

11. В. Н. Строкин.— В сб.: Горение и взрыв. М., «Наука», 1972.
12. Е. С. Щетинков. ФГВ, 1972, 8, 4.
13. R. C. Orth, F. S. Billig, S. E. Grenleski. Instrumentation for Air Breathing Propulsion, vol. 34, 1974.
14. A. F. Charwat. Advances in Heat Transfer. Edited by Hartnett J. P., Irvine T. F., Vol. 6, 1970.
15. В. Л. Зимонт, Е. А. Мещеряков. ФГВ, 1974, 10, 2.
16. В. С. Авдудевский и др. Основы теплопередачи в авиационной и ракетной технике. М., «Оборонгиз», 1960.
17. В. Л. Зимонт, А. И. Мальцев. МЖГ, 1968, 3.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧИХ СОСТАВОВ ДЛЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО СО₂-ЛАЗЕРА НА ГОРЕНИИ

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

(Черноголовка)

При практическом использовании разнообразных топлив для гидродинамического лазера (ГДЛ) на горении возникает задача об определении влияния состава продуктов сгорания на рабочие характеристики таких устройств. Для топлив с атомной композицией из С, Н, О и N, как правило, характерен сложный состав продуктов сгорания, в котором наряду с молекулярными компонентами, необходимыми для работы лазера (СО₂, N₂, Н₂О), могут присутствовать много других компонентов, среди которых основная доля приходится на СО, Н₂, О₂. Ряд экспериментальных исследований влияния этих примесей на работу ГДЛ выполнен в последние годы. Однако полученной информации явно недостаточно для анализа свойств сложных лазерно-активных сред, которые образуются при сгорании различных топлив.

В импульсных экспериментах техника нагрева газа ударными волнами позволяет в широких пределах варьировать равновесный химический состав, оставляя при этом постоянными такие физические параметры рабочей среды, как температура и давление. Такой гибкости, по-видимому, нельзя достигнуть в ГДЛ на горении, поскольку, например, содержание воды и углекислого газа, а также значение температуры при сгорании неразделимо взаимосвязаны. Это положение справедливо, если рассматривать горение какой-либо определенной комбинации горючего и окислителя, как это делается в [1]. Однако все же можно в интервале температур, представляющем практический интерес, гибко менять условия в резервуаре, используя разнообразные топливные смеси.

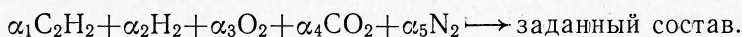
Настоящая работа посвящена описанию методики приготовления рабочих составов для ГДЛ путем сжигания рассчитанных определенным способом модельных топливных смесей. Излагаемая методика основана на термодинамическом расчете равновесия в произвольной композиции из С-, Н-, О- и N-атомов. Результаты подобного расчета представлены в [2], где получены равновесные составы и их термодинамические характеристики, однозначно соответствующие определенным атомным композициям и выбранным значениям температуры и давления.

Способ моделирования

Рассмотрим задачу: по известным равновесным параметрам высокотемпературного состава найти исходную топливную смесь, при адиабатическом сжигании которой в изохорных или изобарных условиях достигается это равновесие. В такой постановке задача может допускать и неоднозначность в решении, а может вообще не иметь решения, что связано с возможностями различных топлив.

В лабораторной практике определенный интерес представляют газовые топливные смеси, при работе с которыми можно легко дозировать концентрации составляющих компонентов и тем самым перекрывать обширные области как по элементарному составу, так и по достигаемым при сгорании температурам. Для композиций из четырех элементов можно записать пять независимых линейных уравнений, соответствующих законам сохранения энергии, массы и элементарного состава (с учетом нормировки атомных долей элементов на единицу), которые связывают конечное и начальное состояние газа. Это означает, что число компонентов, составляющих исходную топливную смесь, для которых эта система уравнений может иметь единственное решение, тоже равно пяти.

Для достаточно широкого интервала изменения задаваемых параметров равновесия поставленная задача может быть решена, если в качестве базисных топливных компонентов выбрать ацетилен, водород, кислород, углекислый газ и азот. На выбор такого набора наталкивают чисто практические соображения. Процессы горения ацетилена и водорода в кислороде относятся к числу наиболее экзотермичных реакций, протекающих с большими скоростями. Необходимость азота очевидна, а добавлением углекислого газа можно плавно варьировать энергетику и атомный состав исходной топливной смеси. Уравнение реакции для выбранного набора топливных компонентов имеет вид



Здесь предполагается, что при полном сгорании топливной смеси достигается состояние химического равновесия при температуре T и давлении p , а получаемый состав соответствует заданному. Запишем систему уравнений, связывающих начальное и конечное состояние, используя законы сохранения энергии, массы и элементарного состава при адиабатном протекании процесса в изохорных условиях для массы в 1 кг

$$\sum_{i=1}^5 \alpha_i (I_{0i} - RT_0) = I_T - pV,$$

$$\sum_{i=1}^5 \mu_i \alpha_i = 1000, \quad (1)$$

$$q_1 = (2\alpha_1 + \alpha_4) / 2(\alpha_3 + \alpha_4), \quad q_2 = (\alpha_1 + \alpha_2) / (\alpha_3 + \alpha_4), \quad q_3 = \alpha_5 / (\alpha_3 + \alpha_4).$$

Здесь I_{0i} — полные мольные энтальпии компонентов исходной смеси в стандартных условиях [3]; I_T — полная энтальпия конечного состава, который характеризуется равновесными значениями температуры T ; давления p и объема V ; α_i — количество молей i -го компонента в килограмме; μ_i — грамм-молекулярные веса; q_i — заданные значения отношений атомарных элементов. Если $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4$ — соответственно атомные доли элементов C, H, O, N, то $q_1 = \xi_1 / \xi_3$; $q_2 = \xi_2 / \xi_3$; $q_3 = \xi_4 / \xi_3$, при

$$\text{этом} \quad \sum_{j=1}^4 \xi_j = 1.$$

Воспользовавшись целыми значениями молекулярных весов (что вносит незначительную погрешность в конечный результат), решение системы (1) через заданные расчетом значения параметров конечного состава можно записать в виде

$$\alpha_1 = Dq_1 - 0,5\alpha_4, \quad \alpha_2 = D(q_2 - q_1) + 0,5\alpha_4, \quad \alpha_3 = D - \alpha_4, \quad \alpha_5 = Dq_3, \quad \alpha_4 = \\ = \{D[I_{01}q_1 - RT_0(1 + q_2 + q_3)] - (I_T - pV)\} / |I_{04} - 0,5I_{01}|, \quad D = 500 / (12q_1 + \\ + q_2 + 14q_3 + 16).$$

Т а б л и ц а 1

Состав	Атомная композиция				Равновесный состав ($T=2000$ К, $p=10$ атм)				I_T' ккал/кг	V' м ³ /кг	Количество молей
	С	Н	О	N	CO ₂	N ₂	H ₂ O	O ₂			
I	0,08	0,04	0,28	0,60	0,176	0,664	0,044	0,108	-127,01	0,532	32,40
II	0,08	0,08	0,24	0,60	0,181	0,680	0,090	0,044	-226,51	0,544	33,20

Приведем в качестве примера результаты составления исходных топливных смесей по данным для двух равновесных составов, которые представлены в табл. 1. Атомные композиции, которым соответствуют эти составы, различаются только содержанием элементов Н и О. Термодинамический расчет равновесия для них, проведенный при $T=2000$ К и $p=10$ атм, показывает, что равновесные содержания углекислого газа в составах I и II практически равны между собой, а воды — отличаются почти в 2 раза. Полученный по изложенной схеме состав топливных смесей (в моль/кг) приведен в табл. 2.

При использовании данного способа вычислений имеется естественное ограничение, которое задается требованием вещественности решений системы уравнений (1) и выражается через неравенства вида

$$\alpha_i \geq 0.$$

Анализ этой системы неравенства приводит к следующим условиям:

$$\begin{aligned}
 q_1 \leq q_2 & \begin{cases} G - I' \leq \varepsilon_T/D \leq G, & \text{если } q_1 \geq 1/2 \\ G - 2q_1 I' \leq \varepsilon_T/D \leq G, & \text{если } 0 \leq q_1 \leq 1/2 \end{cases} \\
 q_1 \geq q_2 & \begin{cases} G - I' \leq \varepsilon_T/D \leq G - 2I'(q_1 - q_2), & \text{если } q_1 \geq 1/2 \\ G - 2q_1 I' \leq \varepsilon_T/D \leq G - 2I'(q_1 - q_2), & \text{если } 0 \leq q_1 \leq 1/2 \end{cases}
 \end{aligned}$$

где $\varepsilon_T = I_T - PV$; $I' = |I_{O_4} - 0,5I_{O_1}|$; $G = I_{O_1}q_1 - RT_0(1 + q_2 + q_3)$.

Физический смысл этих условий состоит в том, что они выявляют области по элементарному составу и по энергетике топливных композиций, которые моделируются сжиганием смесей на основе выбранного набора базисных компонентов. Диапазон такого моделирования можно существенно расширить, если в состав базисных компонентов ввести еще окись углерода и закись азота. Тогда для однозначного определения состава модельной смеси потребуется добавить к системе уравнений (1) дополнительные соотношения, связывающие концентрации компонентов с одинаковыми элементами, что несколько усложнит весь анализ.

Т а б л и ц а 2

Компонент	Топливная смесь*	
	I	II
C ₂ H ₂	1,256	0,853
H ₂	0,184	2,159
O ₂	6,832	4,718
CO ₂	3,248	4,318
N	21,60	22,59
Количество молей	33,120	33,638

* $T_0=293,15$ К

Экспериментальные результаты

Для выяснения возможностей реализации предлагаемой методики в лабораторных условиях проведено экспериментальное исследование процессов горения модельных смесей типа C₂H₂—H₂—CO—O₂—CO₂—N₂ в следующем диапазоне изменения основных атомных компонентов: $\xi_4=0,6$, $q_1 < 1$, $q_2 < 1$.

Эксперименты проводились в камере сгорания импульсного газодинамического лазера цилиндрической формы и объемом ~ 3 л, изготовленной из нержавеющей стали. Пульт наполнения, снабженный образцовыми манометрами и вакуумными кранами, обеспечивал расчетную дозировку отдельных компонентов топливной смеси в камере, парциальные давления которых p_i вычислялись через молярные концентрации α_i :

$$\frac{p_i}{p_0} = \frac{\alpha_i}{\sum_i \alpha_i},$$

где p_0 — начальное давление исходной топливной смеси, которое варьировалось в экспериментах от 2,5 до 5 атм. Использование воспламенителя позволило проводить устойчивые поджигания топливных смесей с разным соотношением горючего к окислителю во всем исследуемом диапазоне. Камера сгорания отделялась от соплового блока лазера специально подобранной диафрагмой из алюминия. Упрощенная схема установки показана на рис. 1.

Контроль за процессом сгорания модельной топливной смеси осуществлялся с помощью стандартного индукционного датчика ДД-10, сигналы которого записывались шлейфовым осциллографом Н-105. Тарировка датчика проводилась перед каждой серией экспериментов с помощью образцового манометра при наполнении камеры сгорания азотом. Датчик обладал линейной характеристикой в диапазоне частот 0—1000 Гц, что позволяло следить за кинетикой изменения давления в процессах, протекающих с характерными временами $\tau \geq 10^{-3}$ с.

Из термодинамического расчета следует, что сгорание исследуемых горючих смесей приводит к незначительному изменению полного количества молей в газе, которое не превышает 5%. В данной работе максимальные температуры, достигаемые при сгорании модельных смесей, вычислялись по измеряемому в опытах значению максимального давления p_{\max} с учетом изменения объема газа.

При сгорании модельных топливных смесей, для которых коэффициент избытка окислителя равен или больше единицы, в большинстве случаев достигаются температуры, близкие к задаваемым расчетным. При этом время горения $\tau_r < 10^{-1}$ с. Типичная осциллограмма давления

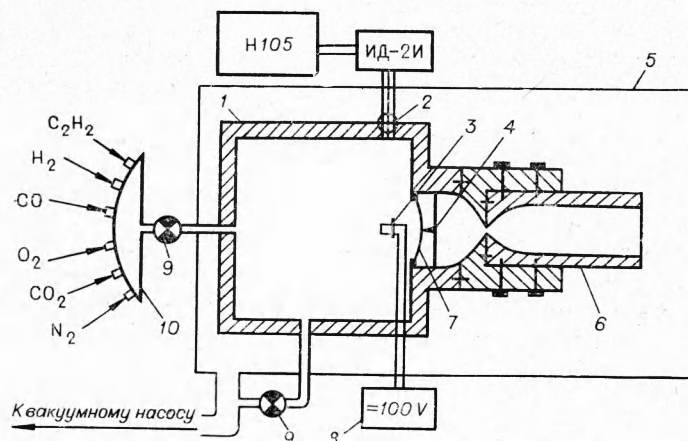


Рис. 1. Принципиальная схема установки.

1 — камера сгорания; 2 — датчик давления; 3 — воспламенитель; 4 — крестообразные ножи; 5 — вакуумный ресивер; 6 — щелевое сопло; 7 — диафрагма; 8 — источник питания; 9 — вакуумные краны; 10 — пульт наполнения камеры газовыми смесями.

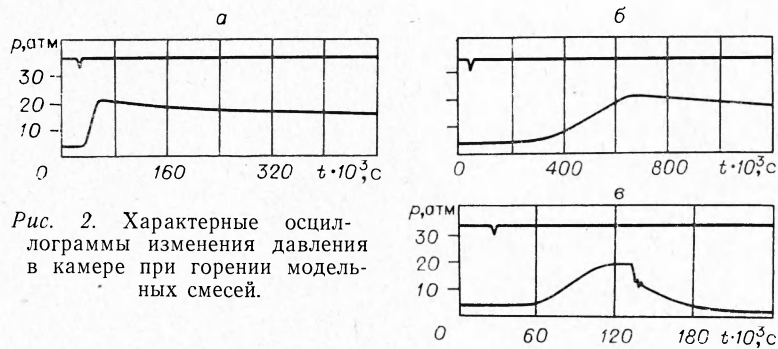


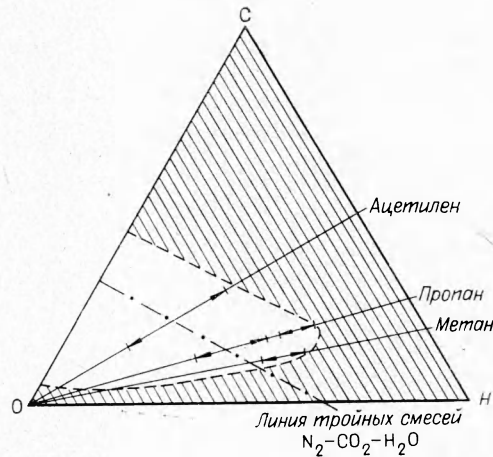
Рис. 2. Характерные осциллограммы изменения давления в камере при горении модельных смесей.

для горения с избытком окислителя представлена на рис. 2, а. Момент инициирования реакции в объеме совпадает с моментом разрыва электрической цепи, в которую включается воспламенитель, что позволяет с помощью контрольного шлейфа осциллографа точно фиксировать начало отсчета времени для процесса горения. После достижения максимального давления в камере происходит остывание высокотемпературной смеси. Регистрация всего процесса с помощью датчика давления дает возможность экспериментально оценить характерное время теплоотдачи в стенку τ_r . Обработка осциллограмм давления показала, что процесс остывания носит слабый экспоненциальный характер и хорошо аппроксимируется линейной зависимостью. Принимая за характерное время теплоотдачи время, за которое давление упадет в e раз, получим, что $\tau_r \approx 1,5$ с. Достиженные при сгорании смесей с избытком окислителя температуры, как правило, отличались от расчетных меньше, чем на 5%.

Сгорание модельных смесей с недостатком окислителя происходило в настоящих опытах за времена больше, чем 10^{-1} с, что приводило к заметным теплотерям. Типичная осциллограмма изменения давления для процесса горения этих смесей представлена на рис. 2, б. Все же экспериментально полученные температуры с поправкой на остывание оказались в хорошем согласии с расчетными температурами моделируемых составов. Возможности сокращения процесса сгорания исследуемых модельных смесей в этом случае, вероятно, следует искать в подборе более подходящего интервала начальных давлений (p_0) и в использовании других способов инициирования реакций.

Работая с импульсными или квазинепрерывными газодинамическими лазерами на горении, необходимо разделять во времени процесс получения высокотемпературной среды и процесс истечения этой среды через сопловой блок. Такое разделение процессов можно достигнуть использованием либо специально подобранной диафрагмы, либо клапанов, которые отделяют камеру сгорания от соплового блока лазера и открываются в момент, когда процесс горения завершен или, по крайней мере, близок к завершению. В описываемых экспериментах применялись калиброванные на раскрытие при определенном давлении диафрагмы из алюминия и дюраля толщиной 0,5–1 мм. Раскрытие диафрагмы осуществлялось четырьмя лепестками на крестообразных стальных ножах. Осциллограмма давления, характеризующая весь процесс работы газового генератора, представлена на рис. 2, в. Резкий скачок давления вниз после раскрытия диафрагмы обусловлен наличием предсопловой объема, который в описываемой установке составлял 1/4 объема камеры сгорания. Процессу квазистационарного истечения рабочей среды в вакуумный ресивер объемом 0,5 м³, который откачивался до $2 \cdot 10^{-1}$ мм рт. ст., предшествует небольшой период выравнивания давления по всему объему перед соплом. Этот период составляет

Рис. 3. Область составов по элементарным композициям С, Н, О-атомов, которые могут быть предложены в качестве рабочей среды для газодинамического CO_2 -лазера на горении [2].



около $3 \cdot 10^{-3}$ с, в то время как весь процесс истечения газа превышает $4 \cdot 10^{-2}$ с. Не составляет труда показать на основании законов сохранения энергии и массы для нагретого идеального газа, адиабатно и квазистационарно вытекающего из резервуара через сопло в вакуум, что в течение всего этого процесса будет происходить непрерывное изменение параметров торможения, температуры T_* и давления p_* :

$$T_*/T_{*0} = 1/(1+t/\tau_*)^2; \quad p_*/p_{*0} = (T_*/T_{*0})^{\gamma/(\gamma-1)},$$

где T_* и p_* — текущие значения параметров торможения, которые в начальный момент времени $t=0$ равны соответственно T_{*0} и p_{*0} ; γ — показатель адиабаты; τ_* — характерное время изменения температуры в резервуаре:

$$\tau_* = \frac{2 \frac{V}{S}}{(\gamma-1) \left(\frac{2\gamma}{\gamma+1} \right)^{1/2} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \sqrt{RT_{*0}}}$$

Здесь V — объем резервуара; S — площадь критического сечения сопла; R — газовая постоянная.

Такой режим работы позволяет в одном эксперименте получить обширную информацию об исследуемых лазерных характеристиках рабочей среды в зависимости от плавно меняющихся термодинамических параметров перед входом в сопло. Это отмечено также авторами работы [4], в которой проводилось исследование ГДЛ на горении углеводородно-воздушных смесей с использованием ацетилена, пропана и метана. Там же проводилась попытка моделирования процессов горения этих систем смесями типа $2\text{CO} + \text{H}_2$, $3\text{CO} + 4\text{H}_2$, $\text{CO} + 2\text{H}_2$ с воздухом. Поскольку значения теплот сгорания для выбранных в [4] модельных смесей отличаются от соответствующих значений для моделируемых топливных композиций, то это ведет к неадекватности достигаемых при горении в том и другом случае температур, а значит — и составов продуктов сгорания. Трудно согласиться также с утверждением авторов о том, что подобный набор модельных смесей перекрывает практически весь диапазон составов продуктов горения углеводородных топлив, наиболее перспективных для газодинамического CO_2 -лазера. Согласно анализу работы [2], диапазон составов, которые представляют интерес в плане их использования в качестве рабочих сред в ГДЛ на горении, можно наглядно показать на тройной диаграмме элементов С, Н, О (рис. 3). Разумно принять, что доля атомарного азота, которая задает масштаб изменения этих трех элементов на диаграмме, превышает 0,4. На рис. 3 отрезками со стрелками обозначены области композиций по элементарному составу, перекрываемые в работе [4].

Итак, рассмотренная в настоящей работе методика позволяет широко использовать процессы горения газовых модельных смесей для получения высокотемпературных составов, адекватных продуктам сгорания топливных композиций, которые объединяются условной формулой $C_aH_bO_cN_d$. Это дает возможность с небольшими затратами в лабораторных условиях экспериментально исследовать и оптимизировать лазерные характеристики предлагаемых соединений для ГДЛ. В общем случае вопросы моделирования составов процессами горения не исчерпываются рассмотренными здесь композициями четырех элементов и не ограничиваются использованием для этих целей только газовых смесей.

Авторы признательны Г. Н. Нечипоренко, Ю. М. Петрову и В. М. Шмелеву за полезные обсуждения и рекомендации.

Поступила в редакцию
21/1 1978

ЛИТЕРАТУРА

1. J. D. Anderson Jr. Gasdynamic Lasers: reviews and extensions, preprint, V International Colloquium on Gasdynamics of Explosions and Reactive Systems. France, Bourges, 8—11, September, 1975.
2. А. П. Генич, Н. В. Евтюхин, Г. Б. Манелис. ФГВ, 1975, 11, 5.
3. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Справочник. М., Изд-во АН СССР, 1962.
4. Г. И. Козлов, В. И. Иванов и др. ЖЭТФ, 1975, 68, 5.

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОПТЕРЬ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ПРОЦЕСС ЗАЖИГАНИЯ БЕЗГАЗОВЫХ СИСТЕМ ВОЛНОЙ ГОРЕНИЯ

А. Г. Струнина, В. И. Ермаков, В. В. Барзыкин

(Черноголовка)

Изучение закономерностей переходных режимов горения безгазовых систем при воздействии на них тепловой волной горящего воспламенителя проводилось в работе [1]. Система уравнений, описывающая развитие процесса, имеет вид

$$c_1 \rho_1 \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_1 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + Q_1 k_{01} \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right) \varphi(\eta) - \frac{2\alpha}{r}(T - T_0) - \frac{2\epsilon\sigma_0}{r}(T^4 - T_0^4), \quad (1)$$

$$\partial \eta / \partial t = k_{01} \exp(-E_1/RT) \varphi(\eta), \quad (2)$$

$$c_2 \rho_2 \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_2 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + Q_2 k_{02} \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right) \varphi(\eta) - \frac{2\alpha}{r}(T - T_0) - \frac{2\epsilon\sigma_0}{r}(T^4 - T_0^4). \quad (3)$$

$$\partial \eta / \partial t = k_{02} \exp(-E_2/RT) \varphi(\eta). \quad (4)$$