

# Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

А. Х. Мнацаканян, Г. В. Найдис, О химической релаксации в канале МГД-генератора открытого цикла, *ТВТ*, 1983, том 21, выпуск 1, 199–201

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 100.28.231.85

8 ноября 2024 г., 17:01:34



Поскольку величины  $a$ ,  $i$ ,  $i_h$  и  $i$  связаны однозначно, коэффициенты  $B_1$  и  $B_2$  являются функциями двух величин —  $a$  и  $\chi$ . На рис. 2 они показаны в зависимости от  $a$  при разных  $\chi$  для круглой трубы. Кривые для  $B_1$  и  $B_2$  не пересекаются. Это означает, что существует максимальное значение отношения плотностей  $\rho_{\max}$ , выше которого уравнение (3) не имеет корней и, следовательно, пробковое течение существовать не может. При  $\rho < \rho_{\max}$  имеются два корня.

Значение  $\rho_{\max}$  зависит от  $\chi$  (рис. 3). Параметр  $\chi$  при пробковом течении равен отношению истинного  $\phi$  и расходного  $\beta$  газосодержаний [7], поэтому его характерное значение можно найти по известным экспериментальным данным (например,

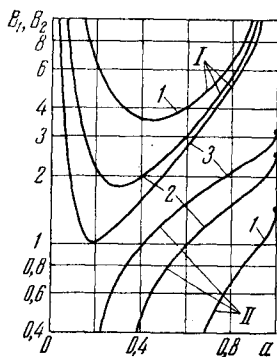


Рис. 2. Коэффициенты  $B_1$  (кривые I) и  $B_2$  (кривые II) уравнения (2); 1 —  $\chi = 0,6$ ; 2 —  $0,8$ ; 3 —  $0,9$

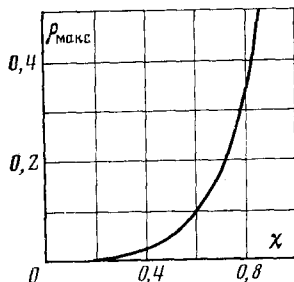


Рис. 3

[8, 9]). По этим данным при развитом турбулентном течении в жидких пробках  $\chi \approx 0,8$ . Такому значению соответствует  $\rho_{\max} \approx 0,3$ .

Таким образом, если плотность тяжелой фазы превышает плотность легкой фазы менее чем в три раза, пробковое течение в круглой горизонтальной трубе невозможно при условии, что поверхностное натяжение несущественно для элементов течения, имеющих размеры порядка диаметра трубы.

При  $\rho > \rho_{\max}$  разрушается прежде всего жидкий слой, образуя эмульсию. Вслед за ним разрушаются и пробки.

Из проведенного рассмотрения ясно, почему эмпирическая формула Гарднера и Куби (см. гипотезу 2) пригодна только для больших плотностей легкой фазы. В то время как при малых плотностях слой разрушается из-за возмущений, накладываемых на равновесное состояние, при больших плотностях слой вообще не имеет равновесных состояний.

Краснодарский политехнический институт

Поступило в редакцию  
12.XI.1981

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Kubie J. Int. J. Multiphase Flow, 1979, v. 5, p. 327.
2. Fisher S. A., Harrison G. S., Pearce D. L. VI Int. Heat Transfer Conf., Toronto, 1978.
3. Gardner G. C. Int. J. Multiphase Flow, 1977, v. 3, p. 305.
4. Wallis G. B., Dobson J. E. Int. J. Multiphase Flow, 1973, v. 1, p. 173.
5. Gardner G. C., Kubie J. Int. J. Multiphase Flow, 1976, v. 2, p. 435.
6. Taitel Y., Dukler A. E. A. I. Ch. E. Journal, 1976, v. 22, p. 47.
7. Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения. М.: Мир, 1972. 440 с.
8. Арманд А. А. Изв. ВТИ, 1946, № 1, с. 16.
9. Мамаев В. А., Одишария Г. Э., Семенов Н. Н., Точигин А. А. Гидродинамика газожидкостных смесей в трубах. М.: Недра, 1969. 208 с.

УДК 621.313.12

#### О ХИМИЧЕСКОЙ РЕЛАКСАЦИИ В КАНАЛЕ МГД-ГЕНЕРАТОРА ОТКРЫТОГО ЦИКЛА

Мнацаканян А. Х., Найдис Г. В.

Эффекты химической неравновесности в канале МГД-генератора на продуктах сгорания могут быть существенны при больших скоростях течения. В недавних работах [1–3], посвященных этому вопросу, используется тот же набор реакций между компонентами продуктов сгорания [4] (или часть реакций из этого набора), который применяется при исследованиях релаксации в соплах реактивных двига-

телей. Добавление дополнительной компоненты (щелочной присадки) делает возможным появление новых каналов химических реакций. Их влияние на релаксацию в МГД-канале рассматривается в данном сообщении.

Подробный обзор результатов исследования релаксации в отсутствие присадки содержится в [5]. Предполагается, что время пребывания газа в камере сгорания достаточно велико, и устанавливается равновесный состав, соответствующий температуре горения. Далее для стадии расширения газа в сопле решается система кинетических уравнений для концентраций различных компонент. Так, анализ роли различных реакций в продуктах сгорания водорода в воздухе показывает, что газ можно рассматривать как реагирующую смесь типа O-H, состоящую из  $H_2O$ , OH,  $H_2$ ,  $O_2$ , H и O и разбавленную инертным азотом. Кроме молекулярного азота, в смеси содержится NO, однако поскольку реакции с участием NO протекают медленно, а количество связанного в NO кислорода относительно мало, при расчетах релаксации указанных выше компонент концентрацию NO можно полагать замороженной. В условиях химического равновесия состояние такой смеси определяется константами равновесия любых четырех независимых реакций между ее компонентами. Характерное время релаксации будет определяться скоростью самой медленной из набора четырех наиболее быстрых независимых реакций. В данном случае этот набор включает три двухчастичные (1)–(3) и одну трехчастичную (4) реакции



Поскольку наименьшей скоростью в этом случае обладает реакция (4), именно она определяет характерное время релаксации. Его величину нетрудно найти, линеаризуя систему кинетических уравнений вблизи положения равновесия и полагая скорости реакций (1)–(3) бесконечно большими. С учетом выполнения неравенств  $2[O] \ll [OH] \ll 4[H_2] \ll 4[H_2O]$ ,  $[H] \ll 2[H_2]$ ,  $2[O_2] \ll [H_2]$  имеем

$$\tau_1^{-1} = 4K_4[M][OH][H]/([H] + [OH] + 4[O_2]), \quad (5)$$

где  $K_4$  – константа скорости реакции (4).

Продукты сгорания углеводородных топлив в воздухе можно по аналогии рассматривать как реагирующую смесь из компонент  $H_2O$ ,  $CO_2$ , OH,  $H_2$ ,  $O_2$ , CO, H и O, разбавленную азотом. Ее состояние определяется константами равновесия пяти реакций. Наиболее быстро протекают двухчастичные реакции (1)–(3) и



самой быстрой трехчастичной реакцией по-прежнему является (4). Считая скорость (6) бесконечно большой, для времени релаксации получим ту же самую величину (5).

Наличие щелочной присадки приводит к появлению в реагирующей смеси еще двух компонент: K и KOH (степень ионизации в МГД-канале мала, и реакции с участием заряженных частиц при анализе химической релаксации можно не рассматривать). В этом случае для описания релаксации необходим учет как минимум шести независимых реакций. Как показано в [6], при добавлении в продукты сгорания водорода в кислороде небольшого количества калия рекомбинация  $H + OH \rightarrow H_2O$  ускоряется вследствие протекания реакций



Приводимые ниже оценки показывают, что в условиях течения газа в МГД-канале рекомбинация  $H + OH \rightarrow H_2O$  в реакциях (7), (8) (с участием калия в качестве катализатора) идет значительно быстрее, чем в прямом процессе (4). В этом случае минимальный набор наиболее быстрых независимых реакций образуют реакции (1)–(3), (6)–(8). Если принять, как и ранее, что медленнее всех протекает трехчастичная реакция (8) (концентрация калия не слишком велика), то для времени релаксации получим (при  $W \ll 2[H_2]$ )

$$\tau_2^{-1} = 4K_8[M][OH][K]/([H] + [OH] + 4[O_2] + W), \quad (9)$$

где  $W = [K][KOH]/([K] + [KOH])$ .

Оценим характерные времена релаксации для типичных условий, реализующихся в сверхзвуковом МГД-канале на продуктах сгорания природного газа в воздухе (присадка  $K_2CO_3$ , 2 мас.%). При давлении  $p = 3$  атм и температуре  $T = 2500$  К для времени релаксации без учета реакций (7), (8) получим  $\tau_1 = 8 \cdot 10^{-5} - 6 \cdot 10^{-4}$  с (нижняя оценка  $\tau_1$  соответствует  $K_4$  по данным [7], верхняя – по [8]). Для этих же условий использование значения  $K_8$  из [6] дает  $\tau_2 = 6 \cdot 10^{-6}$  с. Соответственно при  $p = 1$  атм,  $T = 2250$  К получим  $\tau_1 = 6 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-3}$  с,  $\tau_2 = 4 \cdot 10^{-5}$  с. Отметим, что выражение (9) дает заниженную оценку для времени релаксации, поскольку оно получено в предположении о бесконечно большой скорости реакций (1)–(3), (6), (7). Однако в условиях МГД скорости парных реакций имеют тот же порядок величины, что

и (8). Самой медленной из них является реакция (6). Считая, что именно она определяет время релаксации (полагая скорости остальных реакций бесконечно большими), получим

$$\tau_3^{-1} = K_6[\text{CO}][\text{OH}][(\text{H}_2)^{-1} + [\text{CO}]^{-1} + [\text{CO}_2]^{-1}). \quad (10)$$

Для двух приведенных выше вариантов значения  $\tau_3$  равны соответственно  $10^{-5}$  и  $10^{-4}$  с, что в два – три раза превышает  $\tau_2$ , но значительно меньше, чем  $\tau_1$ . Таким образом, наличие щелочной присадки значительно ускоряет релаксацию компонент продуктов сгорания. Реакции (7), (8) необходимо учитывать при моделировании процессов химической релаксации в МГД-канале, в частности при анализе распада окиси азота.

Большой интерес представляет вопрос об ионизационной релаксации в канале МГД-генератора, поскольку концентрация электронов определяет электропроводность. Основные заряженные компоненты в плазме продуктов сгорания с присадкой калия – электроны и ионы  $\text{K}^+$  и  $\text{OH}^-$ . В равновесных условиях при заданной концентрации нейтральных компонент значения  $[e]$ ,  $[\text{K}^+]$ ,  $[\text{OH}^-]$  определяются константами равновесия двух независимых реакций. Наиболее быстрыми реакциями с участием заряженных частиц являются процессы



Оценки, проведенные с использованием данных по скорости электронно-ионной рекомбинации [9] и выражения для константы скорости ион-ионной рекомбинации [10], показывают, что эти процессы протекают быстрее, чем реакции с участием нейтральных компонент. Поэтому в условиях, когда газодинамические времена достаточно велики и успевают устанавливаться равновесные значения концентраций нейтральных компонент, успевает устанавливаться также и ионизационное равновесие.

Выше рассматривалась релаксация в ядре потока, где неравновесность может быть обусловлена малостью газодинамических времен. В пограничных слоях возможны неравновесные эффекты, связанные с малостью отношений времен диффузии к временам химических реакций. Вблизи холодных электродов имеется область ионизационной неравновесности. При этом, в отличие от ядра потока, в приэлектродных областях возможно превышение температуры электронов  $T_e$  над температурой газа  $T$ . В этих условиях возрастает роль электронов в реакции ионизации. Расчет скорости ступенчатой ионизации при  $T_e \neq T$  может проводиться по схеме, использованной в [11, 12].

Институт высоких температур  
Академии наук СССР

Поступило в редакцию  
4.II.1982

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Прусова Н. М., Пшеничников Н. Н. ТВТ, 1977, т. 15, № 5, с. 1071.
2. Прусова Н. М. ТВТ, 1979, т. 17, № 4, с. 849.
3. Байбуз В. Ф., Зицерман В. Ю., Бережковский Л. М. Препринт ИВТАН № 1–53, М., 1980.
4. Алемасов В. Е. и др. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания. Т. 1. М.: ВИНТИ, 1971.
5. Хайлов В. М. Химическая релаксация в соплах реактивных двигателей. М.: Машиностроение, 1975.
6. Jensen D. E., Jones G. A., Mass A. C. H. J. Chem. Soc. Faraday Trans. I, 1979, v. 75, N 10, p. 2377.
7. Кондратьев В. Н. Константы скорости газофазных реакций. М.: Наука, 1970.
8. Jensen D. E., Jones G. A. Combustion and Flame, 1978, v. 32, N 1, p. 1.
9. Bates D. R., Malaviya V., Young N. A. Proc. Roy. Soc. London, 1971, v. A320, N 1543, p. 437.
10. Смирнов Б. М. Отрицательные ионы. М.: Атомиздат, 1978.
11. Мнацаканян А. Х., Найдис Г. В. Препринт ИВТАН № 1–43, М., 1979.
12. Мнацаканян А. Х., Найдис Г. В. ТВТ, 1980, т. 18, № 2, с. 245.