

УДК 533.6.011.8:536.46

© 1997 г. А.П. НЕФЕДОВ, Б.В. РОГОВ, В.А. СИНЕЛЬЩИКОВ

## НЕРАВНОВЕСНОСТЬ СО ПРИ ЛАМИНАРНОМ ТЕЧЕНИИ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ В ТРУБЕ КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ

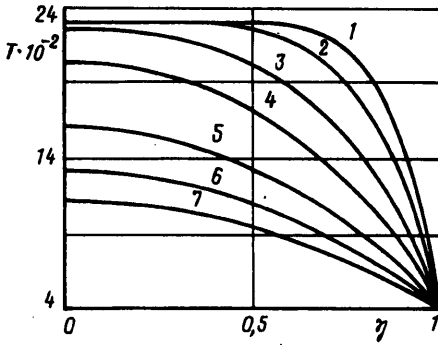
Проведено численное моделирование многокомпонентного ламинарного потока продуктов сгорания газообразных углеводородных топлив в охлаждаемых круглых каналах с учетом детальной химической кинетики и реальных транспортных свойств, в частности термодиффузии легких компонент. Особое внимание уделено кинетике релаксации окиси углерода СО. Проанализированы факторы, влияющие на скорость релаксации СО вниз по потоку и приводящие к снижению концентрации окиси углерода на выходе из канала.

Интерес, проявляемый к кинетике образования и релаксации СО в потоках продуктов сгорания, связан как непосредственно с совершенствованием процессов сжигания газообразных углеводородных топлив и утилизации выделяющегося при этом тепла, так и с вопросами экологического контроля выбросов, поступающих в атмосферу при работе различных энергетических агрегатов, двигателей внутреннего сгорания и тому подобных устройств. При рассмотрении процессов релаксации химического состава потока продуктов сгорания необходимо учитывать наличие поперечных градиентов температуры, вызванных охлаждающим влиянием стенки, будь то стенка реактора, выхлопной трубы или пробоотборника.

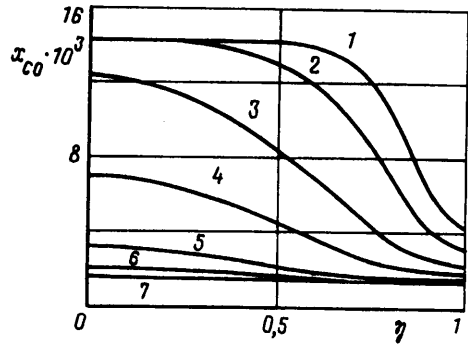
В настоящей работе рассмотрены результаты численного моделирования течения продуктов сгорания углеводородных топлив в трубе круглого сечения с охлаждаемыми стенками с учетом детальной химической кинетики и реальных транспортных свойств компонент. Основное внимание уделено рассмотрению релаксации концентрации СО в ядре потока и в пограничном слое, формирующемся на стенке канала. Предполагалось, что на входе в трубу поток продуктов сгорания пропана в воздухе химически сбалансирован и имеет постоянные по сечению параметры: давление 1 атм, скорость  $u_{\infty} = 10$  м/с, температуру  $T_{\infty} = 2100\text{--}2300$  К (что соответствует сжиганию в адиабатических условиях при коэффициенте избытка окислителя  $\alpha = 1,0\text{--}1,1$ ). Температура стенки канала  $T_w$  варьировалась в интервале от 400 до 1200 К. При указанных выше параметрах и характерном радиусе трубы  $R = 1$  см число Рейнольдса  $Re_{\infty}$  по порядку равно 100.

Для описания структуры потока и пространственного распределения компонент продуктов сгорания в канале использовался подход, применявшийся авторами ранее в работах [1, 2]. Отличие состояло в том, что вместо уравнений в приближении пограничного слоя использовались уравнения в приближении узкого канала [3]. Модель химической кинетики компонент продуктов сгорания ( $H_2O$ ,  $H_2$ ,  $O_2$ ,  $OH$ ,  $H$ ,  $O$ ,  $HO_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $N_2$ ,  $NO$ ) и константы скоростей химических реакций были взяты такими же, как и в [2].

При формулировке граничных условий на стенке трубы предполагалось, что материал стенки является абсолютно плотным и с компонентами продуктов сгорания не реагирует. При этом рассматривались четыре типа граничных условий: 1 – поверхность является некаталитической по отношению ко всем компонентам, 2 – поверхность является частично каталитической, а именно абсолютно каталитической по



Фиг. 1



Фиг. 2

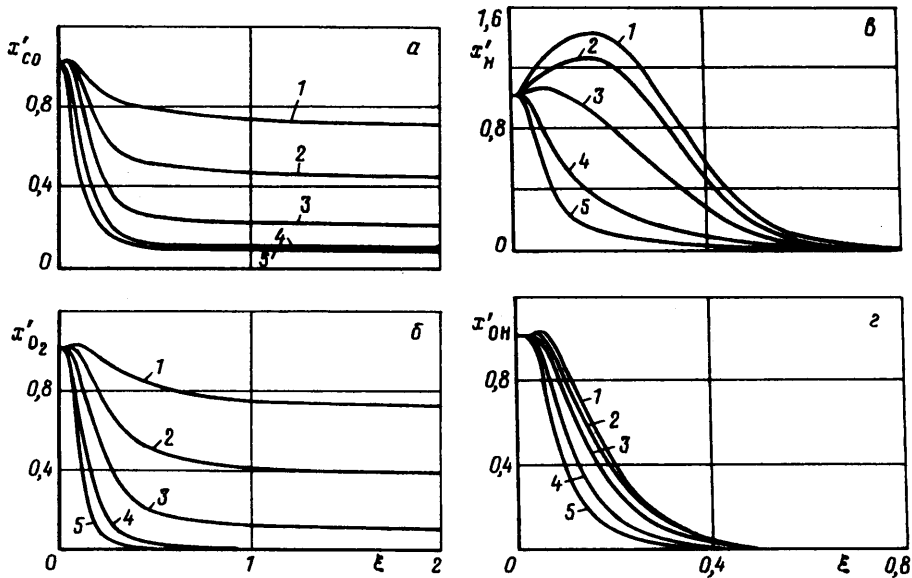
Фиг. 1. Распределения температуры  $T \cdot 10^{-2}$  в различных сечениях цилиндрического канала радиуса  $R = 1,0$  см при  $\alpha = 1,0$  и  $T_w = 400$  К. Кривые 1–7 соответствуют значениям координаты  $\xi$ , равным 0,01, 0,02, 0,05, 0,1, 0,2, 0,3 и 0,4

Фиг. 2. Распределения мольной доли CO  $x_{CO} \cdot 10^3$  в различных сечениях канала радиуса  $R = 1,0$  см при  $\alpha = 1,0$  и  $T_w = 400$  К. Кривые 1–7 соответствуют тем же значениям координаты  $\xi$ , что и на фиг. 1

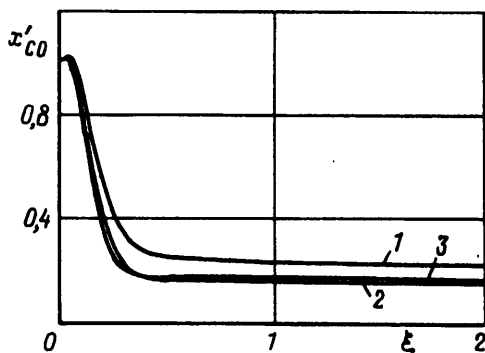
отношению к реакциям рекомбинации радикалов H, O, OH,  $\text{NO}_2$  и некаталитической по отношению ко всем другим компонентам, 3 – поверхность каталитическая для всех компонент, кроме NO, 4 – поверхность абсолютно каталитическая (т.е. газофазные реакции вблизи нее равновесны).

Рассмотрим результаты расчетов. На фиг. 1 и 2 приведены распределения температуры и мольной доли CO в различных сечениях круглого цилиндрического канала для случая некаталитических стенок. Безразмерная координата  $\xi = xv_\infty / (R^2 \cdot u_\infty)$ , где  $x$  – координата, отсчитываемая от входного сечения канала вдоль его оси,  $v$  – кинематическая вязкость. Поперечная координата  $y$  отсчитывается от оси канала. Из результатов расчетов следует, что влияние силы тяжести начинает сказываться на профилях температуры и скорости на расстояниях, превышающих длину релаксации молекулярного состава продуктов сгорания. Поэтому при заданных каталитических свойствах поверхности и фиксированных значениях  $\alpha$  и  $T_w$  температура газовой смеси на длинах, представляющих интерес, есть функция безразмерных переменных  $\xi$  и  $\eta = y/R$ , а мольная доля CO – функция  $\xi$ ,  $\eta$  и числа Дамкелера  $\text{Da}_\infty = \tau_T / \tau_X$  (где  $\tau_T = R^2 / v_\infty$  – характерное газодинамическое время,  $\tau_X$  – характерное время изменения молекулярного состава смеси за счет протекания химических реакций). Из фиг. 2 видно, что замораживание концентрации CO начинает проявляться в пристеночной области и постепенно распространяется на осевую часть потока.

Осевые профили концентрации CO (а) и концентрации  $\text{O}_2$  (б), H (в) и OH (г), т.е. компонент, определяющих релаксацию CO вниз по потоку, рассчитанные для случая некаталитической стенки, представлены на фиг. 3. Видно, что с уменьшением радиуса канала существенно возрастает уровень концентрации CO на выходе из канала. При этом для канала радиусом  $R < 0,5$  см уровень концентрации CO на выходе из канала определяется скоростью охлаждения потока и связан с замораживанием реакции окисления CO. Об этом свидетельствует достаточно высокая концентрация молекулярного кислорода на выходе из каналов с  $R < 0,5$  см. При увеличении радиуса канала  $R > 0,5$  см практически весь молекулярный кислород успевает прореагировать до сечения с безразмерной координатой  $\xi = 0,5$ . Из анализа результатов расчетов следует, что в этом случае суммарная замороженная концентрация CO и  $\text{H}_2$  равна концентрации NO, которая в свою очередь практически постоянна вдоль канала. Таким образом, количество недогоревших CO и  $\text{H}_2$  определяется количеством кисло-

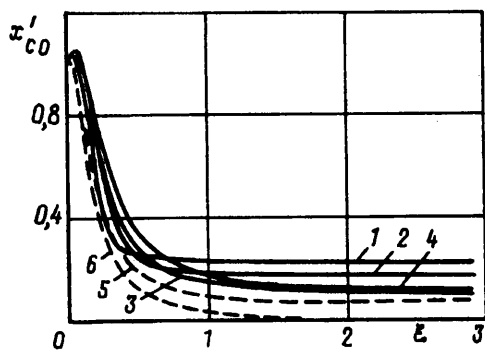


Фиг. 3. Распределения мольных долей  $x'_{CO}$ ,  $x'_{O_2}$ ,  $x'_H$  и  $x'_{OH}$ , нормированных на их значения в набегающем потоке, вдоль оси канала при  $\alpha = 1,0$  и  $T_w = 400$  К. Кривые 1–5 соответствуют значениям радиуса  $R$ , равным 0,05, 0,1, 0,2, 0,5 и 1,0 см



Фиг. 4

Фиг. 4. Распределения мольной доли CO  $x'_{CO}$  вдоль оси канала при  $R = 0,2$  см и  $T_w = 400$  К. Кривые 1–3 соответствуют значениям  $\alpha$ , равным 1,0, 1,05 и 1,1



Фиг. 5

Фиг. 5. Распределения мольной доли CO  $x'_{CO}$  вдоль оси канала при  $R = 0,2$  см и  $\alpha = 1,0$ . Кривые 1–4 соответствуют значениям  $T_w$ , равным 400, 800, 1000 и 1200 К и случаю некаталитической стенки; кривые 5 и 6 – значению  $T_w = 1000$  К и различным случаям каталитической способности стенки

рода, который изначально (т.е. на входе в канал) связан азотом в NO. В свою очередь соотношение концентраций CO и  $H_2$  определяется химической кинетикой, поскольку реакция пароводяной конверсии протекает неравновесно.

Влияние коэффициента избытка окислителя  $\alpha$  на темп окисления CO вдоль канала с некаталитической стенкой иллюстрируются фиг. 4. Сначала увеличение коэффициента избытка окислителя  $\alpha$ , т.е. увеличение кислорода в исходной смеси, естественно приводит к росту скорости окисления CO (кривые 1 и 2 на фиг. 4). Однако затем увеличение  $\alpha$  приводит к замедлению темпов окисления CO (кривые 2 и 3 на фиг. 4),

что связано с уменьшением температуры продуктов сгорания. Отметим, что при возрастании  $\alpha$  от 1,0 до 1,1 и соответствующем падении адиабатической температуры продуктов сгорания равновесная абсолютная концентрация CO на входе в канал уменьшается в 3,5 раза.

Влияние температуры стенки и ее каталитичности на релаксацию CO иллюстрируется фиг. 5. Увеличение температуры стенки канала  $T_w$ , как видно из фиг. 5, приводит к росту длины зоны релаксации и снижению концентрации CO на выходе из канала. Уменьшить содержание окиси углерода на выходе из канала можно за счет использования каталитической стенки (кривые 5 и 6 на фиг. 5). Кривая 5 соответствует случаю стенки, каталитической для всех компонент, кроме NO, а кривая 6 – случаю абсолютно каталитической стенки. Сопоставление этих кривых наглядно демонстрирует роль окислов азота в кинетике релаксации CO, о которой шла речь выше.

**Заключение.** Таким образом, показано, что уровень концентрации CO на выходе канала круглого сечения определяется, с одной стороны, скоростью охлаждения потока и замораживанием реакции окисления окиси углерода, а с другой – начальным содержанием в продуктах сгорания окислов азота, связывающих кислород. Исследовано влияние радиуса канала на выходной уровень CO. Проанализированы факторы, влияющие на скорость релаксации CO вниз по потоку, такие, как коэффициент избытка окислителя  $\alpha$ , температура и каталитическая способность стенки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 95-02-04577-а) в Научно-исследовательском центре теплофизики импульсных воздействий ОИВТ РАН и Научно-исследовательском институте низких температур.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бенилов М.С., Rogov B.V., Соколова И.А., Турский Г.А.* Химически неравновесный многокомпонентный пограничный слой плазмы молекулярных газов со щелочной присадкой // ПМТФ. 1986. № 5. С. 29–40.
2. *Benilov M.S., Pozdeev P.A., Rogov B.V., Sinel'shchikov V.A.* Nonequilibrium boundary layer of potassium-seeded combustion products // Combustion and Flame. 1994. V. 98. № 4. P. 313–325.
3. *Лапин Ю.В., Нехамкина О.А., Поспелов В.А. и др.* Численное моделирование внутренних течений вязких химически реагирующих газовых смесей // Итоги науки и техники. Сер. Механика жидкости и газа. М.: ВИНТИ, 1985. Т. 19. С. 86–185.

Москва

Поступила в редакцию  
4.XII.1995