

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 α (H_2O) на основе предложенного способа контроля паров воды в ресивере позволят в дальнейшем проводить анализ времен колебательной релаксации молекул CO_2 , N_2 , H_2O .

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 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 CO_2 , N_2 , H_2O . 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 C_2H_2 , C_3H_8 и смеси $\text{CO}-\text{H}_2$.

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

Таблица 1

Диапазон исследованных параметров			Характеристики сопла		Вид сопла	Работа
P_0 , атм	T_0 , К	r_{H_2O} %	h^* , мм	A/A^* (М)		
15÷45	1000÷2000	1,0	0,8	14 и 56	Профилированное	[7]
7,5	1650	1,0÷5,0	—	—	»	[8]
4÷15	1200÷1800	0,5÷3,0	0,2	32	»	[9]
5÷7	до 1700	до 8,0	1,5 0,75	15 30	Клиновидное, $\varphi=15^\circ$	[10]
—	1000÷1500	—	0,15 0,4	56 24	Решетка сопл профилир.	[11]
до 10	1500÷2500	4÷10	1,0	25	Клиновидное, $\varphi=15^\circ$	[12]
5÷20	1500÷2500	4÷10	0,4	25	Решетка сопл профилир.	[13]
5	1000	1,0÷10	0,5	(4÷5)	Клиновидное, $\varphi=13^\circ$	[14]
11	1650 2000	1,2÷6,3 4÷5,5	0,5	(5)	» $\varphi=10^\circ$	[15]
10	1400÷2400	1,2	1,0	20	Профилированное	[16]
9	1500 1000÷1900	0÷12 2,4	1,0	24	Профилированное	[17]
18,5 20	1000÷2400 1800	3,5 0÷8	1,0	20	»	[18]
6	1650÷2060	2,0	2,0	10÷30	Клиновидное, $\varphi=15^\circ$	[19]
5,3	1790	0÷13	2,0	16	»	[20]
1,5÷40	1000÷2000	2,0 и 5,0	$r^*=10$	59	Коническое	[21]
10÷88	1500÷3200	2,0÷5,0	0,8	—	Щель	[22]
37,5	1200÷2000 1800	3,5 1÷10	0,356	50	Профилированное	[23]

В табл. 1 приведены сведения об экспериментах, в которых измерялся коэффициент усиления в ГДЛ на смеси $CO_2-N_2-H_2O$. Почти все исследования выполнены на ударных и импульсных трубах. В [14—23] использовались заранее приготовленные смеси, в [8—13] активной средой являлись продукты сгорания. Следует отметить, что при нагреве смеси ударной волной или с помощью подогревателей имеется возможность широко изменять состав при неизменных температуре торможения T_0 и давлении торможения p_0 , а при работе ГДЛ на продуктах горения состав смеси определяется T_0 и p_0 .

Коэффициент усиления зависит от большого числа внешних параметров: температуры торможения и полного давления перед соплом, состава газовой смеси, высоты критического сечения h^* , степени расширения сопла A_e/A^* , а также его контура. В каждой из указанных работ варьировалось лишь небольшое число этих параметров¹. Диапазоны исследований редко перекрываются и поэтому результаты экспериментов трудно сопоставить, чтобы можно было четко выделить влияние какого-либо фактора на коэффициент усиления. Имеются и качественные расхождения (например, зависимость коэффициента усиления от давления при близких остальных параметрах в работах [9, 13]).

¹ Работа [22] посвящена измерению коэффициентов усиления при очень большом содержании воды. Большая часть данных получена при $T_0 \geq 2000$ К и содержании воды более чем 0,16. Расширение смеси проводилось через щель.

К тому же результаты, приведенные в табл. 1, получены с использованием различных сопловых устройств: клиновидных, конических и плоских профилированных сопел, решеток сопел, щели. В целом же проведенные эксперименты не позволяют с приемлемой точностью проанализировать работу ГДЛ в ряде важных случаев.

Например, мало данных получено в области параметров, характерных для лазерной технологии «второго поколения» [18]: высокая температура (1800 К), сопло с небольшой высотой критического сечения ($h^* = 0,3 \div 0,4$ мм) и большой степенью расширения ($A_c/A^* = 50$), а также высокое давление (40 атм), обеспечивающее выхлоп непосредственно в атмосферу. Такое сочетание параметров позволяет использовать среду с большим содержанием паров воды по сравнению с ранее считавшимся оптимальным [7], что дает возможность достаточно эффективно применять в качестве активных сред продукты сгорания некоторых топлив. В связи с этим требуется уточнение оптимальных параметров работы таких лазеров, учитывая, в частности, наличие кислорода в продуктах сгорания.

Теоретический анализ процессов в ГДЛ [3, 13, 18, 19, 24—27] обеспечивает качественное, а в ряде случаев [16, 19, 27] удовлетворительное количественное соответствие между измеренными и вычисленными величинами коэффициентов усиления. Однако один и тот же метод [24] при разном наборе внешних параметров может давать как хорошее, так и плохое совпадение с экспериментом [23]. Одна из причин этого несоответствия — существующая неопределенность значений скоростей релаксационных процессов [27]. Таким образом, требуется дальнейшее совершенствование методов расчета и экспериментальная проверка их применимости в широком диапазоне параметров.

В данной работе описывается непрерывный газодинамический лазер, работающий на продуктах сгорания газообразных топлив. Лазер рассчитан на предельные параметры: $p_0 \approx 35$ атм, $T_0 \approx 2000$ К. Приводятся результаты измерений коэффициентов усиления на продуктах сгорания смеси $\text{CO}-\text{H}_2$ в воздухе.

Установка и методика измерений

Экспериментальная установка (рис. 1) состояла из камеры сгорания (форкамера) с горелочным устройством 2 и жаровой трубой 4, плоского медного сопла 5, рабочего участка с окнами 6 для зондирования активной среды, эжектора 7. Силовой корпус 1 форкамеры был отделен от жаровой трубы ($D = 180$ мм) кожухом 3. Холодный осушенный воздух ($T \approx 250$ К) проходил в зазоре ($\delta = 2$ мм) между кожухом и жаровой трубой, охлаждая ее, и поступал в горелочное устройство. Для выравнивания профиля температур в жаровой трубе последовательно располагались диафрагма 9 и две решетки 8 с отверстиями разного диаметра. Горелочное устройство состояло из двух цилиндри-

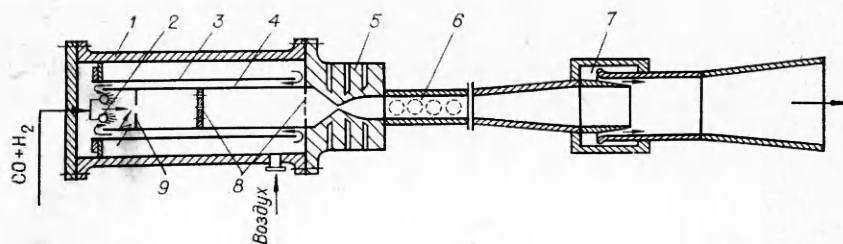


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

ческих стабилизаторов пламени. Через мелкие отверстия в стабилизаторах топливо подавалось в рециркуляционную зону, где оно смешивалось с воздухом и сгорало. Поджигалось топливо свечой. Подобная конструкция горелочного устройства обеспечивала надежное поджигание и устойчивое горение в широком диапазоне коэффициента избытка воздуха. Без дополнительного охлаждения горелка длительное время работала без заметных повреждений.

В большинстве опытов использовалось профилированное сопло с угловой точкой (высота критического сечения $h^* = 0,7$ мм, высота выходного сечения $H = 20$ мм, отношение площадей $A_e/A^* = 28,6$), максимальный угол полураскрытия $\varphi = 37^\circ$. Сопло охлаждалось водой. Рабочая часть установки имела сечение $20 \text{ мм} \times 180 \text{ мм}$. На ее нижней стенке в 10 точках измерялось статическое давление. Окна из BaF_2 , отнесенные от потока на 70 мм, размещались в державках, вворачиваемых в боковые стенки, которые в этом месте охлаждались водой. Непосредственно кристалл охлаждался воздухом, подсасываемым через закрытые фильтром отверстия. Первое окно располагалось на расстоянии 35 мм от критического сечения сопла; во время опыта окна диафрагмировались ($d_g = 4$ мм).

Специальных мер для аэродинамического совершенствования выхлопного тракта не предпринималось. Выхлоп в атмосферу с помощью эжектора позволял обеспечить расчетный режим истечения в сопле при $p_0 \geq 20$ атм. Время работы установки на режиме ограничивалось перегревом неохлаждаемых элементов конструкции и в описываемой серии экспериментов оно составляло $20 \div 40$ с. Топливная смесь ($\text{CO}-\text{H}_2$) готовилась заранее в баллонах. Степень перемешивания компонентов контролировалась газовым анализом.

Во время эксперимента на электронных потенциометрах типа ЭПП и КСП непрерывно регистрировались расходы воздуха и топлива, давление торможения в форкамере, температура в рабочей части и форкамере. Распределение статического давления фиксировалось групповым регистрирующим манометром ГРМ-2. Температуры измерялись неэкранированными платинородиевыми термопарами. Расчет показал, что влиянием излучения спая термопар на их показания можно пренебречь. Коэффициент восстановления спая термопары в рабочей части определялся опытным путем. За температуру торможения принималась средняя величина $T_0 = 1/2(T_\phi + T_p)$, где T_ϕ — температура в форкамере перед соплом, а T_p — температура в рабочей части. Отклонения T_ϕ и T_p от T_0 не превышали в основном $\pm 35^\circ$. Только в одном режиме отличие составляло $\pm 60^\circ$. По измеренным расходам воздуха и топлива вычислялась также температура горения в предположении, что полнота сгорания равна единице. Обычно она была больше T_0 и ее отличие при самых высоких температурах составляло $100 \div 150^\circ$, а при низких $40 \div 90^\circ$. Это связано, по-видимому, с точностью измерений расходов и температур и возможной неполнотой горения.

Измерения коэффициента усиления активной среды осуществлялось методом просвечивания. В качестве зондирующего использовался стабилизированный CO_2 -лазер малой мощности ($\lambda = 10,6$ мкм). Лазер был выполнен по схеме с внешними зеркалами. Окна из NaCl крепились под углом Брюстера. Длина резонатора составляла 1100 мм, радиус зеркал ~ 1500 мм. Лазер работал в одномодовом режиме.

При исследовании непрерывного процесса необходима стабилизация зондирующего лазера. В работе использовались методы пассивной стабилизации мощности лазера [28]. Рама для крепления юстировочных узлов с зеркалами была выполнена из четырех инваровых стержней, теплоизолированных от окружающей среды. Сам лазер располагался на плите, виброизолированной от пола. В цепь питания, стаби-

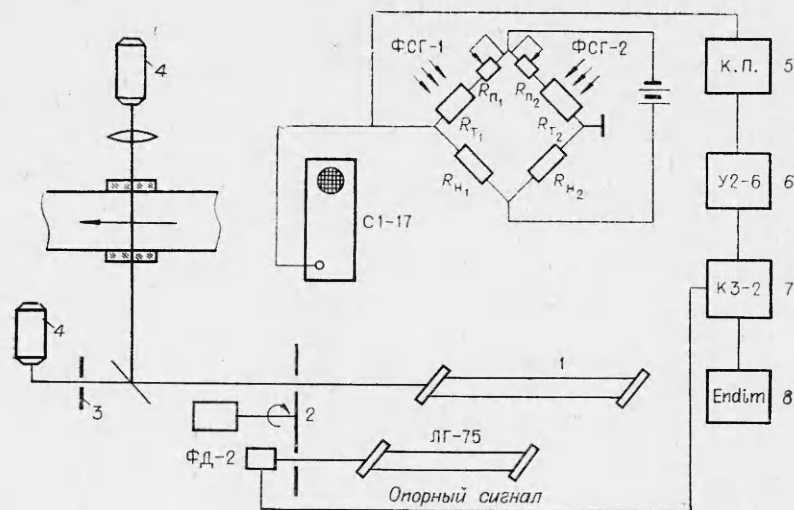


Рис. 2. Схема измерения коэффициента усиления.

лизированной по напряжению, включался стабилизатор тока. Вода постоянной температуры на охлаждение газоразрядной трубки подавалась из емкости. Расход воды поддерживался неизменным, что обеспечивало постоянство температуры трубки. Окна охлаждались воздухом, для уменьшения колебаний расхода прокачиваемой смеси использовалась буферная емкость. Принятые меры стабилизации обеспечивали стабильность мощности лазера не хуже 1,5% в течение 10 мин.

Для измерения усиления использовалась дифференциальная схема (рис. 2). Луч лазера 1 прерывался обтюратором 2 и после прохождения делительной пластинки из германия направлялся на два приемника ФСГ 4 (Ge—Au, при $T=77\text{ K}$), включенных в мостовую схему. Частота прерывания луча (263 Гц) поддерживалась постоянной. Темновые сопротивления приемников R_{T1} и R_{T2} были различными. Последовательно им включались подстроечные R_{n1} и R_{n2} . Поскольку нагрузочные сопротивления R_{H1} и R_{H2} выбирались равными, R_{T1} и R_{T2} подбирались из условия $R_{T1} + R_{n1} = R_{T2} + R_{n2}$. При такой схеме выравнивания плеч электрический сигнал с моста был пропорционален разности изменения сопротивления приемников. Для уравнивания сигналов с приемников на пути одного из лучей ставилась ирисовая диафрагма 3. Сигнал с моста через катодный повторитель 5 шел на селективный усилитель У2-6 6, работавший в паре с синхронным детектором КЗ-2 7. Регистрация велась на двухкоординатном самописце «Endim» 8. На синхронный детектор подавался также опорный сигнал той же частоты, что и основной. Для этого использовался сигнал с фотодиода ФД-2, на который направлялся луч гелий-неонового лазера ЛГ-75, прерываемый тем же обтюратором, что и луч CO_2 -лазера. Для наладки системы и контроля сигнал с моста выводился также на осциллограф С1-17.

Подготовка системы к работе заключалась в выравнивании плеч моста подстроечными сопротивлениями, когда луч лазера перекрыт. Затем ирисовой диафрагмой сигнал с ближнего приемника уменьшался до величины сигнала с дальнего. Запись сигнала с моста после этого принималась за нуль отсчета (нулевой сигнал). При помещении на пути одного луча поглощающей или усиливающей среды меняется сопротивление соответствующего приемника и с моста идет разностный сигнал ΔI . Перекрытие одного луча дает величину полного сигнала I_0 . Счита-

лось, что при использовании зондирующего лазера малой мощности (в данном случае ~ 1 Вт) характеристика приемника линейна [29]. Величина I_0 измерялась до эксперимента и сразу после него. Перед каждым опытом установка запускалась на холодном воздухе (без горения). Режим истечения в сопле при этом был расчетным. Оптическая система юстировалась так, чтобы в этих запусках не наблюдалось отклонения нулевого сигнала при его непрерывной регистрации по сравнению с первоначальным (до запуска установки). Периодически аналогичная проверка проводилась в опытах с горением, когда в продуктах сгорания не было поглощающего газа в области 10,6 мкм (в качестве топлива использовался водород).

При выходе на режим параметры в форкамере менялись, однако для обработки брались только точки, соответствующие установившемуся течению, когда значения расходов и температур были примерно постоянными. На рис. 3 приведены типичные диаграммы с записью температуры и давления в форкамере, а также коэффициента усиления. По оси абсцисс отложено время с момента включения регистрирующих приборов. Усиление на диаграмме соответствует отклонению вниз и выражено в миллиметрах регистрирующей бумаги. Величина полного сигнала I_0 до опыта составляла 230 мм, сразу после опыта — 220 мм. Для вычисления коэффициента усиления бралось среднее значение этих двух измерений. На рисунке четко виден момент перекрытия клапана на топливной магистрали (см. рис. 3, 1). Обычно для обработки использовались параметры в этот момент, а также одно (реже два) промежуточное значение, когда температура и давление менялись слабо (см. рис. 3, 2). На рис. 3, 3 указан также первоначальный уровень «нулевого» сигнала. Отсчет ΔI проводился от линии нулевого сигнала в конце опыта, когда перекрыт топливный клапан.

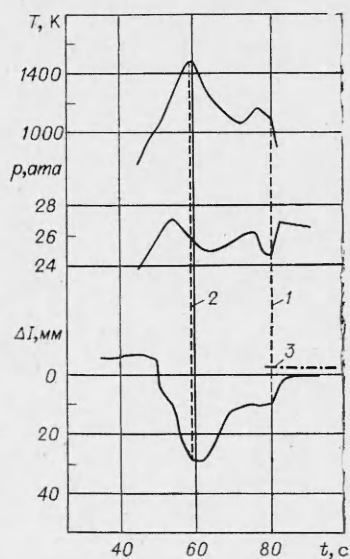


Рис. 3. Изменение температуры, давления и коэффициента усиления во время опыта.

Результаты экспериментов

Все измерения были проведены на расстоянии 35 мм от критического сечения сопла. Значение коэффициентов усиления и условия, в которых они получены (p_0 , T_0 , r_{CO} , r_{H_2O} , r_{N_2} , r_{O_2}), представлены в табл. 2 (r_{CO} , r_{H_2O} , r_{N_2} , r_{O_2}) — соответствующие мольные доли. Состав продуктов сгорания рассчитывался по соотношению $[H_2]/[CO]$ в баллоне и T_0 . На рис. 4 результаты экспериментов показаны в виде зависимости коэффициентов усиления от содержания паров воды при постоянной температуре перед соплом. Для построения изотерм использовались точки с близкими значениями T_0 . При этом состав смеси брался таким, каким он был бы, если бы температура в опыте действительно равнялась принятой при построении изотерм. Поскольку одновременное небольшое увеличение (уменьшение) T_0 и соответствующее небольшое увеличение (уменьшение) z_{H_2O} (в условиях проведенных экспериментов) приводит к противоположному влиянию на коэффициент усиления, то считалось, что последний при такой корректировке не изменяется.

Таблица 2

\bar{T}_0, K	$p_0, \text{ата}$	$r_{\text{H}_2\text{O}}$	r_{CO_2}	r_{O_2}	r_{N_2}	$\alpha, \text{м}^{-1}$	\bar{T}_0, K	$p_0, \text{ата}$	$r_{\text{H}_2\text{O}}$	r_{CO_2}	r_{O_2}	r_{N_2}	$\alpha, \text{м}^{-1}$
1690	26,5	0,020	0,190	0,091	0,700	0,900	1245	25,2	0,012	0,115	0,135	0,738	0,650
1605	26,0	0,018	0,170	0,103	0,709	0,930	1200	26,0	0,065	0,0565	0,130	0,750	0,195
1590	24,0	0,048	0,124	0,100	0,728	0,660	1190	24,2	0,087	0,034	0,134	0,745	0,125
1520	26,5	0,067	0,098	0,116	0,720	0,460	1130	23,8	0,044	0,065	0,142	0,749	0,260
1470	26,0	0,016	0,150	0,115	0,720	0,870	1095	24,8	0,058	0,050	0,140	0,752	0,130
1465	25,6	0,070	0,087	0,114	0,730	0,380	1050	25,0	0,009	0,086	0,152	0,753	0,300
1425	25,0	0,015	0,140	0,120	0,725	0,730	1020	24,4	0,050	0,043	0,146	0,760	0,050
1330	25,0	0,102	0,0387	0,101	0,738	0,130	990	23,4	0,022	0,060	0,156	0,762	0,107
1290	24,3	0,100	0,039	0,124	0,737	0,125	965	23,4	0,021	0,054	0,158	0,767	0,095

Характер кривых на рис. 4 аналогичен полученным в других исследованиях. Максимум усиления по температуре в опытах не был достигнут, а наибольшие значения коэффициентов усиления на изотермах, очевидно, находятся вблизи максимумов по содержанию воды. На этом же графике приведены результаты расчетов [18, 23] для следующих условий: $p_0=37,5$ ата; $T_0=1800$ К; $h^*=0,356$ мм; $A_e/A^*=50$; $r_{\text{CO}_2}=0,07$, предложенные в [18], как характерные условия «второго поколения». Можно отметить хорошее соответствие сравниваемых результатов. Вероятно, этому способствует близость параметра $p_0 h^*/\text{tg } \varphi$, определяющего в некотором смысле соотношение характерных времен течения и релаксации (φ — угол полураствора сопла). В работе [23] величина угла φ не приведена. Однако можно предположить, что его значение близко к максимально возможному ($\sim 40^\circ$), обеспечивающему безотрывное течение в сопле. В настоящей работе $\varphi=37^\circ$. Предполагая равенство значений $\text{tg } \varphi$, сравним величины $p_0 h^*$: в [23] $p_0 h^*=1,34$ атм·см, в данной работе $p_0 h^*=1,75$ атм·см.

Отличие в коэффициентах усиления на изотерме $\bar{T}_0=1640$ К с расчетом [23] при $T_0=1800$ К вполне укладывается в представления о влиянии температуры на усилительные свойства среды. Но поскольку в сравниваемых работах значения A_e/A^* отличаются почти в два раза, можно предположить, что условия «второго поколения» не столь «жесткие» для получения относительно больших коэффициентов усиления.

Это видно также на рис. 5, где представлена зависимость коэффициентов усиления от температуры при $r_{\text{H}_2\text{O}}=\text{const}$. Линии на графике

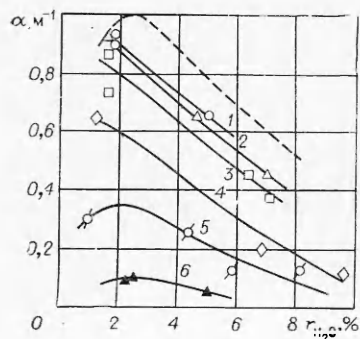


Рис. 4. Зависимость коэффициента усиления от $r_{\text{H}_2\text{O}}$ при T_0 (К), равной 1640 (1), 1560 (2), 1470 (3), 1250 (4), 1120 (5), 1010 (6) (пунктир — расчет [18, 23] при $T_0=1800$ К).

проведены на основании результатов, показанных на рис. 4 (кривая 1 получена экстраполяцией). Здесь же нанесены результаты измерений из [7, 23]. Условия экспериментов [23] и расчетов [18] были описаны выше, а значение $r_{\text{H}_2\text{O}}=0,035$ (рис. 5, 3). Несмотря на то, что в [23] p_0 и A_e/A^* больше, а h^* меньше, чем в настоящих опытах, коэффициенты усиления согласуются в пределах точности экспериментов. Расчет [23] (рис. 5, 1) дает для тех же условий несколько большие значения коэффициентов усиления.

В экспериментах [7] ($h^*=0,8$ мм, $A_e/A^*=56$, $r_{\text{H}_2\text{O}}=0,01$ и $r_{\text{CO}_2}=0,09$) зависимость коэффициентов усиления от температуры получена при переменном давлении: p_0 росло с увеличением T_0 . На рис. 5 показана

ны данные этой работы в диапазоне давлений 22—40 ата. Интерес представляет сравнение в точке $T_0=1400$ К, где давление (26 ата) близко к имевшему место в настоящих опытах и отличие условий состоит лишь в большей (\sim в 2 раза) степени расширения сопла и несколько меньшем значении r_{CO_2} в [7]. Результаты такого сопоставления показывают, что в данном диапазоне температур увеличение A_e/A^* свыше 30 не ведет к росту коэффициента усиления.

В отличие от работ [7, 23] в проведенных экспериментах в составе лазерноактивной среды содержался кислород ($r_{\text{O}_2} = 0,09 \div 0,16$). Его влия-

ние на коэффициент усиления изучено недостаточно полно. Но как показывает сравнение данных, приведенных на рис. 4, 5, роль O_2 в исследованном диапазоне параметров невелика. Это согласуется с выводами работ [20, 30], полученными в ином диапазоне параметров.

Авторы благодарны Р. И. Солоухину и В. К. Баеву за содействие в проведении работ и полезные обсуждения.

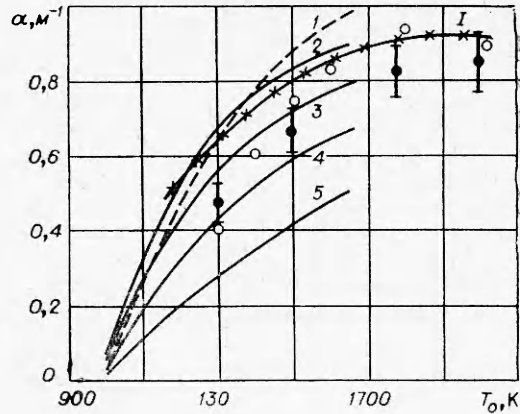


Рис. 5. Зависимость коэффициента усиления от температуры при $r_{\text{H}_2\text{O}}$, равном 0,01 (1), 0,02 (2), 0,035 (3), 0,05 (4), 0,07 (5) (светлые точки — данные [7], зачерненные — [23], вертикальными линиями показан разброс экспериментальных данных).

Институт теоретической
и прикладной механики СО АН СССР,
Новосибирск

Поступила в редакцию
23/II 1976

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. Ф. Гордиец, А. И. Осипов и др. УФН, 1972, 108, 4.
2. В. Н. Карнюшин, Р. И. Солоухин. ФГВ, 1972, 8, 2.
3. Теоретические проблемы спектроскопии и газодинамических лазеров. Тр. ФИАН им. П. Н. Лебедева, т. 83. Под ред. Н. Г. Басова. М., «Наука», 1975 г.
4. Р. И. Солоухин. — В сб.: Горение и взрыв. М., «Наука», 1976.
5. W. R. Warren. *Astronautics and Aeronautics*, 1975, 4.
6. D. A. Russell. *Astronautics and Aeronautics*, 1975, 6.
7. E. T. Gerry. *IEEE Spectrum*, 1970, 7, p. 51, AIAA Paper, No. 71—23.
8. S. Yatsiv, E. Greenfield a. o. *Appl. Phys. Lett.*, 1971, 19, 3.
9. R. A. Meinzer. AIAA Paper, No. 71—25.
10. J. Tulip, H. Seguin. *Appl. Phys. Lett.*, 1971, 19, 8.
11. P. V. Avizonis, D. R. Dean, R. Grotbeck. *Appl. Phys. Lett.*, 1973, 23, 7.
12. Т. И. Козлов, В. Н. Иванов, А. С. Кораблев. ЖЭТФ, 1973, 65, 1.
13. Г. И. Козлов, В. Н. Иванов и др. ЖЭТФ, 1975, 68, 5.
14. В. К. Конюхов, М. В. Матросов и др. Письма в ЖЭТФ, 1970, 12, 10.
15. J. D. Anderson, E. N. Winkler. *Proceedings of IEEE*, 1971, 59, 4.
16. J. D. Anderson, R. L. Humphrey a. o. *Phys. of Fluids*, 1971, 14, 12.
17. G. Lee, E. E. Gowen, J. R. Hagen. *AIAA J.*, 1972, 10, 65.
18. J. D. Anderson. AIAA Paper, No. 72—143.
19. С. А. Лосев, В. Н. Макаров и др. ФГВ, 1973, 9, 4.
20. С. А. Лосев, О. П. Шаталов. *Квантовая электроника*, 1974, 1, 12.
21. Г. В. Гембаржевский, Н. А. Генералов, Г. И. Козлов. ПМТФ, 1973, 4.
22. А. И. Демин, Е. М. Кудрявцев и др. — В сб.: *Квантовая электроника*, № 3, 1972; *Квантовая электроника*, 1974, 1, 3.
23. J. Vamos. AIAA Paper, No. 74—177.
24. J. D. Anderson. *Phys. of Fluids*, 1970, 13, 8.
25. J. Tulip, H. Seguin. *Appl. Phys.*, 1971, 42, 9.

26. Н. А. Генералов, Г. И. Козлов, И. К. Селезнева. ПМТФ, 1971, 5.
27. J. D. Anderson. AIAA Paper, No. 74—176.
28. Г. В. Галутва, А. И. Рязанцев. Селекция типов колебаний и стабилизация частоты оптических квантовых генераторов. М., «Связь», 1972.
29. М. Д. Аксененко, Е. А. Красовский. Фоторезисторы, М., «Сов. радио», 1973.
30. Б. В. Егоров, В. Н. Комаров. ПМТФ, 1975, 2.

РАСЧЕТ СФЕРИЧЕСКОЙ ГЕТЕРОГЕННОЙ ДЕТОНАЦИИ

С. А. Ждан

Существование детонации в двухфазных смесях, состоящих из мелкодисперсных капель горючего в газообразном окислителе, экспериментально установлено в работах [1—5]. Теоретически вопрос о возможности детонации в двухфазных смесях рассматривался в [6]. Изучению характера изменения термо-газодинамических параметров смеси в зоне реакции детонационной волны в плоском стационарном случае посвящены работы [7, 8].

В силу нестационарности реального физического явления представляет интерес решение нестационарной задачи о распространении волны сжатия в горючей двухфазной смеси. В данной работе в рамках модели дробления капель [9] численно решена задача о сферической ударной волне, которая распространяется в горючей смеси, состоящей из полидисперсного капельного распыла горючего в воздухе.

1. Постановка задачи

Допустим, что в воздухе, который находится в состоянии покоя при постоянном давлении p_0 и с постоянной плотностью ρ_0 , равномерно распределен полидисперсный распыл жидкого горючего. Такая смесь представляет двухфазную среду с конденсированной и газовой фазой. Пусть в смеси произошел точечный взрыв. В результате взрыва образуется сильная ударная волна (УВ), за которой с поверхности частиц k -фазы высокоскоростным газовым потоком срывается горючее, перемешивается с воздухом и вступает в химические реакции с выделением тепла. Выделение энергии замедляет процесс затухания УВ и при достаточном выделении тепла возможен выход на режим самоподдерживающейся гетерогенной детонации.

Система дифференциальных уравнений, описывающая поведение двухфазной многоскоростной сплошной среды с учетом тепло- и массообмена между фазами и химических реакций, рассматривалась в работах [10—14]. При выводе уравнений использовались предположения:

а) расстояния, на которых характеристики течения, осредненные по малому объему, содержащему большое число частиц, меняются существенно, много больше расстояний между частицами;

б) эффекты вязкости важны лишь в процессах взаимодействия газовой фазы и частиц;

в) собственное давление частиц, обусловленное их хаотическим движением, мало по сравнению с давлением газа;

г) столкновениями между частицами пренебрегаем. Введем дополнительные предположения, позволяющие упростить математическую модель;