

ИНВЕРСНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КИСЛОРОДНО-ЙОДНОЙ СРЕДЫ В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ С БОКОВЫМ ВДУВОМ

А.Н. Дворянкин, Ю.А. Кулагин

Рассмотрена кинетика химических и релаксационных процессов при смешении синглетного кислорода и молекулярного йода в плоском сопле. Показано, что боковой щелевой вдув не обеспечивает равномерного поля коэффициента усиления по сечению сопла. Рекомендовано использовать вдув через отверстия, расположенные в шахматном порядке на стенках соплового блока.

Способ получения инверсной населенности на атомарном йоде в кислородно-йодной среде основан на быстрой резонансной передаче энергии от $O_2(a^1\Delta_g)$ атомарному йоду. Генерация происходит на переходе $I^*(^2P_{1/2}) \rightarrow I(^2P_{3/2})$ (длина волны $\lambda = 1,315$ мкм). Наиболее перспективным способом получения синглетного кислорода является химический способ, при котором в реакции взаимодействия газообразного хлора с щелочным раствором перекиси водорода происходит наработка $O_2(a)$. Однако на выходе такого генератора в потоке возбужденного кислорода неизбежно присутствуют примеси H_2O, Cl_2 , которые существенно влияют на кинетику процессов. Таким образом, для получения инверсии на атомарном йоде надо создать поток $O_2(a)$ и подмешать к нему молекулярный йод, который при взаимодействии с возбужденными молекулами кислорода диссоциирует; затем атомы йода излучают, получая энергию от $O_2(a)$ /1, 2/. Характеристики активной среды будут определяться кинетикой химических и релаксационных процессов при смешении возбужденного кислорода и йода.

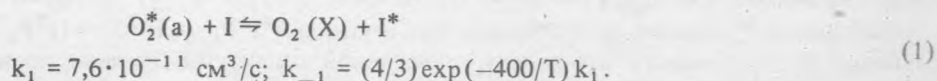
Целью настоящей работы явилось исследование кинетических процессов при двухмерном перемешивании $O_2 - I_2$ в плоском сопле при боковом вдуве через плоскую щель в стенке сопла (рис. 1). Именно по такой схеме с дозвуковой прокачкой работают реализованные в настоящее время кислородно-йодные системы. При этом используются различные системы вдува йода через боковые стенки или центральное тело.

Процесс смешения вязких теплопроводных газов в сопле описывается системой уравнений Навье – Стокса. Однако использование полной системы уравнений необходимо лишь для расчета областей сильного вязко-невязкого взаимодействия с отрывом потока /3, 4/. При наличии выделенного направления в потоке возможно использование параболического приближения, которое с достаточной точностью описывает процесс смешения. Для данной задачи, когда поперечные размеры канала H существенно меньше продольных L ($H \ll L$), расход и импульс вдуваемого потока $I_2 - Ar(He)$ существенно меньше соответствующих параметров основного потока, можно воспользоваться приближением пограничного слоя.

Поток F_1 из генератора возбужденного кислорода, имеющий температуру T_1 , давление p_1 и скорость v_1 и содержащий $O_2(X) - O_2^*(a) - O_2^{**}(b) - H_2O - Cl_2$, течет по плоскому каналу высотой $H = 5$ мм. На расстоянии L_1 (рис. 1) через плоскую щель шириной $h = 0,5$ мм происходит вдув потока F_2 , содержащего $I_2 - Ar$ и имеющего температуру T_2 , давление p_2 и скорость v_2 . Температура стенок считается постоянной и равной 290 К.

Для правильного решения задачи двухмерного смешения, определения полей концентраций и показателя усиления α необходимо знание скоростей химических и релаксационных процессов в кислородно-йодной среде /5, 6/, подробный анализ которых был сделан в /7, 8/.

Основным процессом, ответственным за накачку атомарного йода, является близкорезонансный обмен энергией



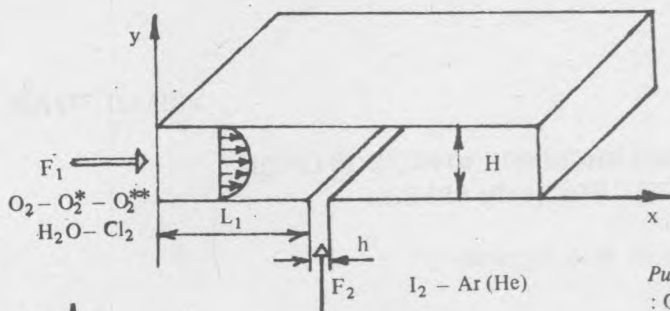


Рис. 1. Схема соплового блока. Состав потока F_1 $O_2(x)$: $O_2^*(a) : H_2O : Cl_2 = 1 : 1 : 10^{-2} : 10^{-3}$.

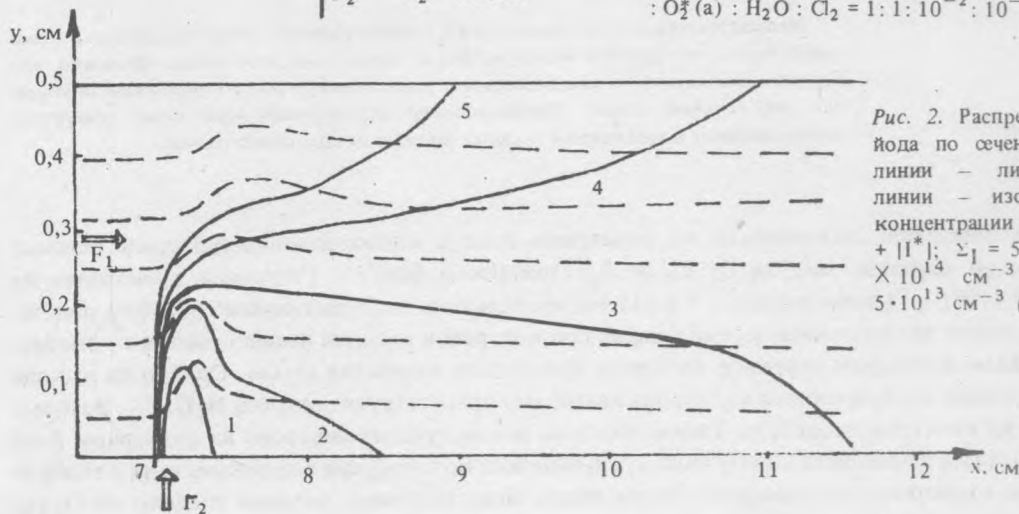
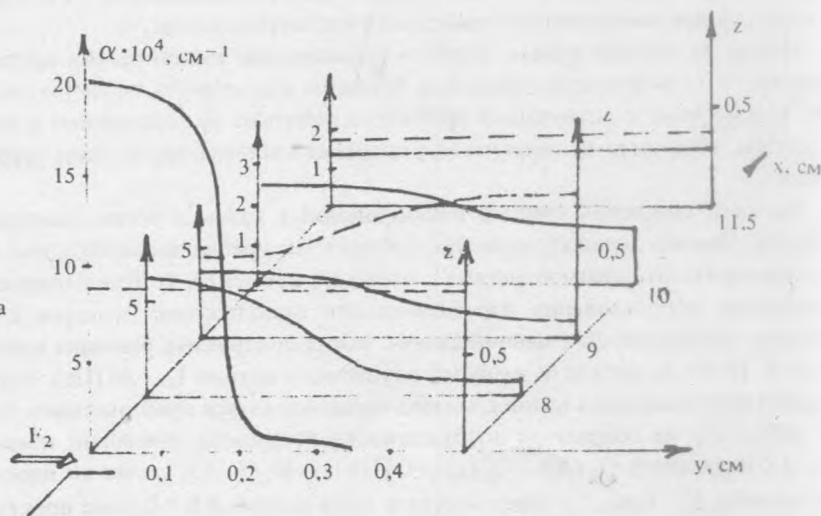


Рис. 2. Распределение концентрации йода по сечению сопла. Штриховые линии — линии тока, сплошные линии — изолинии суммарной концентрации йода $\Sigma I = 2|I_2| + |I| + |I^*|$; $\Sigma I = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ (1), $2,5 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ (2), 10^{14} см^{-3} (3), $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ (4), $2,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ (5).

Рис. 3. Распределение коэффициента усиления α и отношения $z = O_2(a) / O_2(x)$ по сечениям сопла.



Учитывались также процессы суммирования энергии возбуждения (пулинга) при столкновении молекул $O_2(a)$ между собой и с возбужденным йодом $I^*(^2P_{1/2})$ и процессы тушения электронно-возбужденных частиц $O_2(a)$, $O_2(b)$ и $I^*(^2P_{1/2})$ при столкновениях с $O_2(x)$, Ar, H_2O , Cl_2 , I_2 , I.

Диссоциация молекулярного йода может происходить при столкновениях с $O_2(b)$. Однако в основном диссоциация происходит через промежуточные электронные и колебательные состояния молекулы I_2 , возбужденные при столкновениях с $O_2(a)$ и $I^*(^2P_{1/2})$. Всего кинетическая модель учитывает 30 элементарных процессов, в которых участвуют $O_2(x, a, b)$, $I(^2P_{3/2}, ^2P_{1/2})$, I_2 , Ar, H_2O , Cl_2 /8/.

Коэффициент усиления рассчитывался для перехода $I^*(^2P_{1/2}; F=3) \rightarrow I(^2P_{3/2}, F=4)$ в предположении равновесной заселенности компонент сверхтонкой структуры. Расчеты производились для различных

значений параметров смешивающихся потоков. Результаты одного из вариантов расчета представлены на рис. 2, 3. Параметры потоков: $v_1 = 40$ м/с, $p_1 = 2$ торр, $T_1 = 270$ К; $v_2 = 40$ м/с, $p_2 = 2$ торр, $T_2 = 330$ К, отношение концентраций возбужденного кислорода и невозбужденного $z = [O_2^*(a)]/[O_2(X)] = 1$ в потоке F_1 и расход впрыснутого йода $2[I_2]/([O_2^*(a)] + [O_2(X)]) = 2 \cdot 10^{-3}$ выбраны близкими к соответствующим значениям экспериментальных установок.

На рис. 2 сплошной чертой изображены изолинии суммарной концентрации йода $\Sigma I = 2[I_2] + [I^*] + [I]$, штриховыми линиями изображены линии тока. Можно выделить два механизма смешения. Вблизи области вдува (она изображена в более крупном масштабе по оси x) проникновение йода в основной поток происходит за счет отжимания потока F_1 вдуваемым. Ниже по потоку формируется возвратное течение, прижимающее вдуваемый поток к нижней стенке. Дальнейшее смешение происходит за счет взаимной диффузии компонент основного и впрыснутого потоков. Выравнивание концентраций йода в вертикальном сечении происходит на расстоянии $L = 4,5$ см от места вдува, что совпадает с грубой оценкой длины смешения $L \cong v(H-l)^2/D_y = 3,5$ см, где $v = 60$ м/с – средняя скорость потока после вдува, $H = 0,5$ см – высота канала, $l = 0,2$ см – глубина проникновения впрыснутого потока, $D_y = 160$ см²/с – коэффициент диффузии йода. На рис. 3 штриховыми линиями изображены профили $z = [O_2^*(a)]/[O_2(X)]$, сплошными – профили коэффициента усиления в пяти сечениях. Масштаб по оси α в последних двух сечениях увеличен.

В области вдува коэффициент усиления достигает значительной величины $\alpha = 2 \cdot 10^{-3}$ см⁻¹, что связано с большим значением z и высокой концентрацией йода. Ниже по потоку коэффициент усиления быстро падает в связи с диффузией йода и уменьшением z в области с большой концентрацией йода. Профили α и z становятся однородными на расстоянии $L = 4,5$ см от линии вдува, при этом значение z уменьшается от 0,88 в области вдува до 0,35, а значение коэффициента усиления падает на порядок до $\alpha = 1,5 \times 10^{-4}$ см⁻¹.

Таким образом, при вдуве йода происходит его быстрая диссоциация и коэффициент усиления в области вдува имеет максимальное значение. Однако область инверсии ограничена глубиной проникновения вдуваемого потока в основной. Выравнивание коэффициента усиления по сечению происходит на расстоянии 4 см от места вдува, однако его величина при этом падает более чем на порядок. Это говорит о необходимости оптимизировать смешение, используя вдув спутных потоков или боковой вдув через отверстия в боковых стенках сопла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дидюков А.И. и др. Квантовая электроника, 9, 645 (1982).
2. Дидюков А.И. и др. Труды ФИАН, 144, 67 (1984).
3. Ковеля В.М., Яненко Н.М. Метод расширения в задачах газовой динамики. Новосибирск, Наука, 1981.
4. Баяев В.К. и др. Горение в сверхзвуковом потоке. Новосибирск, Наука, 1984.
5. Дидюков А.И. и др. Квантовая электроника, 9, 731 (1982).
6. Дидюков А.И. и др. Препринт ФИАН № 238, М., 1982.
7. Дидюков А.И. и др. Препринт ФИАН № 9, М., 1986.
8. Дидюков А.И., Кулагин Ю.А. Квантовая электроника, 16, 816 (1989).

Поступила в редакцию 7 августа 1989 г.