = 2380^\circ \text{K}$ ). Обнаружено, что сдвиг линий сильно зависит от электронной температуры. В работе использовался метод измерения  $T_e$ , не зависящий от факта установления термодинамического равновесия. Измерялись абсолютная интенсивность рекомбинационного свечения, абсолютная интенсивность спектральных линий, снимались обращенный спектр, а также ширина линий поглощения. Согласно расчетам по силам осцилляторов лежит в пределах 10%.

В докладе А. А. Овсянникова и Л. С. Полака «Оптическая пирометрия пламенных струй» (ИНХС, Москва) приведено измерение распределения температуры вдоль струи плазматрона, а также в поперечном сечении струи. Измерения температуры по относительной и абсолютной интенсивности линий меди дают в струе аргона существенно разные значения. Измерения температуры по интенсивности континуума и по ширине линий  $H_\beta$  (пересчет по формуле Саха) показывают, что определение температуры по линиям меди дает завышенный результат, а остальные упомянутые методы — заниженный. Один из выводов работы состоит в том,

что измерение  $T$  по линиям меди нельзя проводить в области  $T > 5000 \div 6000^\circ \text{K}$  (такое измерение дает сильно заниженный результат).

Среди немногих теоретических работ, доложенных на конференции, можно выделить работу К. Н. Ульянова (ВЭИ им. В. И. Ленина), в которой исследовалось влияние выхода излучения на отклонение от термодинамического равновесия в плазме. Решается одномерное кинетическое уравнение с членом, учитывающим излучение. Получена функция распределения электронов по скоростям, выведены соотношения баланса, полученные с помощью интегрирования кинетического уравнения. Задача решена в приближении идеальной плазмы, так что предложенное решение годится для плотностей электронов  $N_e \leq 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Работа Г. Л. Иосельсона (ХГИМИИ, Харьков) посвящена измерению электронной температуры по тепловому радионизлучению с автоматическим введением поправки на нечерноту излучения. Предложенный метод позволяет на уже созданной установке измерить  $T_e$  до значений  $\sim 1 \text{ эВ}$  (возможно измерять температуры электронов до 10 эВ). К сожалению, измерения проводились в достаточно разреженной плазме ( $N_e \approx 10^{12} \div 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ).

Из других работ, доложенных на второй секции, можно отметить также работы Н. Г. Забудкиной и Л. А. Тонконогой (ИТИ, Алма-Ата) «К вопросу об использовании линий вольфрама 4659 Å, 4680 Å для определения температуры плазменной струи», В. А. Попова (ЭНИИ) «Определение сечения столкновения щелочных металлов с электронами низкой энергии», В. Н. Ветлугского, А. Т. Онуфриева, В. Г. Севостьяненко (ИТиПМ) «Расчет цилиндрической дуги с учетом переноса энергии излучения», А. Л. Рудницкого «К измерению температуры плазмы спектральными методами» и некоторые другие работы.

Полезная дискуссия позволила выявить явные преимущества спектроскопических методов диагностики плазмы. К сожалению, на конференции не было представлено работ по лазерной диагностике низкотемпературной плазмы.

Из работ, представленных на первой секции, необходимо отметить цикл работ по критериальному обобщению параметров низкотемпературной плазмы с помощью теории подобия. К интересным докладам в этой области безусловно относятся работы Г. Ю. Даутова и М. Ф. Жукова (ИТиПМ) «Критериальное обобщение характеристик плазматронов вихревой схемы», Н. М. Белянина (ЦИАМ, Москва) а также другие работы. Обобщенные вольт-амперные характеристики, полученные в такого рода работах, облегчают теоретический анализ. Дискуссия, состоявшаяся на заседаниях секции, показала, однако, что созданная теория подобия еще не настолько хорошо разработана, чтобы существенно помогать в прогнозировании при создании новых установок.

На конференции были представлены работы по созданию диагностических приборов. В качестве примера можно указать на хороший стандартный прибор для измерения температуры низкотемпературной плазмы по относительным интенсивностям линий цезия (автор Кондыба, Харьков). Кстати, этот прибор в настоящее время демонстрируется на ВДНХ.

На третьей секции было доложено несколько важных работ по применению низкотемпературной плазмы, в том числе и по промышленному применению. Необходимо отметить работы А. С. Плешанова (ЭНИИ) «Анизотропия низкотемпературной плазмы и оптимизаторы МГД-генераторы», Э. К. Чекалина и В. С. Шуманова «Теплообмен потока плазмы лития с — ИЭ,

твердым телом» (ЭНИН), Н. Заке, В. Страупмане (Институт энергетики — ИЭ, Рига) «Влияние примеси твердых частичек на электропроводность высокотемпературной азотной струи» и т. д.

Плазмотроны нашли широкое применение в плазменной металлургии. На конференции обсуждались применение плазмотронов для скоростной непрерывной плавки некоторых материалов (В. М. Туруллин, НИИ-ЦЕММАШ), получение полупроводниковых и тугоплавких материалов в низкотемпературной плазме (Г. Я. Умаров, С. Е. Ерметов, Ф. Р. Каримов, Физико-технический институт, Ташкент), разработка и исследование электродуговых подогревателей газов для прямого получения железа на опытной установке, резки и зачистки проката черных металлов (Н. П. Беленко, И. И. Морев, Б. С. Де, Политехнический институт, Алма-Ата), получение вольфрама методом плазменной металлургии (Н. Н. Рыкалин, ИМЕТ, Москва), разработка электродуговых генераторов низкотемпературной плазмы для бурения горных пород и т. д.

Конференция продемонстрировала также успехи плазмохимии. В этой области можно отметить работы Л. С. Полака и В. С. Щипачева (ИНХС) «Получение связанного азота из воздуха и воды в плазменной струе и оптимизация этого процесса», Ф. Г. Вурзеля и Л. С. Полака «Получение непереходных соединений из жидких и газообразных углеводородов в плазменной струе», а также другие работы. Практическое значение этих работ очевидно.

В целом прекрасно организованная конференция (организатор — Институт теоретической и прикладной механики СО АН СССР) внесла существенный вклад в понимание физики низкотемпературной плазмы и дала важные практические результаты как по экспериментальным методикам, так и по промышленному использованию низкотемпературной плазмы.

Труды конференции будут опубликованы в журнале «Теплофизика высоких температур» АН СССР.

Л. П. Кудрин

## Современные тенденции в активационном анализе

В апреле 1965 г. в Колледж-Стейшен (США, шт. Техас) МАГАТЭ, Евратом, КАЭ США и Техасский университет провели Международную конференцию по активационному анализу. В работе конференции приняло участие около 450 ученых и специалистов из 28 стран, в том числе из Бельгии, Великобритании, Венгрии, СССР, США, Франции, Японии. Представлено более 70 докладов.

На конференции были обсуждены современные тенденции в активационном анализе, в частности: общие проблемы активационного анализа, получение сверхчистых материалов, активация заряженными частицами и нейтронами переменной энергии, ядерные реакции, наиболее приемлемые для этих целей, новые радиохимические методы, средства активационного анализа, методики измерений и обработки их результатов с применением средств вычислительной техники, а также некоторые аспекты использования методов активационного анализа в науке и промышленности.

Среди сообщений, посвященных общим вопросам элементного анализа состава вещества, обращает внимание доклад А. Смайла (Великобритания), который сделал попытку оценить роль активационного анализа в исследованиях сверхчистых материалов и показал его преимущества по сравнению с другими аналитическими способами анализа элементного состава вещества.

Представители Национального бюро стандартов США рассказали о программе, позволяющей существенно расширить возможности активационного анализа. Эта программа предусматривает создание реактора мощностью 10 Мвт, линейного ускорителя электронов до энергий 100 Мэв и других источников ядерных излучений, обеспечивающих получение потоков нейтронов с плотностью до  $3 \cdot 10^{14}$  нейтр/см<sup>2</sup>·сек. Было также сообщено, что методом активационного анализа определялось содержание теллура в эталонах белого чугуна и патронной латуни, которое составило от  $16 \cdot 10^{-5} \pm 7 \cdot 10^{-5}$  до  $33 \cdot 10^{-4} \pm 7 \cdot 10^{-4}\%$  для патронной латуни и от  $4 \cdot 10^{-3} \pm 6 \cdot 10^{-4}$  до  $7,5 \cdot 10^{-2} \pm 4 \cdot 10^{-2}\%$  для чугуна. Эти результаты сравнимы с результатами, полученными спектроскопическим методом.

В одном из докладов сообщалось о применении в Ок-Риджской национальной лаборатории ускорителя типа

Ван де Граафа, ускоряющего ионы He<sup>3</sup> до энергии 10 Мэв, для определения содержания кислорода в поверхностных слоях материалов. Образцы Fe, Ge, Si, Be и эталона ZrO<sub>2</sub> и SiO<sub>2</sub> облучались в течение 1 мин. В облученных образцах измерялось излучение F<sup>17</sup> и O<sup>15</sup>, что позволило определить содержание кислорода с точностью до  $2 \cdot 10^{-10}$  г. Для анализа содержания металлоидов в ядерных материалах использовался линейный ускоритель электронов (до 40 Мэв), а также циклотрон, ускоряющий α-частицы до энергии 44 Мэв и протоны до 30 Мэв. Проведенные исследования активации заряженными частицами показали возможность определения содержания кислорода, углерода и азота в ядерных материалах с чувствительностью  $10^{-7}$ — $10^{-9}$  г.

На конференции обсуждались также методы определения элементного состава вещества по регистрации спектра γ-излучения, возникающего в результате захвата нейтронов, и вторичным реакциям.

В настоящее время главными трудностями при проведении активационного анализа являются возможность интерференции наведенного излучения, возникающего при таких реакциях, как  $(n, p)$ ,  $(n, \alpha)$ ,  $(n, 2n)$ ,  $(n, n^1)$ , и вероятность образования одного и того же изотопа при активации вещества, являющегося смесью элементов. Для существенного облегчения задачи разделения спектров предложено облучать образцы потоком нейтронов переменной энергии, что позволит ввести дополнительный критерий различия элементов по способности образца активироваться в зависимости от величины энергии облучающих частиц.

В докладах и других материалах конференции большое внимание уделялось генераторам нейтронов. В таблицах приведены данные о стационарных ускорителях, используемых для нейтронного активационного анализа в некоторых зарубежных странах (табл. 1), генераторах нейтронов типа Кокрофта — Уолтона, применяемых для этих же целей (табл. 2) и генераторах нейтронов с нейтронными трубками (табл. 3). Несмотря на значительное разнообразие типов генераторов нейтронов, большинство их представляют собой сложные громоздкие устройства, малоудобные для использования в промышленных условиях.