

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКХРОНИКА**СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОВ В УДАРНЫХ ТРУБАХ В США**

С 20 мая по 19 июня 1961 г. автор заметки посетил 11 университетов и институтов США и ознакомился с состоянием и постановкой работ по спектроскопии. Здесь будут изложены факты и впечатления, связанные только со спектроскопическими исследованиями, проводимыми на ударных трубах *).

При нст он с к и й у н и в е р с и т е т (Принстон, Нью-Джерси). Исследования в ударных трубах ведутся в двух лабораториях: в лаборатории проф. Блэкнея и в лаборатории проф. Хорнига. Блэкней довольно давно начал работать над теорией ударной трубы. В старых своих работах он дал описание ударных труб различных конструкций и изложил их теорию, исследовал взаимодействие, дифракцию и отражение ударных волн. Он также провел исследование ударных нагрузок на ряд моделей.

В настоящее время в лаборатории Блэкнея изучается ионизация цезия за ударной волной в аргоне ($p_0 = 5$ мм рт. ст.). Ударная труба нагревается до 500°C . Работа ведется при $M \sim 6$ (M — число Маха) и температуре газа $4000\text{—}5000^\circ\text{K}$, при которой достигается степень ионизации цезия $\sim 0,5$. За ударной волной наблюдается запаздывание свечения примерно на 10 мксек, а также запаздывание ионизации. Намечено провести измерение времени релаксации ионизации и выяснить причину этой релаксации.

Проф. Хорниг до прихода в Принстонский университет работал в Университете Брауна. Там он разработал метод измерения толщины фронта ударной волны. Метод этот основан на регистрации с помощью фотоумножителя света, отраженного от фронта ударной волны. По форме сигнала на осциллографе и его длительности можно определить не только толщину фронта ударной волны, но и его форму. С помощью этого метода определены толщины фронта ударной волны в различных газах (N_2 , Ar, H_2 , CO, CO_2 , N_2O) и жидкостях.

В лаборатории изучена вращательная релаксация кислорода. Начата работа по изучению колебательной релаксации HCl, DCl, HBr, DBr с помощью регистрации инфракрасного излучения безынерционным приемником. Изучается также процесс диссоциации бромистого циана и рекомбинации атомов, входящих в его состав. Исследование ведется с помощью регистрации излучения циана.

М а с с а ч у з е т с к и й т е х н о л о г и ч е с к и й и н с т и т у т (Кембридж, Массачузетс). В лаборатории проведены теоретические исследования пограничного слоя в магнитогидродинамическом потоке (Моффэт) и в плазме (Фэй). Проводится исследование влияния различных конфигураций магнитного и электрического полей на сверхзвуковые потоки в ударных трубах. В большинстве опытов исследуемым газом является аргон. В одном из экспериментов за счет наложения электрического поля на один из отсеков ударной трубы удается повысить число M от 15 (без поля) до 24.

В другом эксперименте изучается передача потоку плазмы энергии и диффузия магнитного поля при импульсном прохождении тока в витке, окружающем ударную трубу. В лаборатории сооружается подогреваемая ударная труба для исследования паров натрия, образования в них пограничного слоя и переноса тепла.

В последнее время проведена теоретическая и экспериментальная работа по изучению Т-образной электромагнитной ударной трубы.

К о р н е л с к и й у н и в е р с и т е т (Итака, Нью-Йорк). Здесь ударные трубы широко применяются в лабораториях профессоров Реслера и Брауна для изучения химической кинетики. Разработанные Реслером и Шайбе метод для изучения распределения плотности в газах был применен для изучения колебательной и диссоциационной релаксации N_2 , O_2 , H_2 , D_2 , CO, CO_2 . В лаборатории Реслера проведена

*) Отчет об ознакомлении с другими работами опубликован в журнале «Оптика и спектроскопия».

существенная работа по изучению взаимодействия отраженной ударной волны с пограничным слоем.

В настоящее время экспериментально изучается время установления равновесия за ударной волной в смеси $\text{Ar} + \text{CH}_4$ (сферическая молекула). Начата работа по нахождению радикалов бензонетрила за ударной волной. Изучена скорость реакции азометана.

С помощью расширения сжатого газа, приводящего к замораживанию, предполагается исследование свободных радикалов. В ударной трубе можно обеспечить скорость замораживания 10^7 град/сек . Проводятся также измерение скорости рекомбинации атомов кислорода после охлаждения ударной волной.

В лаборатории проф. Бауэра имеется химическая ударная труба. С ее помощью измерена энергия диссоциации дидиана, изучены реакции $\text{H}_2 + \text{D}_2 \rightarrow 2\text{HD}$; $\text{CH}_3\text{N}=\text{NCH}_3 \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{CH}_3$. Изучается поведение $\text{C}_2\text{H}_2\text{Cl}_2$ за фронтом ударной волны с помощью измерения интенсивности молекулярных полос в инфракрасном спектре.

При измерениях температуры аргона за отраженной ударной волной методом обращения спектральных линий Бауэр и его сотрудники обнаружили завышение температуры по сравнению с расчетной, что находится в противоречии с работами Файзуллова, Гейдона и других. Реслер объясняет это завышение за счет взаимодействия отраженной волны и пограничного слоя. Намечены измерения вероятностей перехода хрома за ударной волной в смеси $\text{Ar} + \text{N}_2 + \text{Cr}(\text{CO})_6$. Авторы уже показали, что за ударной волной колебания N_2 , диссоциация $\text{Cr}(\text{CO})_6$ и ионизация хрома равновесны.

Мичиганский университет (Анн-Арбор, Мичиган). В лаборатории проф. Лапорта изучена интерференция двух ударных волн, возникающих при отражении от гребешка (одна волна от вершины гребня, вторая от основания).

Имеется установка для исследования цилиндрических ударных волн. Проверяется теория Седова—Неймана—Теллора. В ударной трубе для высокотемпературных исследований измеряются вероятности переходов линий Cr I и Cr II . За падающей волной в неоне с примесью $\text{Cr}(\text{CO})_6$ получаются температуры $\sim 4000\text{—}5000^\circ$, за отраженной волной $\sim 12\ 000^\circ$. Регистрация спектра фотографическая, с разверткой во времени.

Калифорнийский технологический институт (Пасадена, Калифорния). В лаборатории проф. Пеннера в ударной трубе проведены измерения силы осциллятора полосы OH . В настоящее время по абсолютной и относительной интенсивности вращательных линий OH измеряется температура за ударной волной.

Изучена кинетика разложения NH_3 в смеси $\text{NH}_3 + \text{Ar}$ за отраженной ударной волной. С помощью малоинерционного инфракрасного приемника количественно изучается инфракрасное излучение NH_3 за ударной волной в аргоне. Намечено изучение инфракрасного спектра H_2O , CO_2 и CO .

Начато измерение вероятностей переходов Ti и Si . В ударную трубу они вводятся в виде SiH_4 и TiCl_4 . Регистрация излучения ведется фотоэлектрически с помощью восьмиканального хильгоровского спектрометра.

Университет Мэриленда (Колледж Парк, Мэриленд). Профессора Грим и Колб развили метод получения ударных волн в Т-образной трубе за счет магнитного поля. В Т-образной трубе исследованы водород и гелий. За ударной волной в водороде измерялись интенсивности и контуры линий H_α , H_β , H_γ , а также интенсивность сплошного спектра и $\text{Ly}-\alpha$. По интенсивности линий водорода и сплошного спектра получены надежные данные о температуре и концентрации заряженных частиц.

Аналогичное исследование по линиям и по сплошному спектру выполнено за ударной волной в гелии. В Т-образной ударной трубе с гелием (1—10 мм) можно получить плотности заряженных частиц $\sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$ при температуре 2—5 эв. Сопоставление экспериментальных данных о температуре и плотности заряженных частиц с расчетными показало, что имеет место расхождение, достигающее ста процентов. Возможно, что оно связано с предварительной фотоионизацией газа коротковолновым ультрафиолетовым излучением, распространяющимся от искры, вызывающей распространение ударной волны.

Работы, проводимые в США с помощью ударных труб, показывают, что ударные трубы получили очень широкое распространение в лабораториях США.

С их помощью сравнительно просто удается получить для исследования образцы газов при давлениях и температурах, лежащих в широком диапазоне. Однако кратковременность существования этих образцов предъявляет значительные требования к аппаратуре. Обычно в лабораториях США ударные трубы очень богато оборудованы различной аппаратурой. Спектральные аппараты в основном в качестве диспергирующего элемента имеют дифракционные решетки, а не призмы, что позволяет при большой светосиле иметь большую дисперсию. Фотоэлектрические спектрометры имеют до восьми каналов. Имеются спектрографы с разрешением по времени до 10^{-8} сек .

Очень большое распространение при исследованиях на ударных трубах получило фотосопротивление — германий, легированный золотом, — позволяющее регистрировать инфракрасное излучение до 10 мк при постоянной времени 0,1—1 мксек. Применение этого сопротивления позволяет провести много важных и интересных исследований.

Н. Н. Соболев