ЛИТЕРАТУРА

1. **В. Н. Краснопевцев, И. А. Суторихин.** Динамика температуры углеродных частиц.— В кн.: Распространение мощного оптического излучения в твердом аэрозоле. Барнаул: изд. АГУ, 1982.
2. **В. И. Букатый, А. М. Шайдук.** Оптические возмущения среды вокруг горящих частиц. Тез. докл. 2-го Всес. совещ. по распространению лазерного излучения в дисперсной среде. Обнинск: изд. ИЭМ, 1982.
3. **Ч. Вест.** Голографическая интерферометрия. М.: Мир, 1982.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА СВЕРХРАВНОВЕСНОЙ НАКАЧКИ В CO_2-ГДЛ НА СМЕСИ $CO + N_2O$ С ДОБАВКАМИ ВОДОРОДА

С. И. Крючков, Н. Н. Кудрявцев, С. С. Новиков, В. Н. Щеглов

(Москва)

Протекание отдельных экзотермических стадий химических реакций в расширяющемся потоке газа может приводить к увеличению показателя усиления в инверсной заселенности в газодинамических лазерах за счет прямого преобразования химической энергии в энергию излучения [1, 2]. Такое сочетание химического и газодинамического способов создания инверсной заселенности получило название эффекта сверхравновесной накачки в ГДЛ.

Перспективность использования химической реакции $CO + N_2O$ для сверхравновесной накачки CO_2-ГДЛ показана в [2]. Механизм данного эффекта в CO_2-ГДЛ на реагирующей смеси $CO + N_2O$ остается к настоящему времени не выясненным. В [3] на основе анализа пятистадийной нецепной схемы брутто-реакции $CO + N_2O$, предложенной в [4], показано, что сверхравновесная накачка может происходить в результате протекания рекомбинации $CO + O + M$ в расширяющемся потоке в области критического сечения сопла. В более поздних исследованиях кинетики взаимодействия молекул CO и N_2O [5, 6] установлено, что реакция протекает по цепному механизму, обусловленному следовыми примесями молекул водорода и воды. В [7] для условий ГДЛ в режиме сверхравновесной накачки разработана кинетическая схема этой реакции, основанная на цепном механизме.

В данной работе с целью выяснения механизма сверхравновесной накачки в CO_2-ГДЛ на реагирующей смеси $CO + N_2O$ экспериментально исследованы параметры колебательной неравновесности — показателя усиления k_0 и колебательных температур асимметричной T_3 и объединенной (симметричной и деформационной) T_2 мод CO_2 в сверхзвуковом потоке на выходе из сопла ГДЛ на ударной трубе. Исследовались смеси с различным количеством добавок молекулярного водорода, что позволяло изменять эффективность протекания элементарных стадий брутто-реакции $CO + N_2O$. Для условий экспериментов теоретически моделировались химические превращения в смеси для выявления экзотермических элементарных стадий реакции $CO + N_2O$, определяющих сверхравновесную накачку. Экспериментальные исследования проводились с использованием сравнительного метода [2], в котором сопоставляются параметры колебательной неравновесности в реагирующей и инертной смесях.

В [7] для цепной реакции $CO + N_2O$ в присутствии добавок водорода или паров воды выделены восемь наиболее существенных экзотермических элементарных стадий, в которых могут образовываться колебательно-возбуждающие молекулы, способные передать свою энергию асимметричной моде CO_2

$$CO + N_2O \xrightarrow{k_1} CO_2 + N_2 + 87{,}3\ \text{ккал/моль}, \quad (1)$$

$$M + O + NO \underset{k_{-2}}{\overset{k_2}{\rightleftarrows}} NO_2 + M + 73{,}0\ \text{ккал/моль}, \quad (2)$$

$$O + N_2O \underset{k_{-3}}{\overset{k_3}{\rightleftarrows}} N_2 + O_2 + 79{,}0\ \text{ккал/моль}, \quad (3)$$

$$O + CO + M \underset{k_{-4}}{\overset{k_4}{\rightleftarrows}} CO_2 + M + 127{,}0\ \text{ккал/моль}, \quad (4)$$

$$H + N_2O \underset{k_{-5}}{\overset{k_5}{\rightleftarrows}} N_2 + OH + 62{,}0\ \text{ккал/моль}, \quad (5)$$

$$OH + CO \underset{k_{-6}}{\overset{k_6}{\rightleftarrows}} CO_2 + H + 25{,}0\ \text{ккал/моль}, \quad (6)$$

$$NO_2 + CO \underset{k_{-7}}{\overset{k_7}{\rightleftarrows}} CO_2 + NO + 54{,}0\ \text{ккал/моль}, \quad (7)$$

$$NH + N_2O \xrightarrow{k_8} N_2 + HNO + 76{,}0\ \text{ккал/моль}. \quad (8)$$

Проведенный в [7] численный расчет на основе рассмотрения кинетики химических реакций и колебательной релаксации показывает, что наблюдаемое в [2, 3, 7] повышение K_0 и относительной инверсной заселенности $\Delta N = (N_{001} - N_{100})/N_{CO_2}$ в потоке соответственно на 0,1—0,3 $м^{-1}$ и на 1—4% по отношению к инертной смеси сравнения может быть обусловлено выделением энергии в колебательные степени свободы в реакциях (1) и (4)—(6). Через N_{001} и N_{100} обозначены заселенности верхнего и нижнего лазерных уровней, N_{CO_2} — общая плотность молекул углекислого газа. Относительная эффективность протекания реакций (1)—(8) в значительной мере зависит от содержания водорода в смеси при $\xi_{H_2} \leqslant 1\%$. Поэтому при исследовании зависимости сверхравновесной накачки от добавок молекул H_2 при $\xi_{H_2} \leqslant 1\%$ возможна идентификация элементарных стадий брутто-реакций $CO + N_2O$, вносящих основной вклад в этот эффект.

В условиях данной работы минимальная концентрация водорода в реагирующей смеси $CO + N_2O + (He)$ определяется примесью молекул H_2 в окиси углерода. Проведенный масс-спектральный анализ дает значение концентрации примесей водорода в CO, не превышающее 0,05—0,1%. Таким образом, максимальное содержание примеси молекул H_2 в исследуемых смесях, содержащих 5 и 25% окиси углерода, соответственно не превышает 0,005 и 0,025%. Пары воды попадают в исследуемую смесь в результате десорбции со стенок ударной трубы. Измеренное их содержание составляло не более 0,02—0,05%. Согласно данным [5, 6], при таких концентрациях примесей H_2 и H_2O механизм брутто-реакции $CO + N_2O$ в области $T \leqslant 1{,}8 \div 1{,}9$ определяется цепными элементарными стадиями.

Состав рассматриваемых в данной работе реагирующих смесей и смесей сравнения, а также используемая их нумерация приведены в табл. 1. Исследования проводили для двух типов реагирующих смесей. Первый тип — Iа—Iг — с избыточным, по сравнению со стехиометрическим, содержанием окиси углерода ξ_{CO} и различным ξ_{H_2}. Отметим, что для смесей с избыточным содержанием молекул CO к настоящему времени получены наибольшие повышения показателя усиления вследствие сверхравновесной накачки.

Результаты расчета состава продуктов химических превращений и повышения температуры газа представлены в табл. 2. Расчет проводили на основе цепной кинетической схемы реакции $CO + N_2O$, разработан-

Таблица 1

Смесь	ξ_i, %					
	N_2O	CO	H_2	N_2	CO_2	He
Iа	5	25	0,025	—	—	70
Iб	5	25	0,15	—	—	69,85
Iв	5	25	0,5	—	—	69,5
Iг	5	25	1,0	—	—	69,0
I′	—	20	—	5	5	70
IIа	5	5	0,005	—	—	90
IIб	5	5	0,1	—	—	89,9
II′	—	—	—	5	5	90

ной в [7] для условий CO_2-ГДЛ в режиме сверхравновесной накачки ($T = 1000 \div 2500$ K, $p = 5 \div 25$ атм). Возможное влияние неравновесного возбуждения колебательных степеней свободы молекул на ускорение некоторых элементарных стадий [8] не учитывали из-за недостаточности имеющихся к настоящему времени экспериментальных данных. Используемая схема включает 26 элементарных стадий, учитываемых в прямом и обратном направлениях. Представленные в табл. 2 результаты расчетов продуктов химических превращений соответствуют периоду времени $\tau = 0{,}3 \div 0{,}5$ мс после воспламенения смеси. Последующее повышение температуры и изменение смеси в период догорания не превышает 5%.

Из данных табл. 2 видно, что после воспламенения содержание молекул CO_2 в реагирующих смесях Iа — Iг составляет 70—85% от начального содержания закиси азота $\xi^{(0)}_{N_2O}$, молекул N_2 — 90—95% от $\xi^{(0)}_{N_2O}$. Поэтому концентрация CO_2 в смеси сравнения $\xi_{CO_2} = \xi^{(0)}_{N_2O}$, молекул N_2 $\xi_{N_2} = \xi^{(0)}_{N_2} + \xi^{(0)}_{N_2O}$, где $\xi^{(0)}_{N_2}$ — начальное содержание молекул N_2 в реагирующей смеси. Концентрация молекул и атомов кислорода в продуктах химических превращений не превышает тысячных долей процента, что не влияет на колебательную релаксацию [9, 10]. Присутствие молекул NO в количествах около 0,5% приводит к некоторому снижению инверсной заселенности в CO_2-ГДЛ [9, 10].

Различное содержание водорода и паров воды в продуктах реакции смесей Iа — Iг, изменяющееся от $\xi_{H_2} \approx \xi_{H_2O} = 1{,}7 \cdot 10^{-3}$ для смеси Iа до $\approx 0{,}5\%$ для смеси Iг, важно для колебательной релаксации при расширении в сопле. Поскольку они содержат значительное количество гелия ($\xi_{He} = 70\%$), то ускорение процессов колебательной релаксации вследствие увеличения ξ_{H_2} и ξ_{H_2O} должно приводить к снижению K_0.

Для смесей Iа — Iг использовался один состав сравнения I′ (см. табл. 1), позволяющий определять нижнюю границу эффекта сверхравновесной накачки. Действительно, содержание излучающих молекул CO_2

Таблица 2

Смесь	ξ_i, %								ΔT, K
	CO_2	N_2	CO	NO	O_2	H_2O	H_2	O	
Iа	3,82	4,86	20,26	0,27	$3 \cdot 10^{-3}$	$1{,}69 \cdot 10^{-3}$	$1{,}63 \cdot 10^{-3}$	$1{,}55 \cdot 10^{-4}$	700
Iб	4,35	4,80	20,6	0,401	$1{,}87 \cdot 10^{-3}$	$5{,}14 \cdot 10^{-2}$	$4{,}46 \cdot 10^{-2}$	$2{,}22 \cdot 10^{-4}$	668
Iв	4,10	4,72	20,9	0,420	$1{,}5 \cdot 10^{-3}$	0,239	0,193	$1{,}18 \cdot 10^{-4}$	657
Iг	3,85	4,74	21,2	0,434	$2{,}96 \cdot 10^{-4}$	0,496	0,439	$1{,}56 \cdot 10^{-5}$	651
IIа	2,01	4,83	2,99	0,330	1,318	$1{,}53 \cdot 10^{-4}$	$6{,}43 \cdot 10^{-5}$	$4{,}76 \cdot 10^{-4}$	425
IIб	3,23	4,74	1,77	0,358	0,528	$1{,}69 \cdot 10^{-2}$	$2{,}18 \cdot 10^{-3}$	$6{,}01 \cdot 10^{-3}$	584

после воспламенения составляет 70—85% от их концентрации в смеси сравнения I′, и, кроме того, присутствуют молекулы NO, снижающие инверсную заселенность в CO_2-ГДЛ. Состав I′ не содержит также водорода и паров воды, и, следовательно, в нем отсутствует снижение инверсной заселенности, связанное с дезактивирующим действием этих молекул.

Проведены исследования реагирующих стехиометрических смесей IIа и IIб, в которых относительная эффективность элементарных стадий (1)—(8) существенно отлична от Iа — Iг. Для IIа и IIб также использовался один состав сравнения II′, позволяющий определять нижнюю границу эффекта сверхравновесной накачки. Выбрана смесь II′ на основании расчетов состава продуктов химических превращений (см. табл. 2) аналогично изложенному выше. Отметим значительное снижение в целом содержания молекул CO_2 в продуктах химических превращений смесей IIа и IIб по отношению к II′. Поскольку $K_0 \sim \xi_{CO_2}$ и в IIа и IIб молекулы CO, NO, O_2, снижающие инверсную заселенность [8, 9], содержатся в количествах $\sim 0{,}3 \div 3\%$, полученные результаты позволяют восстанавливать лишь заниженную на ~ 40—60% величину повышения показателя усиления за счет сверхравновесной накачки.

В данной работе на выходе из сверхзвукового сопла одновременно измерялись показатель усиления K_0 на линии P20 перехода $(001 \rightarrow 100)$ и интенсивность ИК-излучения в спектральном диапазоне $\lambda = 4{,}37$ мкм, соответствующем центральной части полосы 4,3 мкм CO_2. В характерных для CO_2-ГДЛ колебательно-неравновесных условиях полоса 4,7 мкм окиси углерода перекрывается с полосой 4,3 мкм углекислого газа [11]. Поскольку CO содержалась в ряде исследованных смесей в значительных количествах ($\xi_{CO} \approx 25\%$), в данном канале регистрируемое излучение соответствовало полосам 4,3 мкм CO_2 и 4,7 мкм CO.

Восстановление колебательных температур $CO_2 — T_3$ и T_2 проводилось на основе численного решения уравнений

$$I = A \int C(\omega) \left[I_{4,3}(\xi_{CO_2}, T_3, T_2, \omega) + I_{4,7}(\xi_{CO}, T_5, \omega) \right] d\omega, \qquad (9)$$

$$K_0 = K(T_3, T_2), \qquad (10)$$

где I и K — экспериментально измеренные величины интенсивности ИК-излучения и показателя усиления; A — постоянная, определяющая чувствительность; $C(\omega)$ — функция, описывающая спектральное пропускание оптической системы, регистрирующей ИК-излучение; ω — волновое число; T_5 — колебательная температура окиси углерода. Усредненные по вращательной структуре интенсивности излучения в полосах 4,3 мкм $CO_2 — I_{4,3}(\xi_{CO_2}, T_3, T_2, \omega)$ и 4,7 мкм CO — $I_{4,7}$ (ξ_{CO}, T_5, ω) рассчитывались по методике [11]. Расчет показателя усиления в центре вращательной линии $K(T_3, T_2)$ проводился при совместном учете допплеровского и столкновительного механизмов уширения, согласно аналитической зависимости [10]. Величина A определялась при калибровочных экспериментах по равновесному излучению CO_2 в смеси 20% CO_2+80% He, нагретой до $T = 800 \div 1000$ K за падающей ударной волной. Это позволяло проводить калибровку и измерение интенсивности излучения в ГДЛ без изменения оптической системы. Функция спектрального пропускания $C(\omega)$ определяется используемым фильтром. Ее восстановление проводилось экспериментально с помощью спектрографа.

Проведенный расчет показал, что вклад полосы 4,7 мкм CO в суммарное регистрируемое ИК-излучение в потоке не превышает в условиях данной работы 20—30%. Поэтому при решении системы (9), (10) полагалось, что колебательные температуры молекул CO(T_5) и асимметричной моды $CO_2(T_3)$ совпадают, поскольку реально величина T_5 заключена в диапазоне $T_3 \leqslant T_5 \leqslant T_*$, где T_* — равновесная температура газа в критическом сечении сопла. Сделанное предположение занижает вклад излучения окиси углерода и, следовательно, приводит к завы-

шению восстанавливаемой величины T_3. Вследствие того, что вклад молекул CO в суммарное регистрируемое ИК-излучение потока мал, завышение восстановленной величины T_3 также не должно быть значительным. Решение (9) в двух крайних предположениях $T_5 = T_3$ и $T_5 = T_*$ обусловливает различие в восстановленных величинах T_3, не превышающее 20—30 К.

Точность восстановления колебательных температур T_3 и T_2, определяемая погрешностями экспериментального измерения K_0 и I, и численного расчета величин $I_{4,5}$ и $I_{4,7}$ подробно проанализирована в [11]. На основе данных [11] с учетом используемого приближения $T_5 = T_3$ установлено, что погрешность в определении T_3 в данной работе не превышает +50 и −30 К, а T_2 +30 и −20 К.

Эксперименты проводили на ударной трубе с соплом на торце [11]. Химические реакции происходили в секции низкого давления за отраженной от торца трубы ударной волной. Смесь расширялась в плоском профилированном сопле минимальной длины с высотой критического сечения $h_* = 1$ мм и степенью расширения потока $h/h_* = 23$. На выходе из сопла измеряли показатель усиления с использованием двухпроходной схемы, интенсивность спонтанного ИК-излучения в диапазоне $\lambda = 4{,}37 \pm 0{,}11$ мкм и видимое излучение в диапазоне $\lambda = 391 \pm \pm 12$ нм, соответствующем рекомбинационному свечению $CO + O \rightarrow \rightarrow CO_2 + h\nu$.

Состояние газа за отраженной ударной волной контролировали посредством измерения интенсивности ИК-излучения в диапазоне $\lambda = = 4{,}75 \pm 0{,}8$ мкм и давления газа в предсопловом объеме. Численными расчетами показано, что при протекании реакции $CO + N_2O$ ИК-излучение в данном спектральном диапазоне определяется температурой смеси и практически не зависит от изменения соотношений в ходе реакции между концентрациями излучающих молекул CO_2, N_2O и CO. Это является следствием практического постоянства суммарного содержания молекул CO_2 и N_2O при протекании реакции и приблизительно одинаковой интенсивности их полос 4,3 и 4,5 мкм, дающих более 80% вклада в регистрируемое излучение. Поэтому измерения интенсивности ИК-излучения из предсоплового объема позволяли регистрировать изменения температуры газа и, следовательно, контролировать протекание химических превращений.

Определение начальных (без учета разогрева за счет химических реакций) температур T и давлений p газа за отраженной ударной волной проводили численно по измеренной скорости падающей ударной волны. Скорость ударной волны измеряли на двух базах пьезоэлектрическими датчиками. Температуру в реагируемой смеси после воспламенения T_0 определяли с использованием данных ю разогреву за счет химических реакций, рассчитанных численно и приведенных для исследованных смесей в табл. 2. Представленные величины разогрева ΔT рассчитаны в предположении о постоянстве давления в «горячей пробке» при протекании реакции $CO + N_2O$. Это базируется на измерениях давления, показывающих, что в условиях данной работы значение p повышается в период воспламенения смеси не более чем на 10—20%.

Степень чистоты используемых газов составляла: азот 99,9%, гелий 99,99%, водород электролитический 99,8%, окись углерода техническая, очищенная перегонкой и тщательно осушенная, 99,7%, углекислый газ, очищенный перегонкой и осушенный, 99,8%. Содержание примесей водорода, определенное с использованием масс-спектрометрического анализа, не превышало 0,01% в CO_2, He и N_2 и 0,1% в CO. Как отмечалось выше, примеси паров воды в исследуемых условиях обусловлены десорбцией со стенок ударной трубы и не превышают 0,05%.

На рис. 1, *а*, *б* приведены записи экспериментально регистрируемых параметров в смесях Ia и I′ в практически одинаковых (после воспламенения реагирующей смеси) условиях, иллюстрирующие эффект сверх-

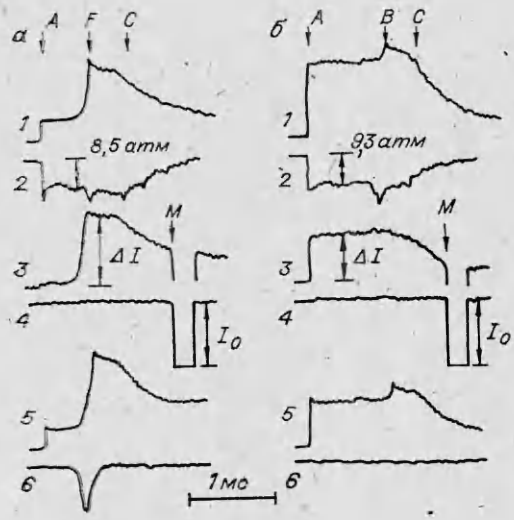

Рис. 1. Типичные осциллограммы реагирующей (*а*) и смеси сравнения (*б*).

а) p_0=8,5 атм, T=1210 К, ΔT=700 К, T_0=1910 К; *б*) p_0=9,3 атм, T_0=1935 К; *1*, *2* — ИК-излучение и давление газа в предсопловом объеме; *3* — малое изменение мощности лазерного излучения ΔI; *4* — полная мощность лазерного излучения (I_0); *5*, *6* — интенсивности ИК-излучения и рекомбинационного свечения в потоке.

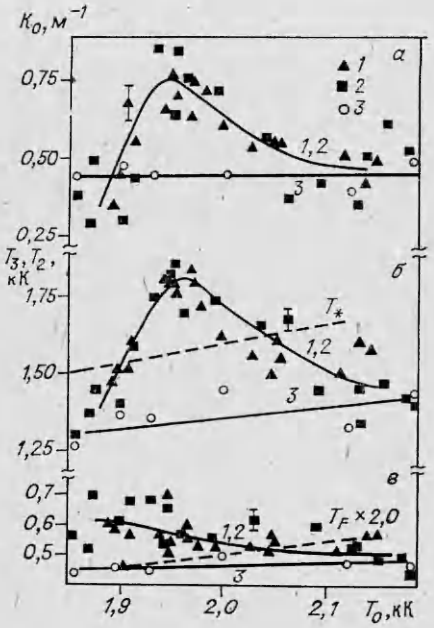

Рис. 2. Зависимость K_0 (*а*), T_3 (*б*) и T_2 (*в*) молекулы CO_2 в реагирующей Ia и смеси сравнения I′ от температуры газа перед соплом при $p_0 = 9 \pm 1$ атм.

1, *2* — смесь Ia при использовании в качестве толкающего газа гелия и гремучей смеси соответственно; *3* — смесь I′; T_F — поступательная температура в расширившемся потоке.

равновесной накачки. Стрелками обозначены моменты времени, соответствующие началу протекания следующих процессов: A — отражения ударной волны от торца трубы, F — воспламенения смеси, B — прихода возмущений, отраженных от контактной поверхности, C — разрушения «горячей пробки» волнами разрежения, отраженными от противоположного торца ударной трубы, M — перекрывания лазерного луча электрооптическим модулятором. Видно, что по истечении периода индукции происходит резкое воспламенение смеси (точка F), сопровождающееся значительным увеличением интенсивности излучения из предсоплового объема. Давление при этом повышается незначительно. Давление и температура газа в предсопловом объеме в реагирующей смеси после воспламенения и в смеси сравнения близки по величине.

Величина $K_0 = \Delta I/I_0 L$ в реагирующей смеси после воспламенения (см. рис. 1) выше на ~50%, чем в смеси сравнения (здесь L — длина пути луча в газе). Аналогично имеет место превышение интенсивности ИК-излучения после воспламенения в реагирующей смеси приблизительно в 2 раза. Запись интенсивности рекомбинационного свечения I_r, которое в данных условиях (при $\xi_{CO} \approx \text{const}$) пропорционально содержанию атомарного кислорода, показывает значительное содержание атомов O в период воспламенения (см. рис. 1, *а*, кривая *6*). Таким образом, при практически одинаковых параметрах газа в предсопловом объеме K_0 и I в реагирующей смеси существенно выше, что связано с протеканием сверхравновесной накачки при расширении газа в сопле.

Результаты измерений K_0 и колебательных температур CO_2 в смесях Ia и I′ представлены на рис. 2. В области температур газа перед соплом $T_0 = 1{,}9 \div 2{,}1$ кК наблюдается существенное увеличение K_0 до ~0,75 м$^{-1}$ по сравнению с инертной смесью (~0,45 м$^{-1}$), что является следствием повышения колебательной температуры асимметричной моды CO_2. В диапазоне $T_0 = 1{,}9 \div 2{,}1$ кК величина T_3 в смеси Ia на 300—350 К превышает колебательную температуру асимметричной моды CO_2

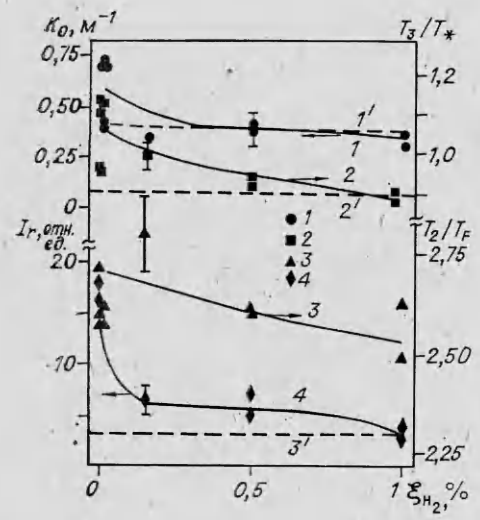

Рис. 3. Зависимость K_0 (*1*), отношений T_3/T_* (2) , T_2/T_F (*3*) и I_r (*4*) от содержания примесей водорода. Давление и температура газа в предсопловом объеме поддерживались в пределах $T = 1200 \pm 30$ К, $p_0 = 8{,}5 \pm 1{,}0$ атм, смеси Iа — Iг.
1′—3′ — результаты для смеси сравнения I′.

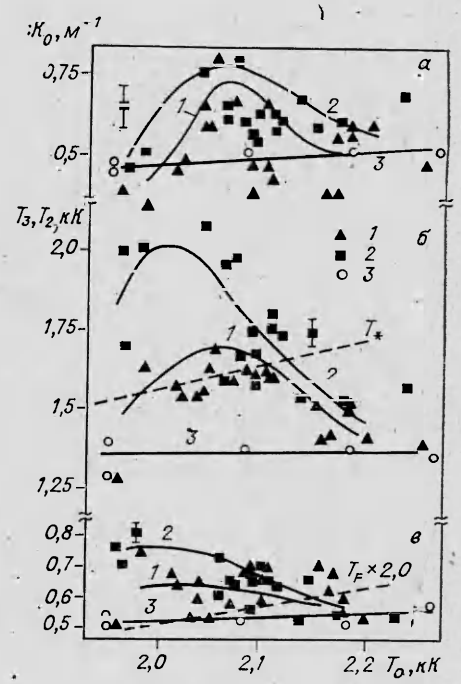

Рис. 4. Зависимость K_0 (*а*), T_3 (*б*) и T_2 (*в*) в реагирующих смесях стехиометрического состава IIа и IIб и в смеси сравнения II′ от температуры газа перед соплом в предположении полного завершения химических превращений от T_0, $p_0 = 9 \pm 1$ атм.
1 — смесь IIа; *2* — IIб; *3* — II′.

в смеси сравнения и на 150—200 К температуру газа в критическом сечении сопла. Одновременно повышается и колебательная температура объединенной моды CO_2 по отношению к смеси сравнения.

При максимальной величине сверхравновесной накачки длительность задержки воспламенения в реакции $CO + N_2O$ приближается к периоду существования стационарных условий в предсопловой области. Для выяснения возможного влияния возмущений, отраженных от контактной поверхности, на задержку воспламенения смеси $CO + N_2O$ и сверхравновесную накачку проведены две серии экспериментов со смесью Iа. В первой серии в качестве толкающего газа использовался чистый гелий, во второй серии — гремучая смесь $O_2 + 2H_2$, разбавленная гелием. Условия на контактной поверхности для обеих серий существенно различны. Следовательно, должны различаться по величине и времени прихода в предсопловую область возмущения, отраженные от контактной поверхности. Из данных рис. 2 видно, что результаты, полученные в этих сериях экспериментов, совпадают, и можно заключить, что либо в условиях наблюдения сверхравновесной накачки возмущения не успевают достигнуть предсопловой области, либо они оказываются слабыми и не влияют на наблюдаемый эффект.

Результаты данной работы для смеси Iа находятся в качественном согласии с исследованиями [2, 3]. Следует отметить несколько большее превышение показателя усиления в смеси Iа, достигнутое в данной работе. Измеренные температуры T_3 в режиме сверхравновесной накачки на 100—200 К выше зарегистрированных в [3] и заметно превышают T_*. В [3] значения T_3 при максимуме сверхравновесной накачки приблизительно совпадали с T_*. Существенное отличие условий эксперимента данной работы от [2, 3] состоит в тщательной очистке используемых газов и контроле содержания в них примесей. Сопоставляя резуль-

таты, можно предположить, что неконтролируемые малые количества примесей (~0,01%) оказывают существенное влияние на механизм сверхравновесиой накачки.

Влияние добавок водорода иллюстрирует рис. 3. Содержание H_2 изменилось со следовых количеств ~0,01% в смеси Iа до 1% в Iг. Приведенные результаты соответствуют максимальной величине сверхравновесной накачки, которая наблюдается для смесей с различным содержанием водорода при несколько отличающихся (ие более чем на 100 К) температурах газа перед соплом T_0. Видно, что при увеличении содержания молекул H_2 происходит снижение K_0 с $0{,}6 \div 0{,}7$ м$^{-1}$ при $\xi_{H_2} = 0{,}01\%$ до $\sim 0{,}4$м$^{-1}$ при $\xi_{H_2} = 1\%$. Одновременно уменьшается отношение T_3/T_* с 1,1 до 0,9. Колебательная температура T'_2, приведенная к поступательной температуре газа в потоке T_F, при этом изменяется не более чем на 0,15. В то же время при добавках молекул H_2 в количестве 0,15% происходит резкое снижение рекомбинационного свечения в период воспламенения и, следовательно, пропорциональное уменьшение концентрации атомарного кислорода. Уменьшение содержания атомов О в смеси $CO + N_2O$ при добавлении водорода отмечалось также при численном расчете в [6].

Из представленных на рис. 3 результатов можно сделать следующие выводы. Сверхравновесная накачка наблюдается в широком диапазоне изменения ξ_{H_2} вплоть до $\xi_{H_2} = 1{,}0\%$. Реакция рекомбинации (2) и (4) и реакция (3) не дают заметного вклада в сверхравновесную накачку, поскольку при значительном снижении концентрации атомов О в смеси Iб с $\xi_{H_2} = 0{,}15\%$ по сравнению со смесью Iа величины K_0 и T_3 изменяются незначительно.

Результаты исследования добавок молекулярного водорода в составах IIа и IIб приведены на рис. 4. Увеличение K_0 в смеси IIа, содержащей только следовые примеси H_2, составляет $0{,}15 \div 0{,}2$ м$^{-1}$ по отношению к смеси сравнения II′. Максимальная величина эффекта сверхравновесной накачки наблюдается при $T_0 = 2{,}05$ кК, что на ~100 К выше, чем в смесях Iа — Iг. Добавление водорода в количестве ~0,1% (смесь Iб) несколько увеличивает K_0 и заметно расширяет область существования эффекта сверхравновесной накачки до $T = 2{,}0 \div 2{,}2$ кК.

Результаты измерений колебательной температуры T_3 приведены на рис. 4, *б*. Видно, что в области существования сверхравновесной накачки величина T_3 в реагирующей смеси IIа на 150—250 К превышает соответствующие значения в смеси сравнения. Максимальное значение T_3 наблюдается при $T_0 = 2{,}05$ кК и приблизительно совпадает со значениями температуры в критическом сечении сопла. В смеси IIб, содержащей ~0,1% H_2, колебательная температура T_3 характеризуется высокими значениями, достигающими 2 кК и существенно превышающими T_* в широком диапазоне $T_0 = 1{,}95 \div 2{,}15$ кК. При этом в смесях IIа и IIб заметно увеличивается колебательная температура T_2 по отношению к смеси сравнения. При повышении температуры газа перед соплом до $T_0 \approx 2{,}2$ кК значения T_3 и T_2 в реагирующих и смесях сравнения практически совпадают.

Таким образом, на основании представленных на рис. 4 результатов можно сделать вывод о том, что добавление небольших количеств молекулярного водорода в смесь $CO + N_2O$ стехиометрического состава существенно повышает эффект сверхравновесной накачки, которая, повидимому, осуществляется неселективно, приводя к одновременному росту колебательных температур асимметричной T_3 и объединенной T_2 мод углекислого газа. Избыточная заселенность объединенной моды CO_2 и, следовательно, нижнего лазерного уровня ограничивает увеличение показателя усиления в CO_2-ГДЛ на данной реагирующей смеси в режиме сверхравновесной накачки. В то же время, согласно данным, приведенным на рис. 3, добавление малых количеств водорода в смесь с

избытком окиси углерода не приводит к увеличению величины сверхравновесной накачки.

Оценка скорости образования возбужденных молекул, способных передавать эту энергию асимметричной моде CO_2 в элементарных стадиях (1)—(8) $\dot{\xi}_n$ (здесь ξ_n — мольные доли образующихся частиц), необходимой для обеспечения наблюдаемой величины эффекта сверхравновесной накачки, получена в [7]. В предположении, что в соответствующей элементарной стадии выделяется 5—15 колебательных квантов, $\dot{\xi}_n \approx 10$ с$^{-1}$ для смесей Iа — Iг и $\sim 3 \div 4$ с$^{-1}$ для IIа — IIб, имеющих примерно в 3 раза меньший резервуар колебательной энергии.

Результаты расчета $\dot{\xi}_n$ в период воспламенения для элементарных стадий (1)—(8) в условиях наблюдения максимальной сверхравновесной накачки представлены в табл. 3. Отметим, что эти расчеты носят оценочный характер, поскольку проводились для термодинамически равновесного газа перед соплом и тем самым пренебрегалось влиянием колебательной неравновесности в расширяющемся потоке ГДЛ на скорости протекания элементарных стадий.

Таблица 3

Номер реакции	$\dot{\xi}_n$ (с$^{-1}$) для смесей					
	Iа	Iб	Iв	Iг	IIа	IIб
1	17,0	15,6	16,4	17,63	1,3	2,54
2	3,81	4,23	2,36	1,34	2,17	4,73
3	0,606	0,330	0,20	1,45	0,215	0,785
4	4,95	3,55	2,03	1,24	0,372	0,728
5	6,18	58,8	112	151	0,114	8,86
6	6,81	63,3	116	141	0,145	7,93
7	0,355	0,616	0,498	0,288	4,62(—2)	5,45(—2)
8	0,645	6,77	12,6	15,6	8,72(—3)	0,865

Из данных табл. 3 следует, что необходимая для обеспечения наблюдаемой величины сверхравновесной накачки скорость образования колебательно-возбужденных компонентов в элементарных стадиях достигается для смесей Iа—Iг в реакциях (1), (5), (6) и (8), в смесях IIа и IIб — в (1), (2), (5), (6). Зависимости $\dot{\xi}_n$ в реакциях (1), (5) и (6) от содержания водорода в смесях Iа — Iг и IIа — IIб качественно коррелируют с соответствующими зависимостями измеренной величины сверхравновесной накачки (см. рис. 1—3). Оценочный характер проведенных расчетов, связанный с недостаточностью необходимых экспериментальных данных по кинетике реакции $CO + N_2O$ в неравновесных условиях, не позволяет в настоящее время провести выделение накачивающих стадий из реакций (1), (5) и (6).

Таким образом, в результате систематического экспериментального исследования зависимости уровня сверхравновесной накачки от содержания водорода и теоретического моделирования кинетики химических превращений показано, что наиболее вероятно сверхравновесная накачка реализуется при протекании цепных элементарных стадий брутто-реакции $CO + N_2O$ (5) и (6), обусловленных примесями водорода, и в прямой обменной реакции (1).

Поступила в редакцию 15/VI 1984,
после доработки — 1/XI 1984

ЛИТЕРАТУРА

1. **Н. Г. Басов, В. В. Грошев, Е. П. Маркин и др.** Квант. электроника, 1976, 3, 5, 1154.
2. **Н. Н. Кудрявцев, С. С. Новиков, И. Б. Светличный.** Докл. АН СССР, 1976 231, 5, 1113.
3. **Н. Н. Кудрявцев, С. С. Новиков, И. Б. Светличный.** ИФЖ, 1978, 35, 6, 1006.

4. **D. Milks, R. Matula.** 14-th Symp. (Intern.) on Combustion. Pittsburgh, 1972.
5. **А. А. Борисов, С. В. Егоркин, В. М. Заманский и др.** Кинетика и катализ, 1979, 20, 6, 1395.
6. **А. А. Борисов, В. М. Заманский, Г. И. Скачков.** Кинетика и катализ, 1978, 19, 4, 853.
7. **С. В. Кондрашов, С. И. Крючков, Н. Н. Кудрявцев и др.** Препринт ИТМО АН БССР, 1984, 5.
8. **И. С. Заслонко, С. М. Когарко, Е. В. Мозжухин и др.** ФГВ, 1978, 19, 1, 3.
9. **А. Б. Британ, С. А. Лосев, О. П. Шаталов.** Квант. электроника, 1974, 1, 12, 2620.
10. **С. А. Лосев.** Газодинамические лазеры. М.: Наука, 1977.
11. **В. М. Дорошенко, Н. Н. Кудрявцев, С. С. Новиков.** ФГВ, 1981, 17, 3, 83.

ФОТОМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СТАБИЛЬНОСТИ ПЛАМЕНИ В МОДЕЛЬНОМ ЖРД НА ТОПЛИВЕ ГАЗООБРАЗНЫЙ КИСЛОРОД — ЖИДКИЙ АММИАК

В. В. Белый, Р. Д. Дулатов, Д. С. Жук, В. В. Соловьев
(Москва)

Один из трудных вопросов теории вибрационного горения в ЖРД связан с нерегулярным, статистическим характером возбуждения автоколебаний в некоторых объектах этого типа при фиксированных условиях подачи топлива. Факты такого рода отмечены, например, в [1, 2]. Распространенное объяснение [2] основано на представлении о нелинейном, так называемом жестком возбуждении автоколебаний под действием случайных импульсов давления, иногда возникающих в камерах сгорания. Другая мыслимая причина названной нерегулярности — случайные (относительно режима подачи топлива) вариации структуры пламени в камере сгорания, существенные для устойчивости горения к слабым возмущениям.

Вопрос о механизме и «качестве» стабилизации пламен в камерах сгорания экстремальной теплонапряженности, не имеющих специальных стабилизирующих устройств, мало изучен даже на феноменологическом уровне. Традиционная точка зрения на этот счет состоит в том, что стабилизацию пламени здесь осуществляют рециркуляционные потоки, возникающие за счет впрыска топлива через форсунки, и, следовательно, режим подачи топлива однозначно определяет структуру пламени.

В [3] предложено дополнить такую модель представлением о существовании дестабилизирующей обратной связи, которая реализуется за счет влияния пространственной структуры пламени на рециркуляцию. В [4] изложены результаты исследования пламени в модельном ЖРД схемы жидкость — жидкость на самовоспламеняющемся топливе азотный тетроксид — несимметричный диметилгидразин, полученные с применением СВЧ-интерферометра. Фактически измеряли избыточные (над термодинамически-равновесными) концентрации электронов в зоне пламени. Эксперименты показали, в частности, что кривые распределения электронных концентраций по длине камеры сгорания на стационарных режимах подачи подвержены сравнительно интенсивным хаотическим инфранизкочастотным вариациям. Это непонятно с позиций традиционной модели горения в ЖРД, но согласуется с концепцией, изложенной в [3].

В настоящем сообщении[1] излагаются результаты аналогичного исследования, выполненного на модельном ЖРД схемы газ — жидкость с применением оптических средств идентификации реакционной зоны пламени. Чтобы обойти известное препятствие, связанное с непрозрачностью внутрикамерной среды при использовании углеродсодержащих топлив [5], опыты выполняли на топливе газообразный кислород — жидкий аммиак при комнатной исходной температуре горючего и окислителя.

[1] Работа завершена в 1972 г.