

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОЦЕССОВ НЕРАВНОВЕСНОСТИ
В ДОЗВУКОВОЙ И СВЕРХЗВУКОВОЙ ЧАСТЯХ СОПЛА
НА ВЕЛИЧИНУ ИНВЕРСИИ ЗАСЕЛЕННОСТЕЙ
ПРИ ТЕЧЕНИИ ГАЗОВОЙ СМЕСИ $\text{CO}_2 - \text{N} - \text{O}_2 - \text{H}_2\text{O}$

Б. В. Егоров, В. Н. Комаров

(Жуковский)

Проводится изучение процессов колебательной релаксации при течении в соплах газовой смеси CO_2 , N_2 , O_2 , H_2O . Исследуется влияние различных каналов колебательно-колебательного и колебательно-поступательного обмена между компонентами газовой смеси и обмена энергии молекул CO_2 внутри самих мод на величину инверсии заселенности. Отмечается важность учета процессов неравновесности в дозвуковой части сопла при расчете инверсии заселенности. Изучается воздействие наклонных ударных волн на характеристики потока в сверхзвуковой части сопла и на поведение инверсной заселенности.

При аэродинамических исследованиях для получения высоких температур газов используется сжигание всевозможных углеводородных топлив. Реакция горения приводит к образованию газа, состоящего из смеси молекул CO_2 , N_2 , O_2 , H_2O и др. Массовый состав этих составляющих смеси зависит от количества прореагировавшего горючего и полностью сгорания. Поскольку состав продуктов сгорания значительно отличается от состава воздуха, то необходимо учитывать это различие в термодинамических и переносных свойствах. Процесс горения приводит к значительному повышению температуры газа и возбуждению его колебательных степеней свободы.

В данной работе задача о невязком неравновесном течении газовой смеси в соплах решается в квазиодномерной постановке для различных конфигураций конфузорной и диффузорной частей. Используется система газодинамических и кинетических уравнений, учитывающих вклад переходов между высоковозбужденными колебательными уровнями различных мод CO_2 , N_2 , H_2O . Эти уравнения получены в работе [1].

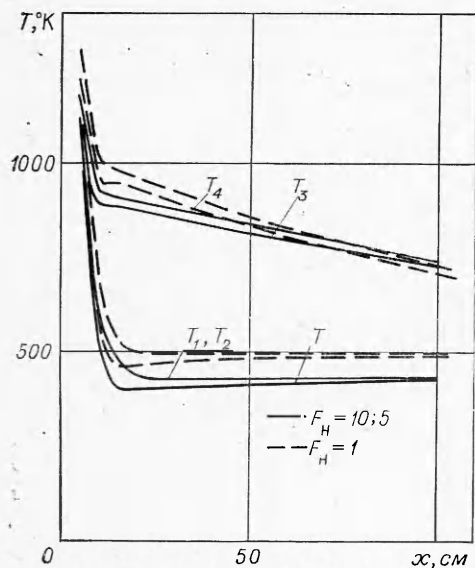
Рассмотрим сначала влияние учета процессов неравновесности в дозвуковой части сопла на газодинамические характеристики потока, величину инверсии и коэффициент усиления. Описанные в литературе схемы газодинамических сопел, в которых получают потоки с инверсной заселенностью, обладают различной конфигурацией конфузорных частей, среди которых можно выделить следующие основные типы: а) скругленные по радиусу; б) клиновидные; в) гиперболические.

На фиг. 1, 2 представлены распределения температур и коэффициента усиления для одного и того же сопла, но начало учета процессов неравновесной колебательной релаксации производится в различных сечениях дозвуковой части сопла. Расчет проводился для профилированного гиперболического сопла с минимальным радиусом $r_{\min} = 1$ см и при сле-

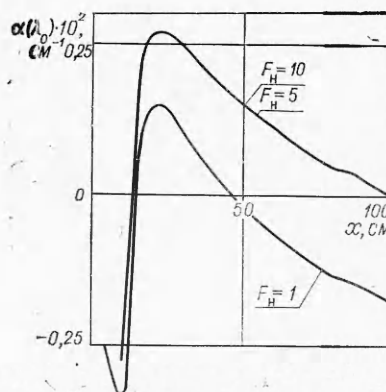
дующих начальных условиях: $P_0=15$ атм; $T_0=2000^\circ\text{K}$, а также $\alpha_{\text{CO}_2} = 0,1$; $\alpha_{\text{N}_2}=0,89$; $\alpha_{\text{H}_2\text{O}}=0,01$, где α_i — мольные доли.

Начиная с сечения в дозвуковой части, соответствующего отношению площадей $F/F_{\text{min}}=1; 5; 10$, счет производился с учетом неравновесности, до этого сечения поток считался равновесным. При этом оказалось, что в минимальном сечении сопла при учете неравновесного характера течения, начиная с сечений $F/F_{\text{min}}=5; 10$, в дозвуковой части отличие температур T_3, T_4 и T достигает следующих значений: $T_3 - T=6^\circ\text{K}$;

$T_4 - T=29^\circ\text{K}$. Такое небольшое отличие колебательных температур от поступательной температуры потока является следствием почти равновесно-



Фиг. 1



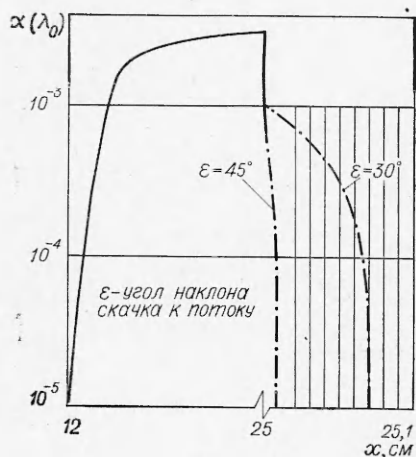
Фиг.

го характера течения. Тем не менее ввиду нелинейной зависимости инверсии заселенностей от величин колебательных температур полученные небольшие отличия температур T_3 и T_1 от их значений, вычисленных в предположении о равновесном характере течения в конфузурной части сопла, приводят в итоге к значительным расхождениям в величине инверсии. Отличие же вариантов счета при учете неравновесных свойств, начиная с сечений $F/F_{\text{min}}=5$ или $F/F_{\text{min}}=10$, незначительно (менее 1% для коэффициента усиления).

При учете неравновесности течения, начиная с минимального сечения сопла, поступательная температура газа оказывается выше, и вся картина расположения колебательных температур сдвигается вверх (см. фиг. 1). При этом в рабочей части сопла температуры T, T_1 и T_2 оказываются выше соответствующих температур, полученных в расчетах с учетом неравновесности в конфузурной части. Скорость релаксации третьей моды CO_2 и N_2 при этом также выше, что приводит к более интенсивному обмену между модами и к соответствующему падению инверсии заселенности вниз по потоку.

Отличие максимального значения коэффициента усиления при учете неравновесности в дозвуковой части сопла может достигать $\sim 40\%$ соответствующего значения при расчетах неравновесного течения, начиная с горла сопла (см. фиг. 2).

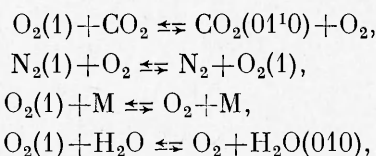
В связи с этим необходимо отметить, что те системы кинетических уравнений, которые учитывают возбуждение только нижних колебательных уровней молекул и в целом правильно передают характер физиче-



Фиг. 3

внутри сопла или возникновение прямого или косого скачка на выходе из сопла. Для случая профилированного сопла с $T_0=2000^\circ\text{K}$; $P_0=15$ атм; $r_{\min}=1$ см и $\alpha_{\text{CO}_2}=0,1$; $\alpha_{\text{N}_2}=0,89$; $\alpha_{\text{H}_2\text{O}}=0,01$ максимальная инверсия заселенностей достигается на расстоянии 25 см от минимального сечения сопла. Поступательная температура и плотность в этом сечении равны: $T=427^\circ\text{K}$, $\rho=2 \cdot 10^{-5}$ г/см³. На фиг. 3 представлено изменение коэффициента усиления в этом сечении при возникновении косого скачка уплотнения. Наличие скачка приводит к уменьшению коэффициента усиления. Это связано с тем, что коэффициент усиления за скачком слабо зависит от плотности и уменьшается за счет уменьшения инверсии в релаксационной зоне ударной волны.

Рассмотрим вопрос о влиянии молекулярного кислорода на термодинамические характеристики неравновесного потока. Предполагая, что в результате сгорания топлива образуется смесь молекул CO_2 , N_2 , O_2 , H_2O , в дополнение к схеме работы [2] рассмотрим следующие реакции, описывающие процессы колебательно-колебательного и колебательно-поступательного обмена O_2 с различными компонентами смеси:



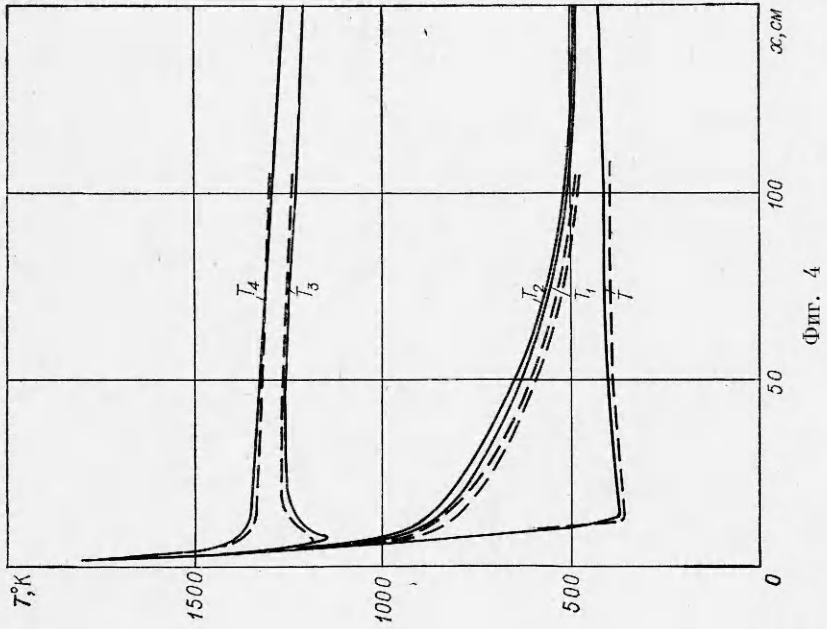
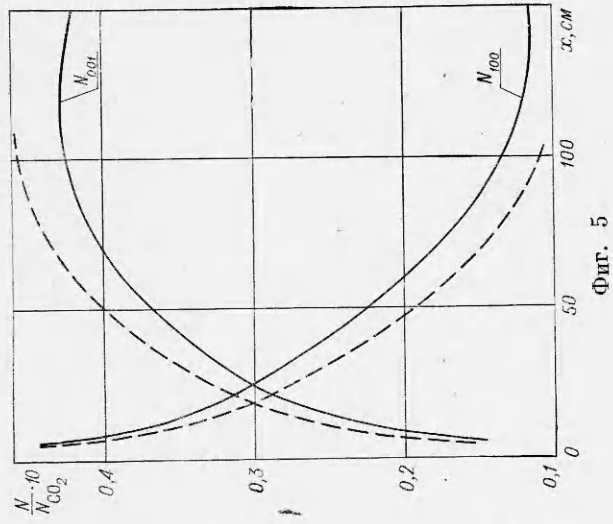
где M — любая из частиц CO_2 , N_2 , O_2 , H_2O .

С использованием работы [3], а также приведенной схемы реакций была написана система кинетических уравнений, которая решалась совместно с системой газодинамических уравнений. Ниже приводится кинетическое уравнение для кислорода в обозначениях работы [1]:

$$\begin{aligned} \frac{dy_5}{dx} = \frac{\rho}{um} \left\{ -(1-y_5) \sum_M \alpha_M W_{50}(M) [y_5 - \exp(-\Delta\varepsilon_{15}/kT)] - \right. \\ \left. - \frac{1-y_5}{1-y_2} \alpha_{\text{CO}_2} W_{52} [y_5 - y_2 \exp(-\Delta\varepsilon_{13}/kT)] + \right. \\ \left. + \frac{1-y_5}{1-y_4} \alpha_{\text{N}_2} W_{45} [y_4 - y_5 \exp(-\Delta\varepsilon_{14}/kT)] + \right. \end{aligned}$$

ских процессов при низких температурах, реализуемых в рабочей части сопла, перестают быть справедливыми при высоких температурах в дозвуковой и околозвуковой частях сопел. Хотя упрощенные кинетические уравнения и отражают характер поведения колебательных температур (отличие на несколько градусов или десятков градусов), но приводят к большим различиям в величине коэффициента усиления (на несколько десятков процентов) от соответствующего расчета с использованием более полной системы кинетических уравнений [1].

Если давление на выходе из сопла не соответствует расчетному, то возможно появление прямого скачка



Фиг. 5

Фиг. 4

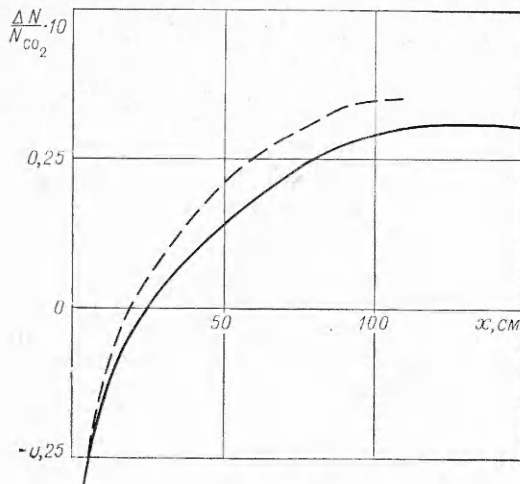
$$+ \frac{1-y_5}{1-y_6} \alpha_{\text{H}_2\text{O}} W_{65} [y_6 - y_5 \exp(-\Delta\varepsilon_{16}/kT)] \},$$

где $y_i = \exp(-h\nu_i/kT_i)$; $W_{kl} = P_{kl} Z_{\alpha\beta}$ — вероятность дезактивации или обмена энергией при одном соударении ($Z_{\alpha\beta}$ — частоты соударений); $\Delta\varepsilon_j$ — теплота j -й реакции; u — скорость; m — масса; ρ — плотность.

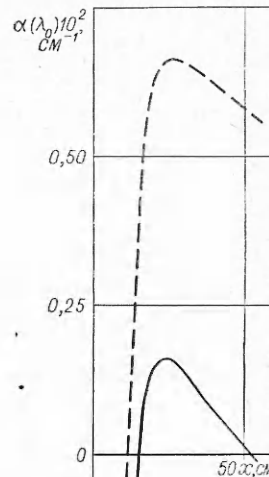
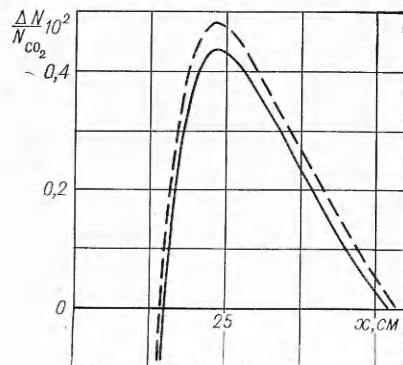
Вероятности процессов возбуждения и дезактивации колебательных уровней молекул CO_2 , N_2 , O_2 , H_2O брались из работ [2, 4, 5-7], в которых в основном приведены вероятности соответствующих процессов, полученные из экспериментальных работ. В качестве примера приводятся результаты расчетов для следующих начальных условий: $P_0 = 15$ атм; $T_0 = 2000^\circ\text{K}$ и двух составов смеси: 1) $\alpha_{\text{CO}_2} = 0,1$; $\alpha_{\text{N}_2} = 0,89$; $\alpha_{\text{H}_2\text{O}} = 0,01$; 2) $\alpha_{\text{CO}_2} = 0,1$; $\alpha_{\text{N}_2} = 0,69$; $\alpha_{\text{O}_2} = 0,2$; $\alpha_{\text{H}_2\text{O}} = 0,01$ для одного и того же сопла с $r_{\text{min}} = 0,1$ см, дозвуковой частью, имеющей гиперболический профиль с полууглом асимптотического конуса $\varphi_1 = 38^\circ$ и с профилированной диффузорной частью с отношением площадей на срезе сопла $F/F_{\text{min}} = 34$.

На фиг. 4 представлено распределение температур. Сплошной линией обозначены температуры для состава газа с добавлением 20% кислорода при соответствующем уменьшении доли азота, а штриховой — для состава без O_2 .

Можно отметить, что температуры T_3 и T_4 при наличии кислорода быстрее приближаются к поступательной температуре, а температуры



Фиг. 6



Фиг. 8

Фиг. 7

T , T_1 , T_2 выше своих значений в потоке без O_2 . Иначе говоря, наличие кислорода делает поток более равновесным.

Заселенности уровней (00^01) и (10^00) молекулы CO_2 для рассматриваемого случая приведены на фиг. 5. Здесь видна область с инверсной заселенностью, причем эта область меньше, если присутствует кислородная компонента. На фиг. 6 приведены соответствующие значения инверсии заселенностей, из которой можно заключить, что кислород в данном случае уменьшает максимальную величину инверсии примерно на 15%.

Вероятности дезактивации O_2 азотом и углекислым газом на 2—3 порядка меньше вероятностей обмена кислорода с CO_2 , N_2 , H_2O , поэтому в кинетическом уравнении для кислорода существенными оказываются лишь члены, учитывающие обмен энергией.

Необходимо отметить, что на поведение температур мод молекулы CO_2 и азота и на поведение поступательной температуры учет реакций обмена с кислородом практически не оказывает никакого влияния, поскольку в кинетических уравнениях преобладающими являются члены, описывающие релаксацию первой и второй мод CO_2 и комплексный обмен ($v_3 \rightarrow v_1, v_2$).

Для случая $r_{\min} = 1$ см и тех же начальных условий построены фиг. 7 и 8. Из фиг. 7, где приведены графики инверсии заселенностей, следует, что учет обменных реакций приводит к завышению максимума инверсии на 10%.

Отмечается важность реакции обмена асимметричной моды молекулы CO_2 с симметричной и деформационной модами для смеси, содержащей кислород, на величину коэффициента усиления слабого сигнала α (λ_0), выражение для которого бралось из работы [8]. Из фиг. 8 следует, что без учета этой реакции максимальное значение коэффициента усиления оказывается завышенным примерно в 4 раза.

В заключение авторы приносят благодарность Г. Н. Саяпину за предоставленные результаты по влиянию ударных волн на термодинамические характеристики неравновесного потока.

Поступила 13 IX 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. Егоров Б. В., Комаров В. Н. Исследование неравновесного течения релаксирующей смеси газов CO_2 , N_2 , H_2O . — В кн.: Численные методы механики сплошной среды. Т. 4, № 3. Новосибирск, 1973.
2. Генералов Н. А., Козлов Г. И., Селезнева Н. К. Об инверсной заселенности молекул CO_2 в расширяющихся потоках газа. — ПМТФ, 1974, № 5, с. 27.
3. Бирюков А. С., Гордпец Б. Ф. Кинетические уравнения релаксации колебательной энергии в смеси многоатомных молекул. Препринт ФИАН СССР, № 32, 1972.
4. Taylor R. L., Bitterman S. Survey of Vibrational Relaxation Data for Processes Important in CO_2-N_2 Laser System. — «Rev. of Mod. Phys.», 1969, v. 41, N 1, p. 26.
5. Bass H. E. Vibrational Relaxation in CO_2/O_2 Mixtures. — «Chem. Phys.», 1973, v. 58, N 11.
6. Гордпец Б. Ф., Мамедов И. С., Осипов А. И., Шелепин Л. А. О распределении колебательной энергии в газовых смесях. Препринт ФИАН СССР, № 31, 1972.
7. Gilmore F. R., Bauer E., McGowan J. W. A Review of Atomic and Molecular Excitation Mechanisms in Nonequilibrium Gases up to 20000°K. — JQSRT, 1969, v. 9, N 2, p. 157.
8. Лосев С. А., Макаров В. Н., Павлов В. А., Шаталов О. П. Исследование процессов в газодинамическом лазере на ударной трубе большого диаметра. — ФТВ, 1973, т. 9, № 4, с. 463.