

6. Г. Г. Копылов, Г. М. Махвиладзе. ФГВ, 1985, 24, 1, 27.
7. Г. Г. Копылов, Г. М. Махвиладзе, О. Н. Мелихов и др. Препринт ИПМ АН СССР, № 237. М., 1984.
8. Г. М. Махвиладзе, С. Б. Щербак. Препринт ИПМ АН СССР, № 113. М., 1978.
9. Г. М. Махвиладзе, С. Б. Щербак. ИФЖ, 1980, 38, 3, 528.
10. В. С. Бабкин, А. В. Вьюн.— В кн.: Горение и взрыв. М.: Наука, 1972.
11. В. Н. Кривулин, Л. А. Ловачев, Е. А. Кудрявцев и др. ФГВ, 1975, 11, 6, 890.
12. Ю. П. Глаголева, В. А. Жмайло, В. Д. Мальшакова и др.— В кн.: Численные методы механики сплошной среды. Т. 5, № 1. Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1974.
13. В. А. Андрущенко, Х. С. Кестенбойм, Л. А. Чудов. Изв. АН СССР. МЖГ, 1981, 6, 144.
14. В. С. Бабкин, В. В. Замашников, А. М. Бадалян и др. ФГВ, 1982, 18, 2, 44.
15. Я. Б. Зельдович, Г. Н. Баренблатт, В. Б. Либрович и др. Математическая теория горения и взрыва. М.: Наука, 1980.
16. Э. А. Штессель, А. Н. Баратов, В. Н. Кривулин и др.— В кн.: Семинар Механика и физика плазмы и газовых потоков. Тезисы докладов. М.: ИПМ АН СССР, 1981.
17. Э. А. Штессель, В. Н. Кривулин, Е. М. Кудрявцев и др. Хим. физика, 1986, 5, 1, 129.
18. L. A. Lovachev. Comb. Sci. Techn., 1979, 20, 5, 6, 209.

Поступила в редакцию 24/II 1986

ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССОВ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ НА УСИЛЕНИЕ В ИНВЕРСНЫХ N₂O-ПОТОКАХ

*Ю. И. Гринь, Ю. Б. Конев, С. И. Крючков, Н. Н. Кудрявцев,
И. Н. Ораевский, В. Г. Тестов, А. Н. Хмелевский*

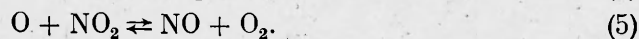
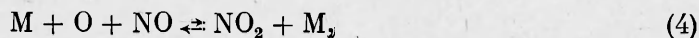
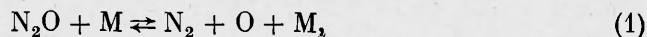
(Москва)

Исследования N₂O-ГДЛ с тепловой накачкой показали, что по сравнению с CO₂-смесями та же инверсная населенность реализуется при более низких температурах [1, 2]. Однако повышение температуры смеси, обеспечивающее увеличение запасаемой колебательной энергии, ограничено химическими превращениями, которые уменьшают концентрацию рабочих молекул при более низких температурах, чем в CO₂-ГДЛ. Поэтому повышение характеристик N₂O-лазера требует исследования особенностей кинетики химических реакций, определяемой составом смеси и температурой нагрева.

В зависимости от вида молекулы (N₂, CO), используемой в качестве резервуара колебательной энергии, и неконтролируемых примесей (H₂, H₂O) химические превращения N₂O протекают по существенно различным направлениям. При этом и начальные температуры иницирования реакций также значительно отличаются. В настоящей работе изучались изменения химического состава в смесях N₂O + N₂ + He, N₂O + CO + He и усилительных свойств, а также взаимное влияние молекул N₂O и CO₂ на инверсную населенность этих молекул. В расчетах и экспериментах анализировались составы, приведенные в таблице.

Смесь	N ₂ O	N ₂	CO ₂	CO	He	H ₂
1	0,1	0,2	—	—	0,7	—
2	0,095	0,19	—	0,048	0,667	—
2'	0,095	0,19	—	0,048	0,667	6,5·10 ⁻⁵
3	0,1	—	—	0,2	0,7	—
3'	0,1	—	—	0,2	0,7	2,6·10 ⁻⁴
4	—	0,1	0,1	0,1	0,7	—
5	0,075	0,225	—	—	0,7	—
6	0,15	0,15	—	—	0,7	—
7	0,075	0,15	0,075	—	0,7	—
8	—	0,2	0,1	—	0,7	—

При определении изменения химического состава смеси $N_2O + N_2 + He$ рассматривались следующие элементарные стадии:



Результаты расчетов состава и температуры показывают, что если при $T_0 = 1300$ К разложение N_2O практически отсутствует, то с увеличением T_0 до 1400 К по истечении $2 \cdot 10^{-3}$ с наступает быстрая диссоциация N_2O и через $3 \cdot 10^{-3}$ с концентрация N_2O уменьшается на порядок. Для $T_0 = 1600$ К то же самое происходит уже через $3,75 \cdot 10^{-4}$ с (рис. 1).

При протекании химических превращений температура растет и можно выделить три характерные стадии (см. рис. 1):

— интервал времени $0 - t_1$ определяет задержку времени воспламенения и повышение температуры составляет $\Delta T = 2RT^2/E_a$ (энергия активации $E_a \approx 58$ ккал/моль);

— стадия $t_1 - t_2$ характеризует время, в течение которого воспламеняется смесь;

— при $t > t_2$ происходит догорание.

Видно, что стадия воспламенения характеризуется максимальной скоростью нарастания температуры. На рис. 2 представлены результаты расчетов времен задержки воспламенения τ_k (рис. 2, кривая 1) и диссоциации τ_d (кривая 2).

Расчет изменения параметров струйного течения с учетом химической кинетики показывает, что колебательные температуры T_3 и T_4 возрастают со временем, а коэффициент усиления после достижения максимального значения начинает уменьшаться. Так, если для параметров торможения $T_0 = 1400$ К, $p_0 = 0,81$ МПа спад в усилении наступает спустя $2 \cdot 10^{-3}$ с, то при повышении температуры торможения до 1500 К ($p_0 = 0,91$ МПа) снижение наступает существенно раньше ($5 \cdot 10^{-4}$ с), при этом в области спада усиления продолжается рост колебательных температур T_3 и T_4 .

Исследование процессов воспламенения и диссоциации проводилось по измерениям перед соплом и за его срезом (рис. 3).

Перед критическим сечением на расстоянии $1,0 \cdot 10^{-2}$ м от торца ударной трубы измерялись поглощение зондирующего N_2O -лазера, спонтанное излучение на длине волны 4,5 мкм (переход $00^1 - 00^0$ молекулы N_2O) при полосе пропускания фильтра 0,26 мкм и давлении. Одновременно регистрировалось изменение давления и на торце. За срезом сопла концентрация молекул N_2O контролировалась по изменению усиления зондирующего лазера.

Рис. 4, б — г иллюстрирует характер изменения поглощения и спонтанного излучения (рис. 4, д, е) в зависимости от интенсивности УВ. Регистрация давления (рис. 4, а, д, е) показала, что в интервале времени между приходом фронта отраженной УВ (О) и волны сжатия (К), возникающей при взаимодействии отраженной волны с контактной поверх-

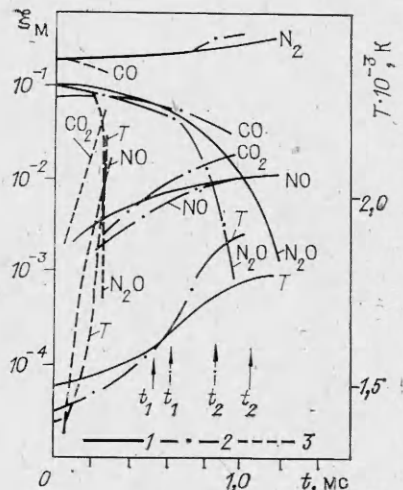


Рис. 1. Расчет состава и температуры смесей. 1 — смесь 1, $p_0 = 0,94$ МПа, $T_0 = 1520$ К; 2 — смесь 2, $p_0 = 0,84$ МПа, $T_0 = 1450$ К; 3 — смесь 3, $p_0 = 0,78$ МПа, $T_0 = 1400$ К.

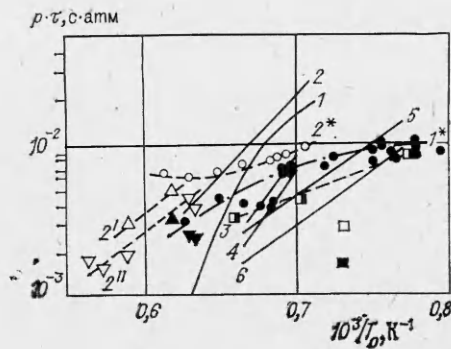


Рис. 2. Изменение времени воспламенения τ_i и диссоциации τ_d .

Смесь 1. τ_i : 1 — расчет, эксперимент: ● — усиление (1^*), ▽, ▲ — поглощение и спонтанное излучение в отраженной ударной волне соответственно; τ_d : 2 — расчет, эксперимент: ○ — усиление (2^*), ▽, △ — поглощение ($2'$) и спонтанное излучение ($2''$) в отраженной ударной волне. Смесь 2. Расчет: 3 — τ_d (эксперимент по усилению); 4 — τ_i ; Смесь 2'. Расчет: 5 — τ_d , 6 — τ_i . Смесь 3: □ — τ_d (эксперимент по усилению). Смесь 3': ■ — τ_d (расчет).

ностью, имеет место характерный скачок (Н) давления, величина которого возрастает с повышением интенсивности УВ. Аналогичное снижение давления наблюдалось и при исследовании в воздухе [3, 4]. Как видно, изменения давления не отражаются на поведении поглощения (см. рис. 4, б, где приведен и опорный сигнал зондирующего лазера). С увеличением параметров торможения сокращается длительность сигнала поглощения (см. рис. 4, в, г). Если при $u_1 = 1,6 \cdot 10^3$ м/с ($T_0 = 1580$ К) имелся участок, на котором поглощение было постоянно и он отождествлялся с временем задержки воспламенения, то при $u_1 = 1,7 \cdot 10^3$ м/с ($T_0 = 1750$ К) за отраженной УВ смесь была воспламененной. Отсутствие поглощения принималось за полное разложение закиси азота. За срезом сопла длительность сигнала излучения также сокращалась с увеличением скорости УВ.

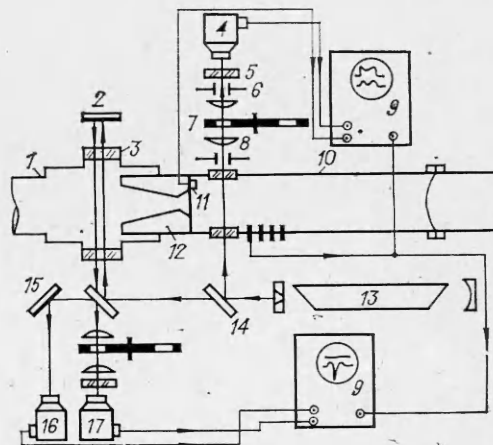
В отсутствие разложения закиси азота характер поведения спонтанного излучения хорошо коррелирует с поведением давления (см. рис. 4, д). С увеличением интенсивности УВ длительность сигнала излучения сокращалась (см. рис. 4, е).

Времена задержки воспламенения и диссоциации, измеренные по длительности сигнала усиления, совпадают с расчетом при $T_0 = 1500 \pm 50$ К. В области более высоких температур экспериментальные значения выше расчетных, а при меньших — наоборот. Это обусловлено соответственно изменением параметров на нестационарной стадии истечения струи и на торце трубы. Измерения времен задержки воспламенения и диссоциации при $T_0 > 1500$ К по поглощению и спонтанному излучению показали, что они тоже больше расчетных. Отметим, что результаты измерений по поглощению лучше совпадают с расчетом.

Возможность создания с помощью ударной трубы одинаковых параметров торможения в смесях $N_2O + N_2 + He$ и $N_2O + CO + He$ позволяет провести сравнение эффективности молекул N_2 и CO в возбуждении уровня 00^0_1 N_2O . Время перехода газа из области возбуждения при

Рис. 3. Схема экспериментальных измерений.

1 — демферный объем; 2 — отражающее зеркало; 3 — окно; 4 — фотоприемник сигнала поглощения или спонтанного излучения; 5 — фильтр; 6 — диафрагма; 7 — модулятор; 8 — линза; 9 — осциллограф; 10 — ударная труба; 11 — датчик давления; 12 — сопло; 13 — зондирующий лазер; 14 — полупрозрачное зеркало; 15 — поворотное зеркало; 16 — фотоприемник контроля; 17 — фотоприемник усиления.



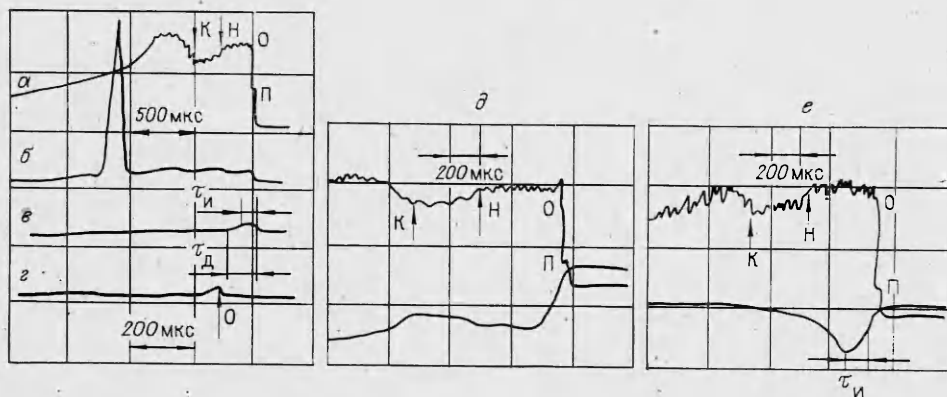
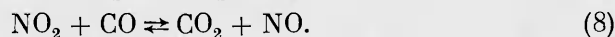
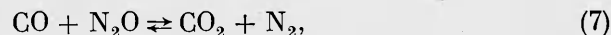
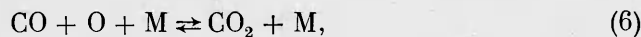


Рис. 4. Характер изменения давления, поглощения и спонтанного излучения.
 а) давление, $u_1=1,51 \cdot 10^3$ м/с, $T_0=1450$ К, $p_0=0,84$ МПа. Поглощение ($\lambda=10,9$ мкм): б) $u_1=1,51 \cdot 10^3$ м/с, $T_0=1450$ К, $p_0=0,84$ МПа; в) $u_1=1,6 \cdot 10^3$ м/с, $T_0=1580$ К, $p_0=0,99$ МПа; г) $u_1=1,7 \cdot 10^3$ м/с, $T_0=1750$ К, $p_0=1,17$ МПа. Спонтанное излучение и давление: д) $u_1=1,53 \cdot 10^3$ м/с, $T_0=1480$ К, $p_0=0,87$ МПа; е) $u_1=1,67 \cdot 10^3$ м/с, $T_0=1700$ К, $p_0=1,12$ МПа.

нагреве за отраженной УВ в область сверхзвукового расширяющегося потока, где проводятся измерения, составляет десятки микросекунд, поэтому потери колебательной энергии на уровне $\nu=1$ (СО), имеющем излучательное время жизни $3,3 \cdot 10^{-2}$ с, за счет спонтанного излучения будут несущественны. В отличие от смеси $N_2O + N_2$ в $N_2O + CO$ процессы химических превращений более многообразны. В дополнение к реакциям (1)–(5) учитывались следующие [5]:



Анализ химических превращений при замене в смеси 10% $N_2O + 20\% N_2 + 70\% He$ примерно 5% N_2 на СО показывает, что увеличение температуры торможения от 1350 до 1520 К сопровождается быстрым падением концентрации молекул N_2O и ростом $[CO_2]$ (см. рис. 1).

Возможность наличия в газовой смеси двух активных лазерных молекул (N_2O и CO_2) обусловила необходимость проведения измерений усиления соответственно на 10,9 и 10,6 мкм. С этой целью зондирование струи проводилось излучением N_2O - и CO_2 -лазеров. Исследование характера зависимости коэффициента усиления ($\lambda=10,9$ мкм) от температуры и давления торможения (рис. 5, а) показывает, что максимальное усиление, реализующееся при $T_0=1230$ К, сменяется плавным спадом. Расчетная концентрация CO_2 в условиях максимального усиления на 10,9 мкм для момента $t \approx 10^{-3}$ с составляет доли процента. При увеличении $[CO]$ до 20% уже при $T_0=1400$ К и $p_0=0,78$ МПа по простейшей $\sim 2,5 \cdot 10^{-4}$ с величина $[N_2O]$ падает более чем на порядок, а $[CO_2]$ и $[N_2]$ достигает $\sim 7\%$. При этом температура возрастает на 800 К, а содержание NO увеличивается на два порядка. Экспериментальные измерения даже при $T_0=1000$ К указывают на наличие усиления на 10,6 мкм, что свидетельствует об образовании молекул CO_2 .

Уменьшение $[N_2O]$ и ускорение релаксации верхнего лазерного уровня $00^0_1 N_2O$ при наличии CO_2 обуславливает наступление спада в инверсии N_2O при столь невысоких температурах. Действительно, измерения в смеси 7 показали, что усиление существенно меньше, чем в смесях 5 и 6 (рис. 5, б). Плавный спад усиления с ростом температуры за экстремальной точкой указывает на отсутствие взрывного разложения N_2O . Измерения коэффициента усиления на длине волны 10,9 мкм для $0,05N_2O + 0,25CO + 0,7He$ и $0,15N_2O + 0,15CO + 0,7He$ показали, что в смеси 3 усиление больше. Анализом временного поведения усиления на N_2O установлено, что с увеличением содержания СО интервал времени, в те-

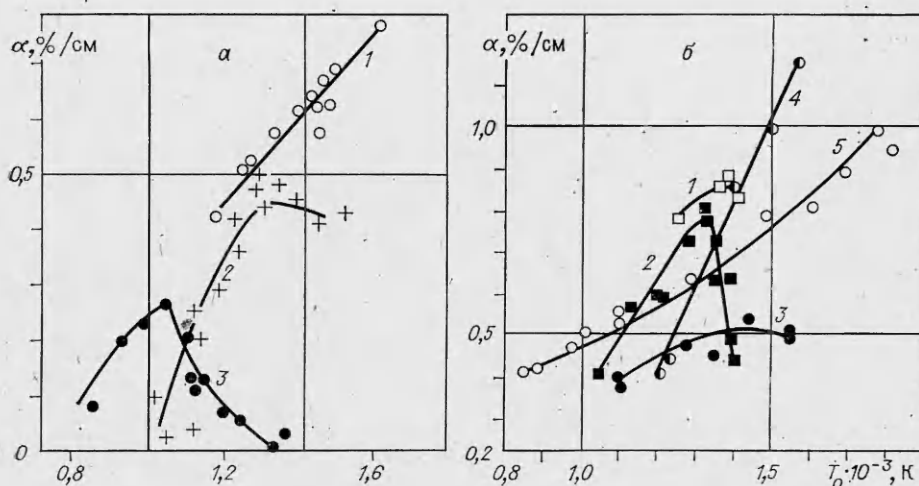


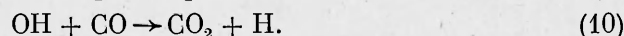
Рис. 5. Изменение усиления.
 а) смесь 3; λ , мкм: 2 — 10,6; 3 — 10,9; 1 — смесь 4 (10,6); б) смеси 5 (1), 6 (2), 7 (3, 4) и 8 (5); λ , мкм: 1—3 — 10,9; 4, 5 — 10,6.

чение которого усиление постоянно, сокращается за счет изменения состава смеси во времени (см. рис. 1).

Усиление на длине волны 10,6 мкм быстро нарастает с повышением температуры (см. рис. 5, а). В смеси сравнения 4, моделирующей состав продуктов реакции смеси 3, оно несколько выше. Поскольку в реагирующей смеси $[\text{CO}_2]$ меньше, то почти равное усиление определяется эффектом сверхравновесной накачки.

Аналогичные измерения в составе 7 показали, что при $T_0 > 1250$ К $\alpha_{10,6} > \alpha_{10,9}$ (см. рис. 5, б). С повышением температуры инверсная населенность уровня 00^0_1 молекул CO_2 в реагирующей смеси существенно выше, чем в нереагирующей, что обусловлено сверхравновесной накачкой [6].

Анализ смесей с CO также указывает на наличие трех стадий в поведении температуры (см. рис. 1). Увеличение $[\text{CO}]$ приводит к сокращению времен развития этих стадий. Неконтролируемые примеси (H_2 , H_2O), которые имеются в газовых баллонах, могут вносить существенный вклад в ускорение процесса химического превращения N_2O [5]. При этом эффективность реакций обмена (7) и рекомбинации (6) в 5 и 20 раз ниже, чем химических реакций



Даже малое содержание H_2 (10^{-4}) приводит к сокращению времени задержки воспламенения за счет цепного механизма реакций. Достаточно низкие коэффициенты усиления (10,9 мкм) в смесях с CO позволили измерить только времена диссоциации (см. рис. 2).

Исследования поведения поглощения (10,9 мкм) перед соплом в смеси 3 показали, что с ростом скорости УВ от 1,5 до $1,8 \cdot 10^3$ м/с ($T_0 = 1400 \div 2000$ К) амплитуда сигнала поглощения падает. Наличие большого поглощения при $T_0 \geq 1300$ К указывает на значительное содержание молекулы N_2O . Следовательно, спад в усилении на 10,9 мкм с ростом температуры объясняется также уменьшением времени релаксации верхнего лазерного уровня (00^0_1) молекулы N_2O . Поведение спонтанного излучения до $T_0 < 2000$ К полностью коррелировалось с давлением. При дальнейшем росте интенсивности УВ сразу же за фронтом отраженной УВ давление падает, а спонтанное излучение некоторое время остается все же неизменным. В этом случае спонтанное излучение обусловлено свечением CO_2 в крыльях линии.

Таким образом, результаты исследований показали, что химические превращения в смеси $N_2O + CO + He$ протекают при более низкой температуре, чем в $N_2O + N_2 + He$, и снижают инверсную населенность за счет как уменьшения N_2O , так и роста скорости колебательной релаксации верхнего лазерного уровня 00^0_1 (N_2O) молекулами CO_2 . При этом для молекул CO_2 может реализовываться сверхравновесная накачка, существенно увеличивающая инверсную населенность уровня 00^0_1 .

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. И. Гринь, В. Г. Тестов. Препринт ИРЭ АН СССР, № 16(196), 1975.
2. В. Г. Тестов, Ю. И. Гринь, В. В. Голуб и др. ЖЭТФ, 1976, 71, 1, 88.
3. А. С. Бирюков, А. Ю. Волков, А. И. Демин и др. ЖЭТФ, 1975, 68, 5, 1664.
4. J. A. Corper. AIAA, 1964, 2, 9, 1669.
5. M. G. Dunn. AIAA, 1969, 7, 8, 1553.
6. С. И. Крючков, Н. Н. Кудрявцев, С. С. Новиков. ФГВ, 1985, 21, 3, 60.
7. Н. Н. Кудрявцев, С. С. Новиков, В. И. Щеглов. Докл. АН СССР, 1985, 282, 2, 379.

Поступила в редакцию 27/III 1986,
после доработки — 26/IX 1986

РАСЧЕТ ТУРБУЛЕНТНЫХ ДИФФУЗИОННЫХ ПЛАМЕН ПРИ НАЛИЧИИ ВНЕШНЕГО ГРАДИЕНТА ДАВЛЕНИЯ

В. К. Баев, М. А. Гороховский, И. Г. Шпильберг
(Новосибирск, Алма-Ата)

Градиент давления, возникающий из-за тепловыделения в зоне горения, а также гравитационные эффекты приводят к появлению дополнительных потоков скалярных величин в турбулентных пламенах. В работе на основе двухмоментной модели замыкания строится схема расчета турбулентных диффузионных факелов при наличии фиксированного градиента среднего давления и проводится численное моделирование скалярных величин, связанных с тепловыделением и большими флуктуациями плотности.

Постановка задачи и термохимическая модель

Из сопла диаметром d со скоростью U_0 вытекает струя топлива и распространяется в сопутствующем потоке окислителя. Скорость сопутствующего потока формируется таким образом, чтобы в поле течения поддерживался постоянный положительный или отрицательный градиент давления.

Считается, что в системе с бесконечно большой скоростью происходит одноступенчатая необратимая химическая реакция, молекулярный процесс описывается единственным коэффициентом диффузии и число Льюиса $Le = 1$. В этом случае термохимическое состояние газовой смеси полностью описывается одним консервативным скаляром ξ , а плотность ρ , температура T и массовые доли компонентов выражаются через ξ простыми соотношениями [1].

Приведем выражение для равновесной плотности ρ^e , которое будет использовано в дальнейшем:

$$\xi > \xi_s: \rho^e = \frac{\rho c_p}{R [c_{p\infty} T_\infty + Q_T Y_b \xi_s + \xi (c_{pF} T_0 - c_{p\infty} T_\infty - Q_T Y_b \xi_s)]}, \quad (1a)$$

$$\xi \leq \xi_s: \rho^e = \frac{\rho c_p}{R [c_{p\infty} T_\infty + \xi (c_{pF} T_0 - c_{p\infty} T_\infty + Q_T Y_b (1 - \xi_s))]}, \quad (1b)$$

$$c_p = R\gamma/(\gamma - 1), \quad Y_b = Y_F + Y_\infty/r,$$

где ξ_s — стехиометрическое значение пассивного скаляра; c_{pF} , T_0 , Y_F — теплоемкость при постоянном давлении p , температура и массовая доля