

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ УДАРНО-НАГРЕТОГО ВОЗДУХА НА ДВУХДИАФРАГМЕННОЙ УДАРНОЙ ТРУБЕ

П.В. Козлов, Ю.В. Романенко

*НИИ механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова,  
Москва, 119192, Мичуринский проспект, 1*

### Аннотация

Приведены результаты экспериментального исследования абсолютной интенсивности излучения ударно-нагретого воздуха в спектральном интервале 200÷400 нм, при скоростях ударной волны 4÷7 км/с. Оптические измерения проведены на ударной трубе с помощью ICCD камеры, в качестве толкающего газа использовался гелий.

### EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF SHOCK HEATED AIR RADIATION ON THE DOUBLE-DIAPHRAGM SHOCK TUBE

Presented results of shock heated air radiation absolute intensity experimental study in the spectrum range of 200÷400nm with a shock wave speed of 4÷7 km/s. Shock tube optical measurements were executed in ICCD camera utilizing helium as a driven gas.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Исследования процессов, происходящих в воздухе и атмосферах других планет при высоких температурах, широко проводились во второй половине XX-го века на однодиафрагменных ударных трубах. В качестве толкающего газа использовались водород, гремучая смесь с добавками гелия, или плазма. Неоднократно исследователи обращали внимание на то, что в начальный момент раскрытия диафрагмы заметное количество толкающего газа попадает в исследуемый газ [1, 2]. Это может искажать результаты исследований вследствие активного взаимодействия водорода с горячим воздухом. В 1956 г. в работе Хеншола [3] была показана возможность получения сильных ударных волн в газе при использовании многодиафрагменных ударных труб. В таких ударных трубах непосредственно толкающим исследуемый газ веществом может быть гелий, который химически инертен по отношению к исследуемому газу. Мы решили использовать этот способ в наших исследованиях. В результате была создана двухдиафрагменная ударная труба [4]. В целях облегчения проведения экспериментов была создана компьютерная модель ударной трубы и программы для расчетов с удобным для работы интерфейсом [5].

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

### 2.1. Ударная труба

Схема двухдиафрагменной ударной трубы представлена на рис.1. Труба состоит из трех секций, соединяемых с помощью фланцев. Секции представляют собой отрезки труб с внутренним диаметром 50мм, внешним-60мм с приваренными к ним фланцами. Трубы и фланцы изготовлены из нержавеющей стали. Между фланцами секций камеры высокого давления (КВД) и камеры промежуточного давления (КПД) заполняемой гелием, а также секций КПД и камеры низкого давления (КНД) располагаются кассеты с наборными диафрагмами из лавсановой пленки толщиной

20 мкм. При необходимости конструкция кассет позволяет поставить за диафрагмой крестообразный металлический нож. Секция КНД отделена от демпферного бака вентилем-заслонкой с Ду=60 мм, что позволяет не напускать воздух в демпферный бак при смене диафрагм. Демпферный бак и секция КНД вакуумируются безмасляным откачным постом DRYTEL-1025 до остаточного давления  $10^{-3}$  Па. В качестве толкающего газа в КВД используется водород или смесь гремучего газа с гелием.

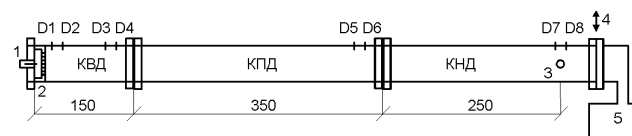


Рис. 1. Схема двухдиафрагменной ударной трубы. 1 – свеча зажигания; 2 – форкамера; 3 – кварцевое окно; 4 – вентиль-заслонка; 5 – демпферный бак

Для поджига гремучей смеси, в центре глухого фланца, закрывающего секцию КВД со стороны, противоположной диафрагме, расположен искровой промежуток (автомобильная свеча зажигания ФОРКАМ), через который можно осуществить наносекундный разряд керамических высоковольтных конденсаторов КВИ-3. Наносекундные времена разряда обеспечиваются тем, что конденсаторы и искровой промежуток представляют собой малоиндуктивный контур. Разряд в контуре возникает при самопробое искрового промежутка во время импульсного заряда (300÷400 мкс) керамических конденсаторов. Между глухим фланцем и секцией КВД может быть установлена форкамера. Форкамера имеет внутренний диаметр 46 мм и глубину 18 мм, по торцу форкамеры, направленному вглубь секции КВД, равномерно по площади расположено 20 отверстий диаметром 1.1 мм с профилем, соответствующим сверхзвуковому истеканию горячей гремучей смеси из полости форкамеры в секцию КВД.

В секции КНД на расстоянии 50 калибров от диафрагмы напротив друг друга расположены два оптических окна диаметром 10 мм для наблюдения за из-

лучением исследуемого газа. Материал окон можно оперативно менять. Секции ударной трубы оборудованы шлюзами для установки пьезоэлектрических датчиков, позволяющих осуществлять динамический контроль давления газа и скорость движения ударных волн в каждой секции.

## 2.2. Оптическая схема регистрации

Для проведения сравнения экспериментально зарегистрированных спектров ударно-нагретого газа с теоретически рассчитанными необходимо откалибровать в абсолютных единицах чувствительность всей оптической схемы. Традиционно эту процедуру проводят методом сравнения с известным источником [6].

На рис. 2 представлена оптическая схема, используемая как для проведения калибровки, так и для регистрации спектров излучения исследуемого ударно-нагретого газа.

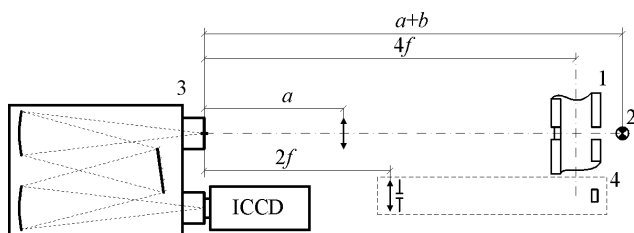


Рис. 2. Оптическая схема спектральных измерений. 1 – КНД с оптическими кварцевыми окнами; 2 – калибровочная вольфрамовая лампа СИРШ-8.5-200-1; 3 – спектрограф V&M50; 4 – положение линзы и второго кварцевого окна, при проведении экспериментов

Для установленной в спектрографе дифракционной решетки с числом штрихов 150 линий/мм дисперсия ICCD камеры совместно со спектрографом равнялась 0.33 нм/пиксель. Калибровка дисперсии спектрографа совместно с ICCD камерой проводилась по линиям ртути и рубидия с помощью ламп ДРГС-12 и газонаполненной рубидиевой лампы. Область спектральной чувствительности ICCD камеры находится в диапазоне длин волн 170÷870 нм. Чувствительность камеры калибровалась в диапазоне длин волн 200÷850 нм, в котором проводились измерения. Для этого диапазона выбиралось четыре поддиапазона с взаимным перекрытием друг друга. Для поддиапазонов от 400÷750 нм перед щелью спектрографа устанавливался фильтр ЖС-4, а для поддиапазона 750÷850 нм фильтр КС-2, с целью исключения влияния на регистрируемые спектры второго порядка решетки.

ICCD камера регистрировала сигнал  $U_0(\lambda)$ , пропорциональный спектральной плотности энергетической яркости  $L_0(\lambda)$  (СПЭЯ, в англоязычной литературе - spectral radiance) излучения лампы 2 и времени экспозиции  $\Delta t_{ex}$ :

$$U_0(\lambda) = k(\lambda) \cdot L_0(\lambda) \cdot \Delta t_{ex}, \quad (1)$$

где  $k(\lambda)$  – коэффициент передачи всей оптической схемы, учитывающий размер апертурной диафрагмы на линзе, пропускание спектрографа, фильтра, кварцевого окна, спектральную чувствительность ICCD камеры.

Излучение, регистрируемое ICCD камерой в процессе эксперимента в направлении, перпендикулярном

вектору скорости движения ударной волны, проходящей в измерительном сечении, равно

$$U_S(\lambda) = k(\lambda) \cdot l_{ST} \cdot \int_0^{t_S} f_S(\lambda, t) dt, \quad (2)$$

где  $t_S$  – время прохождения светящей пробки ударной волны через ось измерения;  $l_{ST}$  – диаметр ударной трубы;  $f_S(\lambda, t)$  – объемная спектральная плотность энергетической яркости излучения ударной волны (ед. измерений – Вт·м<sup>-4</sup>·ср<sup>-1</sup>).

СПЭЯ излучения ударной волны вдоль направления её распространения (излучение «вперед») равна

$$L_S(\lambda) = V_S \int_0^{t_S} f_S(\lambda, t) dt, \quad (3)$$

где  $V_S$  – скорость ударной волны.

Из формул (1)–(3) следует

$$L_S(\lambda) = V_S \cdot \frac{U_S(\lambda) \cdot L_0(\lambda) \cdot \Delta t_{ex} \cdot k_1^2}{U_0(\lambda) \cdot l_{ST}}, \quad (4)$$

где  $k_1 = b/a$ . Расстояния  $a$  и  $b$  при калибровке выбирались из условия создания уменьшенного изображения лампы 2 на щели спектрографа 3. При проведении эксперимента линза помещалась на двойном фокусном расстоянии от щели спектрографа и оси ударной трубы,

Таким образом, по зарегистрированному излучению  $U_S(\lambda)$ , для ударной волны, движущейся со скоростью  $V_S$  и СПЭЯ излучения калибровочной лампы рассчитывалась спектральная плотность энергетической яркости излучения по направлению «вперед»  $L_S(\lambda)$  в единицах Вт·м<sup>-3</sup>·ср<sup>-1</sup>.

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

### 3.1. Исследование работы КВД в детонационном режиме

Сравнение результатов теоретического расчета режима работы трубы с экспериментальными результатами при наполнении КВД водородом, КПД-гелием и КНД-аргоном, показало, что разница между теоретическими и экспериментальными значениями числа Маха оказалась существенной. Теоретическая и экспериментальная длина пробки нагретого газа находятся в удовлетворительном согласии. Было высказано предположение, что большая разница между теоретическим и экспериментальным значениями числа Маха связана с потерями энергии при разрыве диафрагм, причем на первой (более толстой) диафрагме эта потеря больше. Общая потеря давления по сравнению с идеальной теорией оказывается чуть меньше порядка. При толкании водородом и использовании гелия в промежуточной камере, в камере низкого давления, наполненной аргоном до давления 133 Па, была получена скорость ударной волны 4.4 км/с.

Трудности эксплуатации КВД с использованием гремучей смеси в большой степени связаны с отсутствием точных математических моделей, позволяющих рассчитать процессы, происходящие в КВД после иницирования реакции горения в искровом промежутке. Также с тем, что на практике для работы КВД исполь-

зуют не химически чистые, а дешевые технические газы. Наши исследования в чистой гремучей смеси показали, что использование форкамеры ускоряет возникновение детонации. Известно, что для получения сильных режимов необходимо использовать в КВД комбинацию гремучей смеси с гелием. Нами, при наполнении секции КВД смесью  $H_2:O_2:He=2:1:3$  при общем давлении 438 кПа, в КНД, наполненной воздухом до давления 133 Па, была получена скорость ударной волны 6.94 км/с. При этом начальное давление гелия в КВД составляло 20 кПа. Анализ сигналов, полученных с пьезодатчиков D1-D4, установленных в КВД, показал, что волна расширения, порожденная многоточечным поджигом смеси на торце форкамеры, быстро превращается в довольно слабую ударную волну, эта ударная волна доходит до диафрагмы, разделяющей КВД и КНД, и отражается обратно. Через небольшое время смесь около диафрагмы взрывается и разрывает диафрагму, одновременно формируется детонационная волна, бегущая от диафрагмы к форкамере. Эта детонационная волна сжигает всю рабочую смесь, которой наполнена секция КВД. Мы надеемся, что дальнейшее исследование режимов горения и детонации рабочей смеси в секции КВД позволит повысить параметры ударной волны в секции КНД.

### 3.2. Исследование влияние толкающего газа

Данная двухдиафрагменная ударная труба может работать и в однодиафрагменном режиме. Используя эту возможность, нами были проведены исследования влияния толкающего газа на эмиссионные спектры ударно нагретых чистых газов. На рис. 3 и 4 приведены СПЭЯ излучения ударно-нагретого кислорода для скорости ударной волны 3 км/с, полученные в одно и двухдиафрагменном режимах.

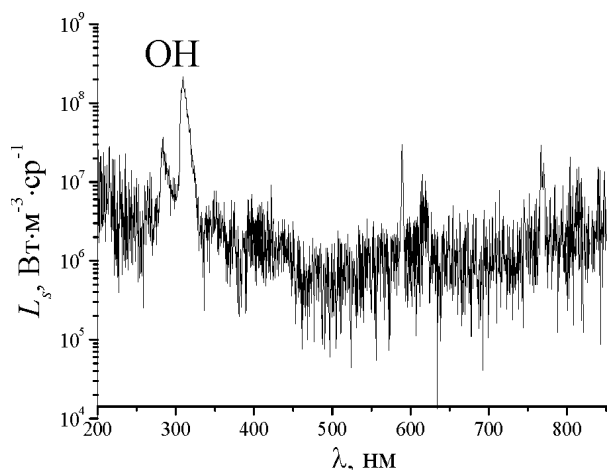


Рис. 3. СПЭЯ излучения ударно-нагретого кислорода «вперед» для однодиафрагменного режима работы ударной трубы. Скорость ударной волны 3 км/с

Видно, (рис.3), что интенсивность излучения радикала ОН (306 нм) в однодиафрагменном режиме более чем в сто раз выше, чем в двухдиафрагменном (рис.4).

Так как в этом случае лимитирующим компонентом, влияющем на образование ОН, является только водород, это указывает на значительное проникновение толкающего газа при разрыве диафрагмы в исследуемый газ.

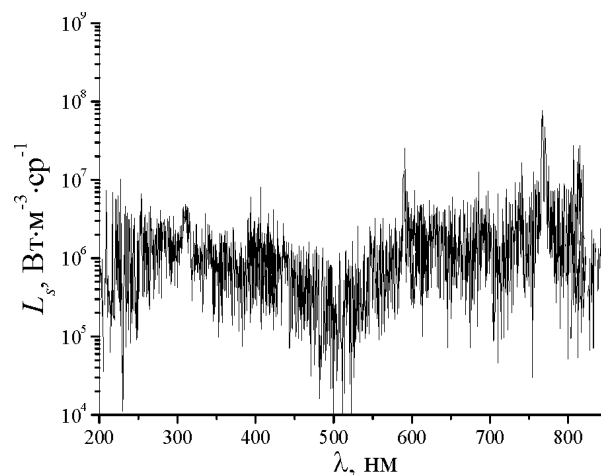


Рис. 4. СПЭЯ излучения ударно-нагретого кислорода «вперед» для двухдиафрагменного режима работы ударной трубы. Скорость ударной волны 3 км/с

Более детально исследование влияния толкающего газа изложено в нашей работе [7]. Из результатов работы следует, что при изучении физико-химических процессов в ударных волнах с помощью однодиафрагменных ударных труб необходимо учитывать проникновение толкающего газа в исследуемый газ. Количество проникающего газа может по нашим оценкам достигать 1%.

Если предметом изучения являются спектральные характеристики ударно нагретого газа, то получаемые результаты могут кардинально отличаться от действительности. Применение двухдиафрагменной ударной трубы позволяет практически исключить проникновение толкающего газа в исследуемый газ.

### 3.3. Излучение ударно-нагретого атмосферного воздуха

После проведения калибровки оптической схемы и получения стабильной работы ударной трубы в детонационном режиме для смеси  $H_2:O_2:He=2:1:3$  в КВД, была проведена серия экспериментов по регистрации спектров излучения ударно-нагретого воздуха для скоростей ударной волны 4÷7 км/с. На рис. 5 представлены СПЭЯ спектров излучения воздуха «вперед» для разных скоростей ударной волны.

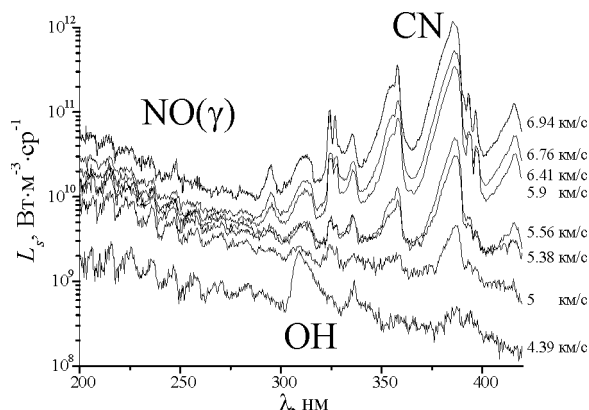


Рис. 5. СПЭЯ излучения ударно-нагретого воздуха «вперед» для различных скоростей ударной волны

В спектрах идентифицируются излучение молекулы  $NO(\gamma)$  в диапазоне длин волн 200÷280 нм, увеличивающаяся с ростом скорости ударной волны. Вклад

излучения радикала OH (из паров воды присутствующих в атмосферном воздухе) при скоростях выше 5 км/с становится незаметным на фоне увеличения излучения второй и первой положительной систем полос молекулы N<sub>2</sub>. Излучение системы фиолетовой системы полос радикала CN с увеличением скорости возрастает.

Для сопоставления экспериментально полученной СПЭЯ излучения с теоретической моделью, необходимо знать длину пробки ударно-нагретого газа. Длительность пробки регистрировалась с помощью ФЭУ, при этом дифракционная решетка в спектрографе устанавливалась в нулевой порядок.

Проведенные эксперименты также показали, что чувствительность оптической схемы позволяет уверенно регистрировать интенсивности СПЭЯ на уровне  $10^6 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{ср}^{-1}$ .

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Созданная двухдиафрагменная ударная труба и оптическая схема позволяют проводить абсолютные измерения СПЭЯ излучения ударно нагретых газов.
- Получен устойчивый детонационный режим работы КВД, позволяющий получать с хорошей воспроизводимостью скорости ударной волны 3-7 км/с при начальном давлении воздуха в КНД 133 Па.
- Показано, что при энергетических измерениях в спектрах излучения ударно-нагретых газов, выполненных на однодиафрагменных ударных трубах, влияние толкающего газа может приводить к значительным ошибкам. Двухдиафрагменная схема ударной трубы позволяет исключить влияние проникновения химически активного толкающего газа в исследуемый газ.
- Получены абсолютные значения СПЭЯ ударно-нагретого воздуха для начального давления 133 Па и скоростях ударной волны 4-7 км/с.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 09-08-00272.

#### СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- КВД – камера высокого давления;  
 КПД – камера предварительного давления;  
 КНД – камера низкого давления;  
 СПЭЯ – спектральная ой плотность энергетической яркости;  
 ICCD – Intensified Charge-Couple Device  
 $L(\lambda)$  – спектральная ой плотность энергетической яркости,  $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{ср}^{-1}$ ;  
 $f_S(\lambda, t)$  – объемная спектральная плотность энергетической яркости ударной волны,  $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-4}\cdot\text{ср}^{-1}$

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козлов П.В., Макаров В.Н., Павлов В.А., Шаталов О.П. Экспериментальное исследование колебательной дезактивации молекул CO в сверхзвуковом газовом потоке // *Механика жидкости и газа*, 2000, №3, с. 151–158.
2. Bogdanoff D.W., Park C. Radiative interaction between driver and driven gases in an arc-driven shock tube // *Shock Waves* (2002) 12: 205–214.
3. Henshall B. The use of a multi-diaphragm scheme in a shock tube, in: *Shock Tubes [Russian translation]*, Inostr. Lit., Moscow (1962).
4. Козлов В.П., Романенко Ю.В. // Ударная труба двухдиафрагменная (УТД)/ Отчет Института механики МГУ. №4856. 2006г. 26 с.
5. Путилин И.С. Расчет параметров газа в двухдиафрагменной ударной трубе. Сравнение с экспериментом // *Дипломная работа механико-математический ф-т, каф. аэромеханики МГУ, Москва 2008.*
6. Зайдель А.Н., Островская Г.В., Островский Ю.И. *Техника и практика спектроскопии* // 1972. М., Наука, 376 с.
7. Козлов В.П., Романенко Ю.В. Экспериментальное исследование излучения чистых газов на ударной трубе УТД // *Отчет НИИ механики МГУ. №5034. 2009г. 28 с.*