

колебательного пульсирующего горения, что обусловлено общностью уравнений (1) и (7) и резонансностью автоколебаний.

3. Эмпирическая зависимость (9) показывает, что при увеличении гидравлического сопротивления резонансной трубы КППГ относительно возрастает влияние диссипации колебаний, связанной с гидравлическими потерями. Формула (9) может быть рекомендована для приближенного расчета амплитуды давления автоколебательного резонансного пульсирующего горения.

*Поступила в редакцию
14/X 1974*

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Ольсон. Динамические аналогии. М., ГИИЛ, 1947.
2. L. I. Kastner, S. H. Shin. Critical Re number for steady and pulsating flow. Engineering. London, 1951.
3. И. В. Башмаков. В сб. Рабочие процессы в турбинах и двигателях внутреннего сгорания. М., ун-т «Дружбы народов», 1972.
4. Б. В. Булгаков. Колебания. М., ГИТТЛ, 1954.
5. Я. Г. Пановко. Основы прикладной теории упругих колебаний. М., «Машиностроение», 1967.
6. П. М. Алабужев и др. Теории подобия и размерностей. Моделирование. М., «Высшая школа», 1968.
7. А. А. Андронов, А. А. Витт, С. Э. Хайкин. Теория колебаний. М., ГИФМЛ, 1959.
8. Дж. П. Ден-Гартог. Механические колебания. М., ГИФМЛ, 1960.

УДК 621.375.82

РАВНОВЕСНЫЕ СОСТАВЫ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ С, Н, О, N ДЛЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО СО₂-ЛАЗЕРА

А. П. Генич, Н. В. Евтюхин, Г. Б. Манелис

(Москва)

С тех пор, как был предложен газодинамический СО₂-лазер [1], внимание исследователей привлекает проблема влияния состава нагретого газа на характеристики активной лазерной среды. Особенно остро эта проблема встает при создании и исследовании ГДЛ, работающего на продуктах сгорания различных углеводородных топлив или на продуктах взрыва ВВ. Анализ первых работ в этой области выполнен в обзоре [2].

Большое количество вариантов топлив, температур и давлений в камере сгорания, параметров газодинамического тракта делает задачу сложной и многоплановой. В целом она сводится к анализу истечения многокомпонентной газовой смеси из сопла произвольной формы с учетом химической и колебательной неравновесности. Важным аспектом проблемы в такой постановке является расчет равновесного состава продуктов сгорания. Имеющиеся в литературе многочисленные термодинамические расчеты выполнены для отдельных конкретных составов и в большинстве случаев с целями, далекими от лазерной тематики (см., например, [3]).

В настоящей работе проведен термодинамический расчет и анализ равновесных составов с учётом образования конденсированной фазы

(истинное равновесие) в произвольной композиции из атомов С, Н, О, N в области температур 1500—2500 К для давления 10 атм ($9,8 \times 10^5 \text{ Н/м}^2$).

В систему уравнений для расчета равновесных составов в изобарных условиях входили соотношения, полученные на основании закона действующих масс для каждой реакции в системе, закона Дальтона и уравнений материального баланса. В качестве независимых уравнений, описывающих все возможные химические и фазовые превращения в системе, принимались уравнения полной диссоциации каждого компонента на элементы и уравнение сублимации твердой фазы. Предполагалось, что все компоненты находятся в состоянии идеального газа.

Необходимой базой для расчета состава высокотемпературной смеси является информация о термодинамических константах и зависимости термодинамических свойств продуктов сгорания от температуры в газобразном и конденсированном состояниях. В расчетах использовались данные [4]. Они же и определяли количество учитываемых компонентов. Расчет проводился на БЭСМ-4 по программе, разработанной в математическом отделе ОИХФ АН СССР.

При анализе оказалось удобным представить результаты расчета на тройных С, О, Н-диаграммах с фиксированным значением атомной доли N и температуры. (Расчет проводился для $N=0,2; 0,4; 0,6; 0,8$.) Любая точка на таких диаграммах соответствует композиции определенного атомного состава. Атомная композиция при заданной температуре и давлении определяет равновесный состав продуктов. Совокупность же точек на диаграмме, которые соответствуют одинаковым концентрациям какого-либо равновесного компонента, образует для него линию равной концентрации. Для иллюстрации основных закономерностей, вытекающих из анализа результатов расчета, достаточно диаграмм с одним выбранным значением атомной доли N. В настоящей статье приведены диаграммы, соответствующие $N=0,6$ (рис. 1, 2).

Характер представленных результатов позволяет сделать ряд замечаний.

1. Диаграмма может быть разделена на две качественно различные половины линией постоянного отношения $C/O=1/1$. В точках, расположенных выше этой линии, равновесные составы содержат конденсированную фазу в виде сажи, количество которой определяется положением точки и равновесной температурой. Наличие сажи накладывает ограничение на использование соответствующих композиций как основы для создания топлива для ГДЛ. Поэтому при дальнейшем обсуждении эта область на диаграммах исключается из рассмотрения.

2. В рассматриваемой области во всем исследованном диапазоне температур в равновесных составах в значительных количествах присутствуют N_2 , CO_2 , H_2O , CO , H_2 , O_2 . Диаграммы на рис. 1, построенные для температуры 2500 К, дают наглядное представление о поведении концентраций этих молекулярных компонентов при различных соотношениях атомов в системе. На рис. 1, б отчетливо прослеживается область, где концентрации CO , H_2 , O_2 очень малы. Область расположена вдоль линии, условно названной линией тройных смесей $N_2-CO_2-H_2O$ (см. рис. 2). Она проходит через точки максимального содержания CO_2 и H_2O соответственно на осях $C-O$ и $O-H$. Максимальное содержание N_2 на диаграммах также соответствует этой линии (см. рис. 1, а).

Наличие линии тройных смесей $N_2-CO_2-H_2O$ связано с выбранным для исследования диапазоном температур. Малая степень диссоциации CO_2 при температурах 1500—2500 К приводит к небольшому содержанию примесей и сохранению относительной чистоты тройной смеси.

3. Равновесные составы в точках, лежащих выше линии тройных смесей, определяются в основном реакцией водяного газа $CO+H_2O \rightleftharpoons$

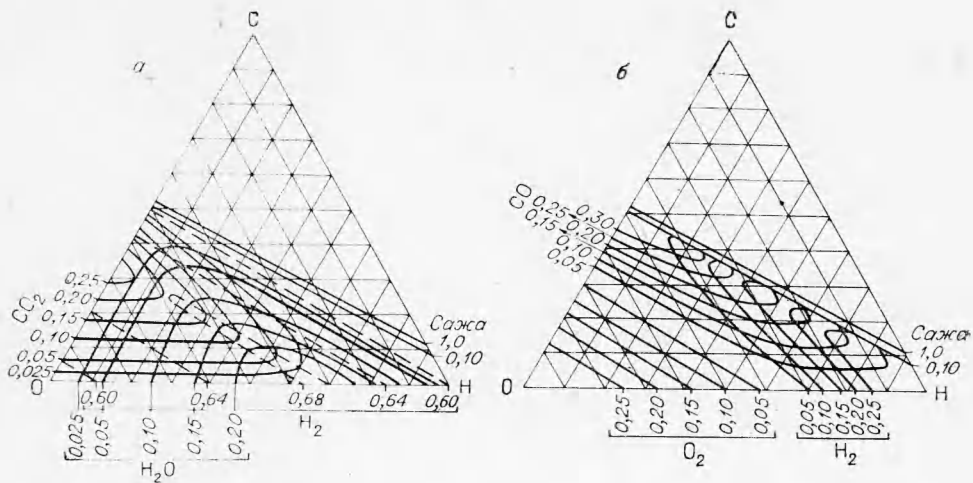


Рис. 1. Линии равных концентраций N_2 , CO_2 , H_2O (мольные доли) (а), CO , H_2 , O_2 (б) и сажи (г-атомах/кг); $N=0,6$; $T=2500$ К.

$\rightleftharpoons CO_2 + H_2$. Основные примеси при этом CO и H_2 (см. рис. 1, б). В области ниже этой линии в качестве примеси к тройным смесям преобладает O_2 .

Следует отметить, что большая часть результатов, касающаяся работы газодинамического CO_2 -лазера, получена для тройных смесей (см., например, [5, 6]). Проблеме влияния примесей CO , O_2 , H_2 на характеристики лазерной среды уделяется еще мало внимания. Укажем в этой связи на появившиеся недавно работы [7, 8, 12].

4. Важной характеристикой равновесного состава C , H , O , N — топлива для ГДЛ является молекулярное соотношение CO_2 и H_2O . На диаграмме такую характеристику состава можно представить в виде линий равных отношений CO_2/H_2O . На рис. 2 показаны такие линии для температур 1500 и 2500 К. Ниже линии тройных смесей точки, соответствующие равным отношениям CO_2 к H_2O , не смещаются при изменении температуры. В области же выше этой линии их положение с температурой меняется.

5. Помимо указанных основных компонентов, равновесные составы содержат большое количество примесей, мольная доля которых редко превышает 0,01. Следует отметить присутствие NO (порядка 0,01 при 2500 К) в составах с избытком кислорода.

Рассмотренные диаграммы относятся к постоянному значению $N=0,6$. Для случаев $N=0,2$; 0,4; 0,8, также бравшихся для расчета, качественный вид диаграмм не меняется. Абсолютные же концентрации компонентов изменяются в соответствии с изменением состава атомной композиции. Положение линий равных отношений CO_2/H_2O на диаграммах практически не зависит от N .

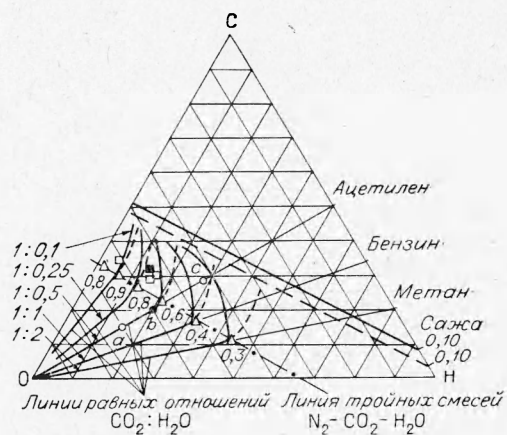


Рис. 2. Линии равных отношений CO_2/H_2O и сажи; $N=0,6$.

— $T=2500$ К, - - - $T=1500$ К; Δ — коэффициент усиления, согласно [5], равный 0,6; \square — $N=0,6$, \blacksquare — $N=0,4$ (составы, использованные в [10]).

Проведенный анализ показывает, что использование диаграмм, связывающих состав атомной композиции с термодинамически равновесным составом при заданной температуре и давлении, позволяет оценить возможности тех или иных систем на основе С, О, Н, N и сделать осознанный выбор топлива для газодинамического CO₂-лазера.

Очевидно, однако, что не только равновесный состав продуктов сгорания определяет основные лазерные характеристики. Они определяются также поведением этих продуктов в газодинамическом канале лазера. Анализ свойств активной среды удобно проводить тогда на диаграммах, подобных рассмотренным, где состав атомной композиции связывается с характеристиками активной лазерной среды (например, с ненасыщенным коэффициентом усиления).

Естественно, что такая связь имеет смысл только для сопел с одинаковой газодинамикой. При одинаковой степени расширения характера течения в соплах будет подобен, если сохраняется постоянная величина $p_* h_* / \text{tg } \theta$ (параметр подобия), где p_* — давление перед входом в сопло, h_* — высота критического сечения сопла, θ — полуугол расширяющейся части сопла вблизи критического сечения. На рис. 2 приведены экспериментально измеренные в [5] при сжигании системы CO—H₂—O₂—N₂ коэффициенты усиления тройных смесей N₂—CO₂—H₂O для $p_* h_* / \text{tg } \theta \approx 1$ атм·см, $T = 1500$ К и $A/A_* \approx 30$ (A_* — площадь критического сечения сопла; A — площадь сечения среза сопла). Видно, что усиление активной среды возрастает с увеличением отношения CO₂ к H₂O до $0,9\% \cdot \text{см}^{-1}$ (при CO₂/H₂O ≈ 10), а затем круто падает.

По грубым оценкам потери в активной среде на поглощение и рассеяние света составляют примерно $0,1\% \cdot \text{см}^{-1}$. Это означает, что линию отношения CO₂/H₂O = 1/2 можно условно принять за границу, за пределами которой вряд ли можно рассчитывать на составы, пригодные для газодинамического CO₂-лазера.

Наглядное использование построенных диаграмм можно продемонстрировать на примере анализа возможностей углеводородных топлив. Для качественного анализа достаточно одной диаграммы, приведенной на рис. 2 для $N = 0,6$. Как было указано выше, положение показанных на диаграмме линий равных отношений CO₂/H₂O практически от атомной доли N в системе не зависит ($0 \leq N \leq 0,8$). Равновесные составы продуктов сгорания при сжигании ацетилено-воздушных смесей соответствуют точкам на прямой с постоянным отношением C/H = 1/1. Соответствующий выбор соотношения горючего (C₂H₂) и окислителя (воздуха), а также параметров газодинамического тракта, дает возможность получить активную среду с коэффициентом усиления, достаточным для построения мощного CO₂-генератора. Экспериментально это показано в работе [9], авторы которой измерили коэффициенты усиления для составов, атомная композиция которых соответствует точкам на отрезке ac (см. рис. 2) прямой с отношением C/H = 1/1 ($0,6 \leq N \leq 0,7$ и $1500 \leq T \leq 2800$ К). Максимальный коэффициент усиления был получен для состава, который изображается на этом отрезке точкой b , и равнялся $0,6\% \cdot \text{см}^{-1}$ ($N \approx 0,7$, $p_* h_* / \text{tg } \theta \approx 3$, $T \approx 2000$ К).

Аналогичные, хотя и меньшие, возможности имеются при сжигании бензина. В этом случае равновесные составы продуктов сгорания соответствуют точкам на прямой с отношением C/H = 1/2. В продуктах сгорания метана (линия C/H = 1/4) соотношения между CO₂ и H₂O не позволяют, по-видимому, надеяться на успех.

В работе [10] сообщается о получении импульсов генерации в ГДЛ на продуктах сгорания нитросоединений. Атомная доля азота в соединениях, разбавленных воздухом, равнялась примерно 0,6, в нитросоединении без разбавления — 0,4. Равновесные составы продуктов сгорания в предсопловом объеме ГДЛ ($p = 20-40$ атм, $T \approx 2000$ К) в качестве

основных примесей к тройной смеси $N_2-CO_2-H_2O$ содержали CO и H_2 . Точки, соответствующие этим составам, также изображены на рис. 2.

Лучшими топливами, с точки зрения получения оптимального состава продуктов сгорания для ГДЛ, в настоящее время следует, видимо, считать системы типа $CO-H_2-O_2-N_2$ или $CO-H_2-воздух$. Именно на этих составах работают самые мощные газодинамические CO_2 -лазеры непрерывного действия.

В заключение авторы считают приятным долгом выразить благодарность Ю. М. Петрову и В. М. Васильеву за помощь в проведении численных расчетов, а также В. М. Шмелеву за полезные обсуждения полученных результатов.

Поступила в редакцию
28/X 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. В. К. Конохов, А. П. Прохоров. Письма в ЖЭТФ, 1966, 3, 11.
2. В. Н. Карнюшин, Р. И. Солоухин. ФГВ, 1972, 8, 2.
3. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания. Справочник. Т. 1. М., Изд-во ВИНТИ АН СССР, 1971.
4. Термодинамические свойства индивидуальных веществ (Справочник в 2-х томах). М.: Изд-во АН СССР, 1962.
5. R. A. Meinzer. AIAAJ, 1972, 10, 4.
6. А. И. Демин, Е. М. Кудрявцев и др. Квантовая электроника, 1974, 1, 3.
7. S. John. Vamos. AIAA-th Aerospace Sciences Meeting. No 74—177. Washington, 1974.
8. R. Tennant, R. Vargas, S. Hadley. AIAA-th Aerospace Sciences Meeting. N 74—178. Washington, 1974.
9. Г. И. Козлов, В. Н. Иванов, А. С. Кораблев. ЖЭТФ, 1973, 65, 1(7).
10. Л. К. Белецкий, В. А. Вазюлин и др. Квантовая электроника, 1974, 1, 2.
11. E. T. Gerry. IEEE Spectrum, 1970, 7, 11.
12. В. М. Шмелев, Н. Я. Василик, А. Д. Марголин. Квантовая электроника, 1974, 1, 8.

УДК 534.222.2

ПОДВОДНЫЙ ВЗРЫВ ГАЗОВОЙ СМЕСИ КАК ИСТОЧНИК ВОЛН ДАВЛЕНИЯ В ЖИДКОСТИ

С. М. Когарко, О. Е. Попов, А. С. Новиков

(Москва)

Возможность замены конденсированного ВВ на взрывчатую газовую смесь (ВГС) при возбуждении упругих колебаний в жидкости для задач морской геологии [1] привела к необходимости всестороннего изучения подводных взрывов газовых смесей. Взрыв газовой смеси как источник волн давления в жидкости позволяет успешно проводить сейсморазведку методом отраженных волн и обладает по сравнению со взрывом конденсированного ВВ рядом достоинств, среди которых многообразие действия и отсутствие губительного влияния на ихтиофауну.

Самым распространенным способом осуществления подводного взрыва газовой смеси является детонационное сгорание ее в полузамкнутом объеме — взрывной камере, представляющей собой трубу, открытую с нижнего конца и целиком погруженную в жидкость.