

6. А. П. Амосов, С. А. Бостанджиян, В. С. Козлов. ФГВ, 1972, 8, 3.  
7. Д. Маклин. Механические свойства металлов. М., «Металлургия», 1965.  
8. А. Э. Аверсон, В. В. Барзыкин, А. Г. Мержанов. Докл. АН СССР. 1968. 178, 1.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
ЗАВИСИМОСТИ ПОКАЗАТЕЛЯ УСИЛЕНИЯ  
В ГАЗОДИНАМИЧЕСКОМ ЛАЗЕРЕ  
НА СМЕСИ  $\text{CO}_2\text{—N}_2$  ОТ СОДЕРЖАНИЯ ПАРОВ ВОДЫ**

*П. В. Белков, В. П. Вакатов, Б. К. Ткаченко,  
Н. Н. Широков*

В литературе имеется значительное число теоретических и экспериментальных работ, в которых исследуются зависимости усиления и мощности генерируемого излучения от процентного содержания компонентов смеси  $\text{CO}_2\text{—N}_2\text{—H}_2\text{O}$ , от параметров торможения и от конфигурации сверхзвуковых сопел. Все эти работы находятся на ступени качественного описания явлений. Причиной этого в случае теоретических исследований является ограниченность знаний скоростей колебательной релаксации сталкивающихся молекул; в случае же экспериментального изучения причина, по-видимому, заключается в методике проведения эксперимента, а точнее в отсутствии контроля содержания паров воды в ресивере. К этому выводу авторы настоящей работы пришли на основе анализа экспериментальных данных, а также в результате собственных исследований по составлению смесей с парами воды. Цель настоящей работы — разработка метода составления газовых смесей с парами воды, а также способа их контроля для получения надежных экспериментальных данных по изменению усиления слабого зондирующего сигнала в сверхзвуковом потоке смеси  $\text{CO}_2\text{—N}_2\text{—H}_2\text{O}$ .

**Обзор экспериментальных работ**

1. В 1970—1974 гг. было опубликовано более десятка работ по экспериментальному исследованию показателей усиления в смеси  $\text{CO}_2\text{—N}_2\text{—H}_2\text{O}$ . В одной из первых работ по обнаружению инверсной населенности молекулы  $\text{CO}_2$  [1] была получена качественная зависимость показателя усиления в смеси  $X_{\text{CO}_2}:X_{\text{N}_2}$ , 1:4 ( $X_i$  — молярная доля компоненты  $i$  в смеси) от содержания в ней паров воды (рис. 1). Измерения были выполнены на аэродинамической установке. Условия эксперимента в [1] были следующими: 1) клиновое сопло: угол раскрытия сопла  $\varphi=13^\circ$ , длина разгонного участка  $l=50$  мм, высота критического сечения  $A^*=0,5$  мм, высота выходного сечения  $A=11,5$  мм,  $A/A^*=1:4$ ; 2) параметры газовой смеси: температура торможения  $T_0=1000$  К, давление торможения  $P_0=4,9$  атм.

Зондирование излучения осуществлялось на расстоянии  $L=5$  см от критического сечения сопла<sup>1</sup>.

Как следовало из экспериментов (см. рис. 1), зависимость усиления от содержания паров воды в смеси  $\text{CO}_2\text{—N}_2$  характеризуется быстрым ростом при увеличении процентного содержания паров воды

<sup>1</sup> В дальнейшем описании экспериментов значения  $T_0$ ,  $P_0$ ,  $X_{\text{CO}_2}/X_{\text{N}_2}$ ,  $A/A^*$ ,  $L$  будут выноситься на рисунки.

от 0 до  $1 \div 2\%$  с последующим медленным спадом. Причем при малых концентрациях паров ( $X_{H_2O} < 0,5\%$ ) усиление зондирующего излучения переходило в поглощение. Такая зависимость объяснялась тем, что молекулы воды вызывают ускоренную релаксацию молекул  $CO_2$  с нижнего лазерного уровня при течении газа в сверхзвуковой части сопла; сокращение времени жизни молекул на верхнем лазерном уровне за счет столкновений  $CO_2-H_2O$  начинает проявлять себя при концентрациях воды больше  $1:2\%$ .

Полученная в [1] зависимость  $\alpha(X_{H_2O})$  повторялась почти во всех последующих работах. Теоретические предположения объяснения такого поведения этой зависимости также оказались верными. Отметим, что концентрация паров воды в смеси  $CO_2-N_2$  изменялась в течение одного эксперимента, который длился  $\sim 1$  мин. При продувке осушенной смеси  $CO_2-N_2$  (концентрация паров воды при этом не превышала  $0,05\%$ ) наблюдалось поглощение. Затем в продолжение эксперимента, в момент входа смеси  $CO_2-N_2$  в нагреватель, распылялась вода с постоянным увеличением расхода.

2. На рис. 2 приведены экспериментальные результаты работы [2]. Здесь же приведены соответствующие теоретические кривые, рассчитанные по модели Андерсона [2]. Эксперименты проводились на установке с электроразрядным подогревателем. Расширение газа происходило в клиновом сопле ( $\varphi=20^\circ$ ,  $A=0,5$  мм,  $l=42$  мм). Из рассмотрения экспериментальных данных следует, что эксперименты достаточно хорошо подтверждают теоретическую модель Андерсона однако речь может идти только о качественном сравнении теории и эксперимента, так как экспериментальных данных явно недостаточно, тем более, что при  $X_{H_2O}=1,5\%$  измеренные значения показателя усиления имеют значительный разброс. О качестве проведенных экспериментов судить трудно, поскольку не представлены соответствующие осциллограммы измерений усиления, не сообщается о способе подачи воды в камеру и об измерении концентрации паров воды в смеси.

3. В работе [3] для проведения экспериментов использовалась установка, где газ в ресивере нагревался за счет сгорания смеси  $CO-H_2$  в кислороде. Образующаяся газовая смесь  $CO_2-N_2-H_2O$  расширялась в клиновом сопле ( $\varphi=30^\circ$ ,  $A^*=1,3$  мм). Экспериментальные данные представлены на рис. 3, там же изображена расчетная кривая. В работе не заостряется внимание на том, как хорошо происходило перемешивание газов в камере сгорания.

4. В работе [4] так же, как и в [3], для экспериментов использовалась установка, выполненная по схеме камеры сгорания (смесь  $CO-H_2$  сгорала в кислороде). Эксперименты проводились на двух клиновых соплах с  $A^*=1,5$  мм ( $T_0=1400$  К,  $p_0=5$  атм,  $X_{H_2O}=0,01$ ,  $A/A^*=15$ ,  $\varphi=30^\circ$ ,  $l=40$  мм) и  $A^*=0,75$  мм ( $A/A^*=30$ ,  $\varphi=30^\circ$ ,  $l=40$  мм,  $X_{H_2O}=0,08$ ,  $T_0=1700$  К,  $p_0=7$  атм). На рис. 4 представлены результаты соответствующих измерений. Разброс в экспериментальных данных невелик и каждый эксперимент имеет определенную ценность, однако объединение их в некую совокупность, представленную на рис. 4, большого интереса не представляет, так как параметры торможения газовой смеси при увеличении содержания паров воды претерпевают значительные изменения.

5. Большое количество экспериментальных данных по измерению усиления слабого зондирующего сигнала, полученных на установке с электродуговым подогревателем смеси, представлено в [5]. В установке использовался блок, состоящий из 24 профилированных со-

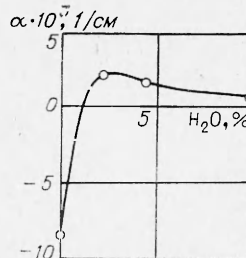


Рис. 1. Результаты работы [1].

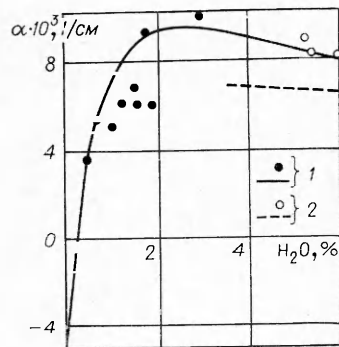


Рис. 2. Теория Андерсона [2]:  
 $A/A^* = 30, L = 4$  см.  
 1 —  $T_0 = 1650$  К,  $p_0 = 11$  атм,  
 $X_{CO_2}/X_{N_2} = 0,215$ ; 2 —  $T_0 = 200$  К,  
 $p_0 = 11$  атм,  $X_{CO_2}/X_{N_2} = 0,24$ .

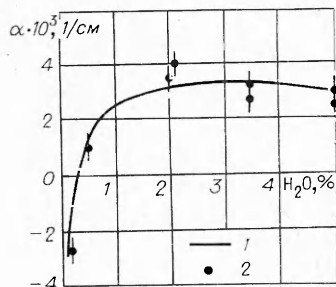


Рис. 3. Экспериментальные данные работы [3]:  $T_0 = 1650 \pm 50$  К,  
 $P_0 = 7,5$  атм,  $X_{CO_2} = 0,2, A/A^* = 16, L = 3,5$  см.  
 1 — теоретическая кривая; 2 — эксперимент [3].

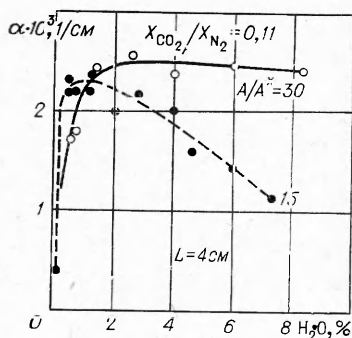


Рис. 4. Результаты работы [4].

чего газовая смесь поступала в ударную трубку. При такой методике составления смеси с парами воды необходимо контролировать их концентрацию в рабочем канале после напуска, так как не ясно, достаточно ли двухчасового перемешивания для получения однородной концентрации паров воды в «объеме», соответствующем давлению насыщения и, кроме того, адсорбция водяных паров стенками рабочего канала ударной трубы может привести как к уменьшению

пел, каждое из которых было рассчитано на  $M=4$  и имело высоту критического сечения 1 мм. Зондирование велось в сечении, расположенном на расстоянии 25 мм от среза сопла вниз по потоку. Расхождение на рис. 5 теоретических значений с экспериментальными авторами [5] объясняют неопределенность в величине скорости релаксации верхнего лазерного уровня при столкновении молекул углекислого газа с молекулами воды. Однако значительный разброс опытных данных при концентрации паров воды  $2 \pm 0,5\%$  указывает на слабую методику подачи воды в ресивер. В работе не дается подробного описания этой операции и ничего не говорится о контроле концентрации паров воды в ресивере или о точности их значения.

6. В работе [6] так же, как в [3, 4], нагрев лазерной смеси происходил за счет сгорания  $CO-H_2$  в кислороде (рис. 6). После сгорания газовая смесь подвергалась расширению через плоское профилированное сопло ( $A^* = 0,2$  мм). Воспроизводимость экспериментальных данных по измерению показателя усиления в [6] составляет  $\pm 0,04\% \text{ см}^{-1}$ . Такая хорошая воспроизводимость достигнута за счет контроля концентрации компонентов смеси до и после сгорания. Погрешность подачи компонентов топлива не превышала 5%, а в иных случаях и 1%. Большое внимание уделялось хорошему перемешиванию топливных компонентов. Температура торможения измерялась термопарой, помещенной в камеру сгорания. Полученные значения температуры сопоставлялись с результатами измерений температуры торможения при помощи зонда, помещенного в сверхзвуковое сопло.

7. В работе [7] усиление измерялось на выходе из сверхзвукового осесимметричного сопла, помещенного в торец ударной трубы. Не останавливаясь на подробном описании полученных в [7] экспериментальных данных, приведем способ составления смесей с парами воды, предложенный авторами: в откаченный объем помещался сосуд с водой и термометром, по показанию которого определялось давление насыщенных паров воды, перемешивание  $CO_2, N_2, H_2O$  проводилось более двух часов, после

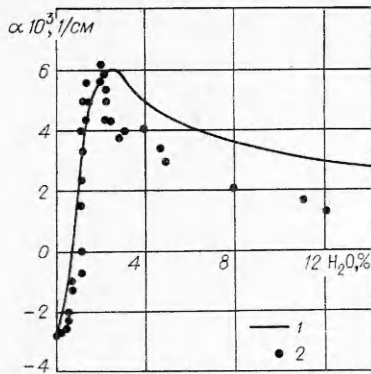


Рис. 5. Экспериментальные данные работы [5]:  $T_0=1500$  К,  $P_0=8,7$  атм,  $X_{CO_2}=0,063$ ,  $A/A^*=36$ ,  $L-l=2,5$  см.  
1 — теория Андерсона [2]; 2 — эксперимент [5].

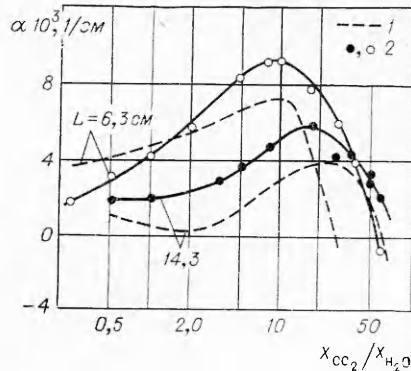


Рис. 6. Типичные результаты по измерению усиления:  $T_0=1500$  К,  $p_0=12,3 \div 12,6$  атм,  $X_{N_2}=0,7$ ,  $A/A^*=32$ .  
1 — теория Андерсона; 2 — эксперимент [6].

концентрации паров воды в канале по сравнению с концентрацией и «объеме», так и к увеличению в случае, если исследуется смесь  $CO_2-N_2$  с малым содержанием паров воды и стенки рабочего канала ударной трубы недостаточно хорошо очищены после проведения предыдущего эксперимента.

8. Авторами работы [8] определялась максимальная концентрация паров воды, при которой возможно еще существование инверсий в условиях газодинамического  $CO_2$ -лазера. В экспериментах использовалась ударная труба. Смесь, нагретая отраженной ударной волной, вытекала через щель высотой 0,8 мм с углом раствора  $60^\circ$ . Температура и давление торможения варьировались в широких пределах ( $p_0=8 \div 88$  атм). Усиление измерялось на различном расстоянии от щели. На рис. 7 в трехмерном пространстве представлена зависимость максимального (для  $\alpha(L)$ ) показателя усиления от концентрации паров температуры  $T_0$ . Сплошные кривые приведены через экспериментальные точки, обозначенные на рис. 7 черными кружками, штриховыми кривыми представлены результаты теоретического расчета для  $p_0=20$  атм, выполненного теми же авторами (это значение давления найдено оптимальным для щели с  $A^*=0,8$  мм) Белыми кружками показаны результаты расчетов с заданием точных условий опыта. Имеет место хорошее согласие теории и эксперимента, однако среднее квадратичное отклонение экспериментальных точек, как правило, превышает 20%. Описание метода составления смеси  $CO_2-N_2-H_2O$  и способа контроля концентрации паров воды отсутствует.

9. Для нагрева смеси  $CO_2-N_2-H_2O$  в работе [9] использовалась ударная труба. Расширение газа происходило в клино-

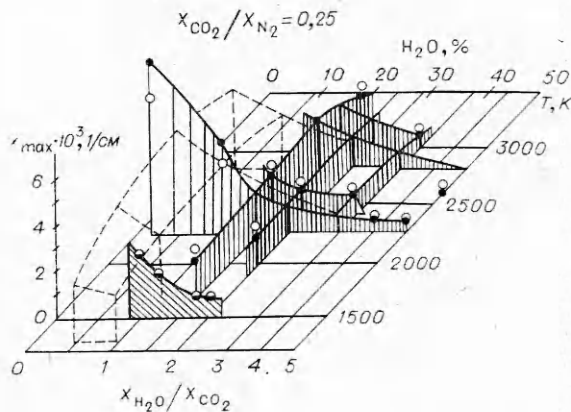


Рис. 7. Зависимость максимального показателя усиления от концентрации паров воды и  $T_0$  [8].

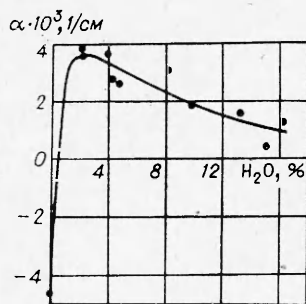


Рис. 8. Экспериментальные результаты работы [9]:  $T_0 = 1790$  К,  $p_0 = 5,3$  атм,  $X_{CO_2}/X_{N_2} = 0,18$ ,  $A/A^* = 22$ ,  $L = 5,6$  см.

вом сопле ( $\varphi = 30^\circ$ ,  $A^* = 2$  мм), профиль дозвуковой части — окружность с радиусом закругления  $z = 4$  мм. Для задания определенного количества воды в смеси использовался тот же способ, что и в [7] (рис. 8). В отличие от [7] в [9] использовалась система контроля паров воды в канале с помощью детектора ИК-излучения. Сведений о том, измерялась ли концентрация паров воды в рабочем канале, не приводится, хотя, как указывалось выше, при таком способе задания влажности, особенно при малых концентрациях паров воды ( $\leq 1\%$ ), контроль содержания паров воды в смеси необходимо производить в канале ударной трубы непосредственно перед запуском установки.

10. Авторы [10] исследовали зависимость  $\alpha(X_{H_2O})$  на ударной трубе с использованием профилированных сопел с большим значением  $A/A^*$ . Применялся способ задания определенной концентрации паров воды в смеси с использованием химических реакций:

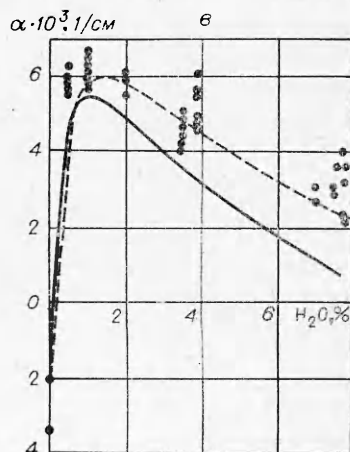
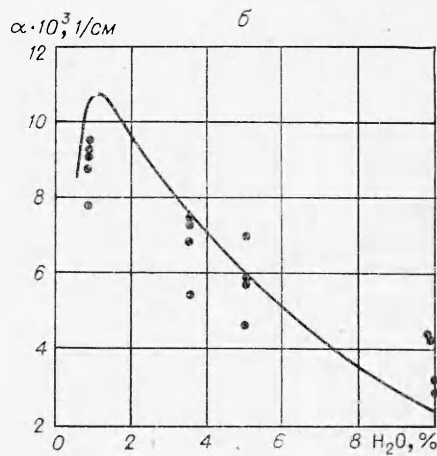
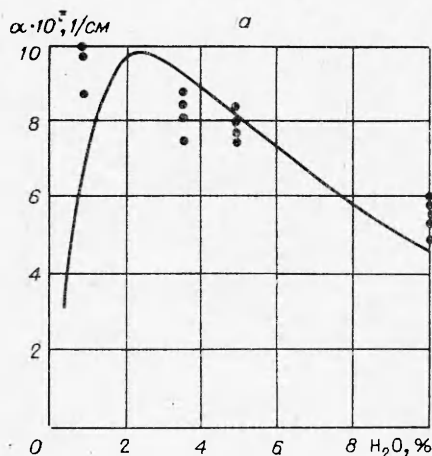
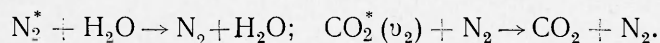


Рис. 9. Экспериментальные результаты работы [10]:  $T_0 = 1800$  К,  $X_{CO_2} = 0,07$ .

а)  $p_0 = 37,5$  атм,  $A/A^* = 50$ ,  $A^* = 0,356$  мм;  $L = 1,27$  см; б)  $p_0 = 37,5$  атм,  $A/A^* = 50$ ,  $A^* = 0,356$  мм,  $L = 12,7$  см; в)  $p_0 = 20$  атм,  $A/A^* = 20$ ,  $A^* = 1$  мм,  $L = 1,27$  см.

Содержание паров воды рассчитывалось из условия химического равновесия. Больше предпочтение авторы отдавали реакции (В), так как из-за отсутствия констант скоростей реакции (А) не известно, успеет ли произойти химическое равновесие за время работы установки при  $T_0 < 1800$  К; кроме того, в случае (А) надо было делать поправку в показателе усиления на присутствие в смеси СО. Экспериментальные результаты [10] представлены на рис. 9. Там же даны расчетные кривые Андерсона с измененными (по сравнению с применяемыми в расчетах [2, 3, 5, 6]) скоростями реакций:



На рис. 9, в приводится сравнение результатов расчета с использованием «новых» и «старых» данных (подробнее в [11]).

Сравнение результатов измерения [10] с исследованиями [3, 4, 6], где пары воды в смеси образовывались за счет сгорания СО—Н<sub>2</sub> в кислороде, показало, что эксперименты, проведенные на ударной трубе [10], дают существенно больший разброс, чем проведенные на горелке. Причины увеличения разброса не ясны. Можно лишь предположить, что как и в случае реакции (А), не успевает установиться химическое равновесие за отраженной ударной волной, так как время работы ударной трубы довольно мало ( $\sim 10^{-3}$  с).

#### Составление смеси с добавками паров воды

Как следует из проведенного анализа, наиболее уязвимым местом в методике проведения экспериментов по исследованию инверсной среды на смеси СО<sub>2</sub>—N<sub>2</sub>—H<sub>2</sub>O является способ задания определенной концентрации паров воды. В случае установок с электродуговым подогревом газовой смеси [1, 2, 5] трудности связаны с равномерным перемешиванием водяных паров внутри ресивера. В установках, выполненных по схеме камеры сгорания [6], задача перемешивания компонентов топлива также оказывается трудновыполнимой. В квазистационарных установках [3, 4], а также в ударной трубе [10], где молекулы H<sub>2</sub>O образовывались в результате химических реакций, остается невыясненным вопрос о времени установления химического равновесия. В экспериментах на ударных трубах [7—9] задача задания концентрации водяных паров в рабочем канале также недостаточно хорошо решена, хотя в исследовательской работе, особенно в случае измерения величины усиления, ударные трубы имеют по сравнению с установками, сделанными по какой-либо другой схеме, ряд преимуществ, в частности параметры торможения смеси определяются по сравнительно просто измеряемой скорости падающей ударной волны в рабочем канале и давлению перед ней. В этой связи авторы хотели бы предложить ряд способов составления смесей с парами воды в рабочем канале ударной трубы, которые были использованы в настоящей работе.

1. Пары воды подавались в откаченную трубу из колбы, погруженной в термостат с тающим снегом, при открывании ПК-3 (рис. 10), затем в рабочий канал подавалась осушенная смесь СО<sub>2</sub>—N<sub>2</sub>. Перед запуском установки смесь выдерживалась. Варьируя начальное давление газа в рабочем канале ( $p_1$ ) и температуру тающего снега (с помощью задания определенной концентрации соли NaCl), можно довольно точно задавать концентрацию паров воды в ударной трубе в пределах 1÷20%. Существенный недостаток такого способа — значительное время, необходимое для образования однородной смеси СО<sub>2</sub>—N<sub>2</sub> с парами воды. Как показывают оценки, при  $p_1 = 100$  торр и  $X_{\text{H}_2\text{O}} = 1\%$  это время составляет  $\approx 10^6$  с, т. е. более суток при длине рабочего канала ударной трубы 3 м.

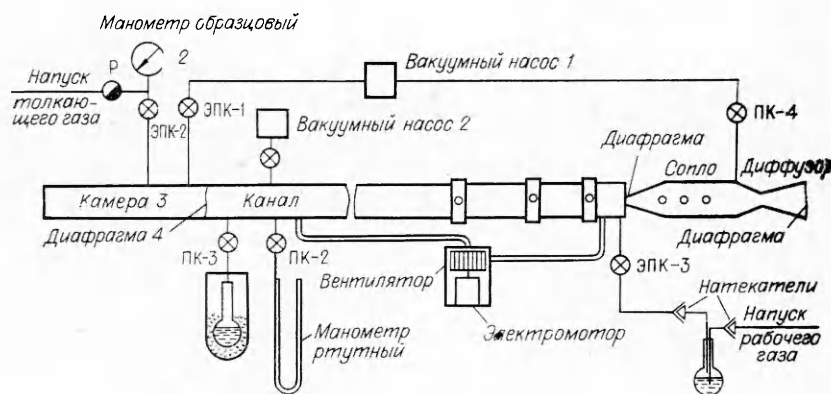


Рис. 10. Схема установки.

2. Этот способ отличался от предыдущего тем, что перед напуском смеси  $\text{CO}_2 - \text{N}_2$  в ударную трубу пары воды вымораживались на медном стержне внутри рабочего канала, а затем, после напуска  $\text{CO}_2 - \text{N}_2$ , стержень отогревался. Помещая стержень, на котором вымораживались водяные пары, на различном расстоянии от сопловой части и изменяя время выдерживания смеси перед запуском установки, можно было качественно проследить изменение показателя усиления (в течение одного и того же эксперимента) в зависимости от распределения концентрации паров воды в «пробке» за отраженной ударной волной. Однако для получения количественной зависимости  $\alpha(X_{\text{H}_2\text{O}})$ , как и в первом случае, требовалось значительное время выдерживания смеси в рабочем канале, что накладывало на экспериментальную установку жесткое условие относительно отсутствия течи в рабочем канале.

3. Для сокращения времени перемешивания применялась система прокачки, установленная непосредственно на ударной трубе (см. рис. 10). Система прокачки сократила время подготовки смеси с парами воды до получаса.

4. Наиболее удачный, по мнению авторов, способ составления смеси с парами воды состоял в следующем: смесь  $\text{CO}_2 - \text{N}_2$  готовилась отдельно в кислородной подушке и подавалась в хорошо откаченную ударную трубу через колбу, наполненную водой. В магистрали перед колбой и после нее устанавливались натекатели, с помощью которых варьировалось давление, что позволяло добиваться различной концентрации паров воды в подаваемой смеси. Такой способ составления смеси с парами воды прост и удобен, особенно при измерениях фактической влажности в канале ударной трубы. Он позволяет осуществлять операцию напуска газа в рабочий канал за короткое время (1÷5 мин).

Последний способ подачи паров воды применялся совместно с прибором для контроля концентрации паров воды в рабочем канале непосредственно перед запуском установки (описание этого прибора приводится ниже). С помощью этого прибора выяснилось, что стенки ударной трубы способны адсорбировать в значительной степени влагу. С целью проверки равномерного распределения паров воды в «пробке» за отраженной ударной волной проводились измерения концентрации паров воды на различных расстояниях от сопловой части, вблизи которой подавалась смесь:  $l_1 = 30$  см,  $l_2 = 60$  см. Измерения показали, что через 5 мин с момента напуска смеси в рабочий канал ( $p_1 = 80$  торр) на расстоянии  $l_1$  концентрация паров воды превышала концентрацию на расстоянии  $l_2$  на 15%. Повторное измерение через 15 мин после напуска смеси, фиксировало однородное перемешивание смеси на указанных расстояниях.

## Способ определения состава смеси газов и паров

Оперативное и достаточно точное определение количественного состава смесей газов и паров необходимо во многих случаях, особенно в спектроскопии и при исследовании релаксационных процессов. Принцип предлагаемого способа измерения состоит в вымораживании исследуемой фракции и измерении давления при ее размораживании после предварительной откачки других компонентов. Последнее является условием, обеспечивающим высокую точность.

Возможная принципиальная схема прибора приведена на рис. 11. Резервуар 1 соединен с U-образным манометром 3 так, что можно измерить разность давлений между резервуаром 1 и вакуумной магистралью 4. Емкость 2 служит для охлаждения измерительного резервуара.

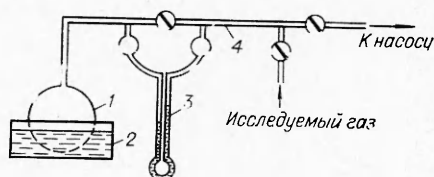


Рис. 11. Схема измерения влажности.

Процесс измерений состоит в следующем: в откаченный прибор подается исследуемая смесь. Перекрытый измерительный резервуар охлаждается, после чего в охлажденном состоянии откачивается. Глубина откачки и температура резервуара должны удовлетворять условию:  $p_x(T) < p \ll p_x$ , где  $p_x$  — давление исследуемой компоненты при нормальной температуре,  $p_x(T)$  — давление при температуре  $T$ ,  $p$  — давление, до которого откачивается система, заполненная смесью. После откачки резервуар отогревается до нормальной (комнатной) температуры. При этом показания U-образного манометра будут соответствовать парциальному давлению исследуемой компоненты в исходной смеси.

Рассмотрим погрешности измерений. Предельная точность схемы есть точность U-образного манометра. В общем случае погрешность определяется следующей формулой:

$$\Delta p_x/p_x = \pm \Delta h/h \pm \Delta \rho/\rho \pm \Delta T/T_k + V_1/V - [p - p_x(T)] (T_k/T - 1)/p_x, \quad (1)$$

где  $h$  — разность уровней U-образного манометра;  $\rho$  — плотность жидкости в U-образном манометре;  $T_k$  — комнатная температура;  $\Delta T$  — разность температуры газа в измерительном резервуаре до и после размораживания, т. е. в начале и конце измерений;  $V_1$  — объем подводящих трубок в левой части манометра;  $V$  — объем измерительного резервуара.

Оценим величину ошибок, задаваясь разумными погрешностями входящих в (1) слагаемых:

$$\Delta h = 0,25 \text{ мм}, \quad \rho = 1 \text{ г/см}^3, \quad \Delta \rho/\rho = 0,005, \quad \Delta T/T_k = 0,01, \quad V_1/V = 0,01,$$

$$\Delta p_x/p_x = \pm 0,018/p_x \pm 0,005 \pm 0,01 - [p - p_x(T)] (T_k/T - 1)/p_x, \quad (2)$$

$[p]$  — мм рт. ст.,  $[T]$  — К. Остальные погрешности зависят от конкретных условий, из которых рассмотрим три, по-видимому, наиболее вероятных.

1. Измеряется давление паров воды, вымораживание проводится льдом  $\text{CO}_2$  ( $T = 195 \text{ К}$ ),  $p_{\text{H}_2\text{O}}(T) = 5,5 \cdot 10^{-4} \text{ мм рт. ст.}$ , глубина откачки  $p = 10^{-2} \text{ мм рт. ст.}$

$$\frac{\Delta p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{H}_2\text{O}}} = \begin{matrix} + 0,045 \\ - 0,04 \end{matrix}, \quad p_{\text{H}_2\text{O}} = 1 \text{ мм рт. ст.};$$

$$\frac{\Delta p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{H}_2\text{O}}} = \begin{matrix} + 0,025 \\ - 0,016 \end{matrix}, \quad p_{\text{H}_2\text{O}} = 10 \text{ мм рт. ст.}$$



2. Измеряется давление паров воды, вымораживание проводится тающим спиртом ( $T=160\text{ K}$ ),  $p_{\text{H}_2\text{O}}=10^{-6}$  мм рт. ст., глубина откачки  $p=10^{-2}$  мм рт. ст.

$$\frac{\Delta p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{H}_2\text{O}}} = \pm 4,5\%, \quad p_{\text{H}_2\text{O}} = 1 \text{ мм рт. ст.};$$

$$\frac{\Delta p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{H}_2\text{O}}} = \begin{matrix} + 0,025 \\ - 0,016 \end{matrix}, \quad p_{\text{H}_2\text{O}} = 10 \text{ мм рт. ст.}$$

3. Измеряется давление двуокиси углерода, вымораживание проводится жидким азотом ( $T=77\text{ K}$ ),  $p_{\text{CO}_2}=10^{-2}$  мм рт. ст., глубина откачки  $p=0,5 \cdot 10^{-1}$  мм рт. ст.

$$\frac{\Delta p_{\text{CO}_2}}{p_{\text{CO}_2}} = \begin{matrix} + 0,045 \\ - 0,185 \end{matrix}, \quad p_{\text{CO}_2} = 1 \text{ мм рт. ст.};$$

$$\frac{\Delta p_{\text{CO}_2}}{p_{\text{CO}_2}} = \begin{matrix} + 0,027 \\ - 0,032 \end{matrix}, \quad p_{\text{CO}_2} = 10 \text{ мм рт. ст.}$$

Точность измерений может быть улучшена, в частности, за счет определения величин систематических погрешностей. В случае, если в смеси газов требуется измерить парциальные давления двуокиси углерода и паров воды, вымораживание жидким азотом даст  $p_{\text{CO}_2} + p_{\text{H}_2\text{O}}$ , а вымораживание твердым  $\text{CO}_2$  или тающим спиртом даст  $p_{\text{H}_2\text{O}}$ . Легко подобрать также условия для измерения давлений  $\text{Br}_2$ ,  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{CS}_2$ , паров спирта, углеводородов и т. д.

### Описание установки и результатов измерений

В настоящей работе экспериментальные исследования проводились на ударной трубе с диафрагмой, схема которой приведена на рис. 10. Камеру высокого давления и рабочий канал ударной трубы составляли из цилиндрической трубы с внутренним диаметром 5 см. Длина камеры высокого давления 60 см, рабочего канала 300 см. Для раскрытия диафрагмы использовался пневматический боек. Принудительное раскрытие такого рода позволяло получить заданные параметры смеси за отраженной волной. Разброс измеряемой скорости падающей ударной волны от эксперимента к эксперименту в определенном режиме не превышал 2%.

Конец ударной трубы, к которому пристыковывалось сопло — это переходный канал с прямоугольным сечением, площадь которого была постоянной, а горизонтальный размер изменялся с 5 до 20 см. Расширение газовой смеси, нагретой отраженной ударной волной, происходило в плоском профилированном сопле ( $A^*=0,65$  мм,  $l=30$  мм,  $r=2$  мм, начальный угол раскрытия раствора сопла  $60^\circ$ ).

Разгонный участок сопла переходил в прямоугольный расходящийся канал длиной 500 мм, шириной 200 мм и высотой, изменяющейся от  $A=24$  до 38 мм в конце расходящегося канала. Незначительный угол расхождения прямоугольного канала ( $\sim 1,5^\circ$ ) был сделан для исключения влияния нарастания пограничного слоя. Для визуализации течения и проведения измерений усиления в сопле (как в области разгонного участка, так и в примыкающем прямоугольном канале) имелись смотровые окна диаметром 40 мм, расположенные на расстоянии 85 мм друг от друга.

Сопловая часть стыковалась с переходным каналом ударной трубы. При этом часть сопла закрывалась диафрагмой из алюминиевой фольги толщиной  $0,06 \div 0,08$  мм с легким надрезом вдоль сечения сопла.

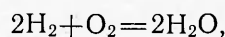
Во время запуска диафрагма раскрывалась за времена порядка  $5 \cdot 10^{-5}$  с. Время запуска сопла составляло  $10^{-4}$  с. Для обеспечения быстрого запуска участок между диафрагмой в критическом сечении сопла и диафрагмой на выходе из прямоугольного канала (см. рис. 10) откачивался до давления  $\sim 1$  торр.

Для измерения показателя усиления использовалась известная схема. В качестве источника зондирующего излучения применялся серийный лазер ОКГ-15, стабилизированный по мощности излучения (мощность составляла  $\sim 1$  Вт) с длиной волны 10,6 мк. В окна сопловой части были вставлены стекла из ИКС-30 диаметром 40 и толщиной 5 мм; зеркало на приемнике инфракрасного излучения было сферическим с фокусным расстоянием 4 см. В качестве приемника инфракрасного излучения использовалось фотоспротивление типа «Свод»; сигнал от приемника излучения регистрировался на двухлучевом запоминающем осциллографе С1-42, который запускался с помощью контактного датчика. Проверяться линейность измерительной схемы.

На рис. 12 показана типичная осциллограмма усиления. Расстояние между верхними лучами соответствует интенсивности зондирующего излучения. Луч «О» соответствует уровню сигнала со «Свода» при выключенном ОКГ-15. «Полка» на нижнем луче характеризует изменение интенсивности зондирующего излучения при его прохождении через инверсную среду. Усиление сигнала с приемника излучения в блоках осциллографа происходило в отношении 1:25. Полная развертка лучей в осциллографе происходила за время  $5 \cdot 10^{-3}$  с. Длительность «полки» усиления соответствовала длительности «полки» давления за отраженной ударной волной и составляла  $2 \cdot 10^{-3}$  с.

В каждом режиме работы ударной трубы перед проведением измерений усиления измерялся уровень собственного излучения из сопла. Для этого проводился запуск установки при настроенной измерительной аппаратуре с выключенным лазером ОКГ-15. Погрешность при измерении усиления не превышала 5% и определялась в основном толщиной луча осциллографа.

Результаты измерения приведены на рис. 13, 1: черные точки — результаты, полученные при использовании четвертичного метода составления смеси с парами воды описанного выше; светлые точки — эксперименты, в которых пары воды образовались в результате протекания в канале ударной трубы химической реакции



т. е. как в работе [10]. Полученные значения показателя усиления находятся в хорошем согласии с проанализированными данными при сходных условиях эксперимента.

На рис. 13 (см. кривую 2) показаны результаты теоретических

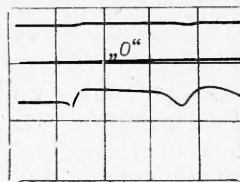


Рис. 12. Осциллограмма измерения показателя усиления.

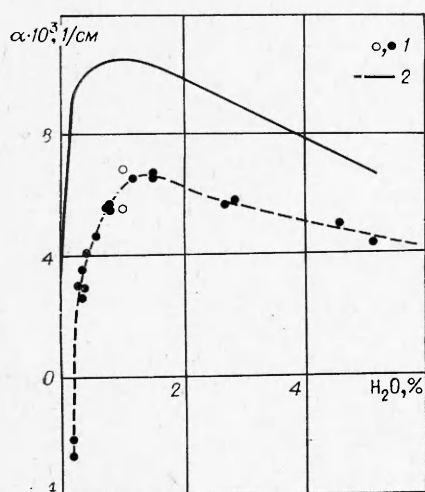


Рис. 13. Экспериментальные результаты настоящей работы:  $T_0 = 1550$  К,  $p_0 = 10$  атм,  $X_{\text{CO}_2}/X_{\text{N}_2} = 0,165$ ,  $A/A^* = 32$ ,  $L = 7$  см.

расчетов, проведенных Г. А. Евсеевым и В. В. Каллюжным. Различие теории и эксперимента весьма существенно. Причину расхождения авторы видят в несовершенстве констант релаксации сталкивающихся молекул, которые применялись в расчете.

Методические разработки по составлению смесей с парами воды позволили значительно сократить разброс в экспериментальных значениях показателя поглощения, уменьшить время проведения экспериментов. Авторы надеются, что получаемые в опыте значения  $\alpha$  ( $\text{H}_2\text{O}$ ) на основе предложенного способа контроля паров воды в ресивере позволят в дальнейшем проводить анализ времен колебательной релаксации молекул  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ .

Московский  
физико-технический  
институт

Поступила в редакцию

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. К. Конюхов, Н. В. Матросов и др. Письма в ЖЭТФ, 1970, 12, 461.
2. J. D. Anderson J., E. M. Winkler. Proceedings of the IEEE, 1971, 59, 651.
3. S. Yatsiv, E. Greenfield a. o. Appl. Phys. Lett., 1971, 19, 65.
4. J. Tulip, H. Seguin. Appl. Phys. Lett., 1971, 19, 263.
5. G. Lee, F. E. Gowen, J. R. Hagen. AIAA J., 1972, 10, 65.
6. R. A. Meinzer. AIAA J., 1972, 10, 388.
7. Г. В. Гембаржевский, Н. А. Генералов, Г. Н. Козлов. ПМТФ, 1973, 4.
8. А. И. Демин, Е. М. Кудрявцев и др. Квантовая электроника, 1974, 1, 528.
9. А. Б. Британ, С. А. Лосев, О. П. Шаталов. Квантовая электроника, 1974, 1, 2620.
10. J. S. Vamos. AIAA Pap., 74—177.
11. J. D. Anderson Jr., AIAA Pap., 74—76.

### НЕПРЕРЫВНЫЙ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЙ ЛАЗЕР НА ПРОДУКТАХ ГОРЕНИЯ СМЕСИ $\text{CO}-\text{H}_2$ В ВОЗДУХЕ

*М. Г. Кталхерман, В. М. Мальков, А. В. Петухов,  
Я. И. Харитонова*

В последнее десятилетие интенсивно исследуются мощные непрерывные электроразрядные, химические и газодинамические лазеры (ГДЛ). Проблемы, тенденции их развития и основные результаты суммированы в обзорах [1, 2]. Достижения последних лет освещены в [3—6]. В этих же работах можно найти подробную библиографию.

К настоящему времени наибольшие мощности в непрерывном режиме достигнуты с помощью газодинамических  $\text{CO}_2$ -лазеров. Еще в 1970 г. сообщалось о создании лазера мощностью 60 кВт [7]. В качестве активной среды в [7] использовались продукты сгорания, содержащие  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ . Простота получения лазерноактивных сред при сжигании топлив, дающих приемлемый для лазера состав продуктов сгорания, в сочетании с возможностью получения больших расходов, т. е. получения больших мощностей, обуславливает интерес к исследованиям ГДЛ на продуктах горения [8—13]. Уже сейчас продемонстрирована возможность работы ГДЛ, использовавших в качестве топлива  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{C}_3\text{H}_8$  и смеси  $\text{CO}-\text{H}_2$ .

Анализ основных закономерностей работы ГДЛ ведется на основе измерений коэффициента усиления слабого сигнала или мощности.