

Кинетические зависимости из работы [1], характеризующиеся первым порядком, удалось описать при $E_1 = 0,25$, $E_2 = 0,02$, $E_3 = 0,002$. Размерности E_i легко определить из формулы (20). Участок АВ, где есть зависимость от скорости потока, соответствует случаю, когда часть каталитического элемента работает в диффузионном режиме. Участок ВС соответствует чисто кинетическому режиму работы всего катализатора. Именно в этой области надо проводить эксперимент, если нужно получить данные, не искаженные влиянием массопереноса.

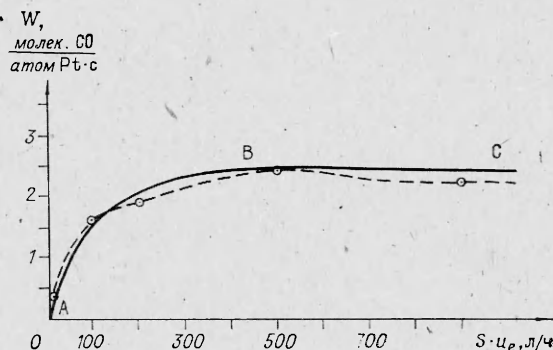


Рис. 2.

Сформулируем вывод работы. Обычно представления о протекании процессов во внешнедиффузионной области базируются на предположении о плоском пограничном слое с неизменным профилем концентраций по длине, не зависящим от скорости потока. В данной работе показана ограниченность этих представлений: для каждого катализатора существуют режимы работы, при которых скорость реакции существенно зависит от скорости обдувания поверхности потоком реагентов. При этом на одной части поверхности катализатора реакция протекает в диффузионном режиме, а на другой части — в кинетическом. Максимальная скорость реакции соответствует случаю, когда на всей поверхности реакции протекает в кинетическом режиме. В работе получен конкретный вид зависимостей скорости реакции и размеров области, где осуществляется кинетический режим реагирования, от внешних газодинамических параметров.

Поступила в редакцию 26/VII 1984

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. К. Боресков, В. И. Маршнева, Г. С. Яблонский и пр. Кинетика и катализ, 1984, 25, 3, 662.
2. Д. А. Франк-Каменецкий. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука, 1967.
3. Н. Н. Смирнов. Вест. МГУ, сер. 1. Математ., механ., 1982, 3, 69.
4. Н. Н. Смирнов. ФГВ, 1982, 18, 5, 63.
5. Н. Н. Смирнов. — В кн.: Тепломассообмен и теплофизические свойства веществ. Новосибирск, 1982.
6. Н. Н. Смирнов. ФГВ, 1983, 19, 1, 80.
7. Ю. В. Лапин. Турбулентный пограничный слой в сверхзвуковых потоках газа. М.: Наука, 1982.

ГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА С АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМОЙ ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕТИКИ ПРОЦЕССОВ В ГДЛ НА ГОРЕНИИ

*Л. П. Бахир, Ю. М. Беляков, Г. И. Левашенко,
С. В. Симоньков, В. В. Таманович, С. Л. Шуралев
(Минск)*

Газодинамическая установка ГДУ-Л-90 моделирует условия горения и получения активной среды в технологических CO_2 -ГДЛ на продуктах горения жидких углеводородных топлив и предназначена для исследо-

вания кинетики процессов при расширении продуктов сгорания в сверхзвуковом сопле. Установка оснащена скоростной инфракрасной аппаратурой с автоматической обработкой данных, позволяющей одновременно определять параметры рабочей среды на входе в сопло и на его срезе.

Газодинамическая установка

В ГДУ-*L*-90 сжатый первичный воздух нагревается электроподогревателем до температуры 600—700 К и в него через форсунку впрыскивается основное топливо. После прохождения испарительной трубы и завихрителя образуется гомогенная смесь, которая поступает в камеру сгорания с блоком воспламенения, в котором при помощи свечи поджигается смесь спирта с воздухом. Камера сгорания с внутренним диаметром 115 мм рассчитана на работу при давлениях до 20 атм. Вторичный воздух подается в промежуток между жаровой трубой и внутренней стенкой камеры. Через ряд отверстий в конце жаровой трубы он поступает в камеру смешения. Образовавшаяся смесь проходит через измерительную камеру с внутренним диаметром 90 мм и, расширяясь через плоское профилированное сопло с размерами критического сечения $0,4 \times 90$ мм и степенью расширения 21,2, образует активную лазерную среду. После прохождения канала сечением $8,5 \times 90$ мм продукты сгорания через диффузор, ресивер и выхлопной патрубок выбрасываются в атмосферу. Необходимое разрежение в канале создается при помощи эжектора с расходом воздуха до 1200 г/с. Система питания газодинамической установки сжатым воздухом состоит из компрессора МК-4,5/200 и двух баллонов емкостью по 500 м³, рассчитанных на давление 200 атм. Подача основного и пускового топлив осуществляется при помощи сжатого воздуха.

Меняя соотношение между количеством первичного воздуха и основного топлива в пределах $\alpha_1 = 1,0 \div 1,4$, можно изменять температуру горения и состав продуктов сгорания; подмешивая вторичный воздух до значений $\alpha_2 = \alpha_1 + \alpha_{11} = 2,0 \div 3,0$, обеспечивать более полное сгорание топлива, снижать температуру торможения перед соплом до 1000—1500 К и изменять состав рабочей среды. Пуск установки и вывод на режим осуществляются автоматически. Время рабочего цикла можно менять от 1 до 10 с.

Для определения параметров рабочей среды на входе в сопло разработана измерительная камера (рис. 1), в которой центральная часть струи выделяется с помощью вставки 1 и проходит через плоское профилированное сопло 6. Для моделирования условий горения в CO_2 -ГДЛ камера сгорания ГДУ-*L*-90 была рассчитана на расход продуктов сгорания до 500 г/с. В то же время расход через сопло не превышает 100 г/с. Поэтому избыточные продукты сгорания через газоотводы 4 и трубы перепуска 2 выбрасываются в атмосферу. В трубах перепуска установлены шары 3 с диаметром отверстий 12 мм. Изменяя диаметры отверстий в шарах, можно менять давление в камере.

Для проведения оптических измерений в центре камеры установлены оптические окна из BaF_2 , охлаждаемые водой. Для защиты поверхности окон от загрязнения продуктами сгорания и вытеснения их в струю участки между окнами и струей продуваются чистым азотом через два ряда радиально расположенных отверстий. Расход азота не превышает 1% от общего расхода продук-

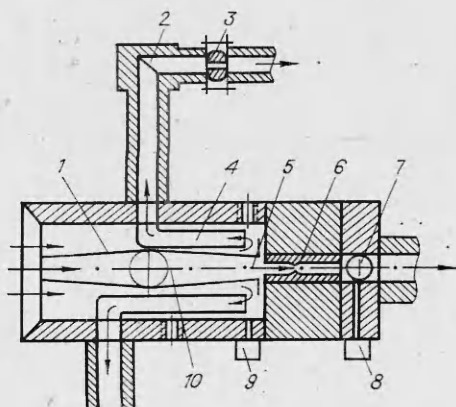


Рис. 1. Схема измерительной камеры.

тов сгорания. В центре камеры на оси струи установлена хромель-алюмелевая термопара 10 для сопоставления ее показаний $T_{тп}$ с температурами $T_{оп}$, измеренными оптическим путем. Температура T_0 и давление p_0 на входе в сопло измеряются хромель-алюмелевой термопарой 5 и датчиком давления ДДМ-25 9. Для определения параметров активной среды на срезе сопла предусмотрены оптические окна 7 из BaF_2 и датчик разрежения ИКД6ТД_а 8. Запись показаний термопар, датчиков давления и разрежения производится на светолучевом осциллографе Н 041.У4.2.

Скоростная инфракрасная аппаратура и методика измерений

Для определения параметров рабочей среды на входе в сопло используется фильтровый спектрофотометр «Свирель», а на его срезе — дифракционный спектрофотометр ДИКС-20 [1]. Оба прибора работают по одному принципу. Исследуемую среду просвечивают непрерывным излучением от источника, промодулированного с частотой f_1 . Собственное излучение среды модулируют с частотой $f_2 > f_1$. Излучение источника, прошедшее через среду, и излучение среды направляют на приемник излучения. Из общего сигнала приемника выделяют сигнал, пропорциональный излучению просвечиваемого источника, ослабленному средой, и сигнал, пропорциональный излучению исследуемой среды. Это позволяет производить запись во времени одновременно среднего спектрального пропускания и яркости излучения. Для определения абсолютных значений спектральной яркости излучения среды приборы градуируются по модели абсолютно черного тела. Поглощение среды находят по ослаблению прошедшего через нее излучения просвечиваемого источника. По поглощению \bar{a}_λ и яркости излучения среды B_λ из закона Кирхгофа находят значение функции Планка, а затем по нему — температуру среды, совпадающую на входе в сопло с равновесной, а на выходе из сопла — с колебательной температурой верхнего уровня 001 молекулы CO_2 . Содержание молекулярных составляющих определяют по \bar{a}_λ , используя рассчитанные зависимости поглощения от поглощающей массы $\bar{a}_\lambda = f(p, z)$ при измеренных температурах среды.

Спектрофотометр «Свирель» состоит из блоков осветителя и приемника, устанавливаемых по разные стороны измерительной камеры, блока управления и питания. В качестве источника излучения используется нихромовая ленточная лампа ЛЛН 2,5-30 с окном из BaF_2 , а в качестве приемника излучения — охлаждаемое фотосопротивление из $InSb$ (77 К). Частоты модуляции излучения источника и среды равны соответственно 900 и 4500 Гц. Перед приемником установлена кассета с фильтрами, имеющими максимальное пропускание при длинах волн 2,2, 2,53, 2,74, 3,9, 4,5 и 4,8 мкм. Спектрофотометр позволяет измерять одновременно спектральные яркости излучения и пропускания исследуемой среды на одной длине волны при неподвижном фильтре или при вращающейся кассете последовательно на шести длинах волн отдельными циклами длительностью 0,5 с при постоянной времени 0,006 с. Оптика спектрофотометра выполнена из флюорита, диаметр входных отверстий объективов равен 25 мм. и может быть уменьшен до 10 мм с помощью диафрагм. Светосила блоков в отсутствие диафрагм равна $0,001 \text{ см}^2 \cdot \text{ср}$. Для исключения влияния поглощения атмосферными газами CO_2 и H_2O предусмотрен продув оптико-механических блоков чистым азотом.

Выбор спектральных зон, используемых для определения температуры и содержания продуктов сгорания на входе в сопло, выполнен на основе анализа спектров поглощения (рис. 2), рассчитанных для температур и давлений, характерных для CO_2 -ГДЛ и атмосферных газов, с использованием средних спектральных коэффициентов поглощения H_2O , CO_2 , CO [2]. В предсопловой части среда характеризуется высокими дав-

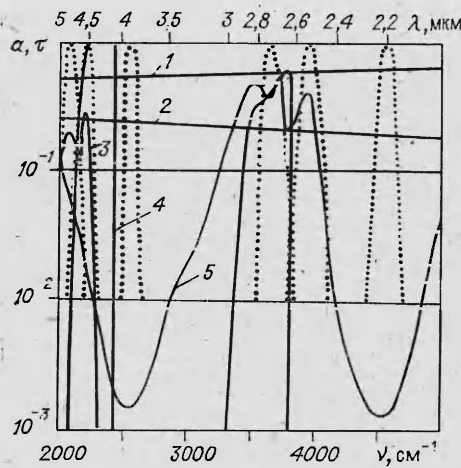


Рис. 2. Спектры поглощения CO (3), CO₂ (4), H₂O (5), частиц углерода (2) при $T = 1280$ К, $p = 11$ атм, $z = 9$ см, $r_{H_2O} = 0,06$; $r_{CO_2} = 0,06$; $r_{CO} = 0,01$; $p^C = 5$ г/м³, $d_{32} = 1,5$ мкм.

1 — пропускание частиц углерода; пунктирные кривые — пропускание светофильтров с $\lambda_{max} = 2,2; 2,54; 2,74; 3,9$ и $4,5$ мкм.

лениями и температурами и является равновесной. Вращательная структура колебательно-вращательных полос поглощения молекул H₂O и CO₂ размыта и в связи с этим спектральное поглощение этих газов можно рассчитывать по закону Бугера. При расчете поглощения CO следует пользоваться моделью полосы, так как даже при $T = 1500$ К и $p = 10$ атм спектральные линии CO достаточно изолированы ($\gamma = 0,28$ см⁻¹, $d \approx 1$ см⁻¹).

Температуру продуктов сгорания можно определять по яркости излучения при длине волны 4,5 мкм, приходящейся на крыло полосы 4,3 мкм — CO₂, где поглощение близко к единице даже при наличии крупных рассеивающих частиц, а поглощение атмосферным CO₂ отсутствует.

Объемные содержания r_{H_2O} и r_{CO_2} в продуктах сгорания можно определять по их пропусканию при длинах волн 2,53 и 2,74 мкм с помощью зависимостей спектрального пропускания H₂O и CO₂ от поглощающей массы $\tau_{2,53}^{H_2O} = f(p_{H_2O}z)$ и $\tau_{2,74}^{CO_2} = f(p_{CO_2}z)$, рассчитанных для набора температур и давлений по коэффициентам поглощения [2] с учетом кривых пропускания светофильтров. При определении пропусканий H₂O и CO₂ по экспериментально измеренным $\tau_{2,53}^a$ и $\tau_{2,74}^a$ необходимо учесть ослабление на частицах углерода. Для этого измеренные величины $\tau_{2,53}^a$ и $\tau_{2,74}^a$ делят на пропускание частиц при этих длинах волн, которое можно получить путем линейной интерполяции между измеренными пропусканиями при $\lambda = 2,2$ и $3,9$ мкм. Кроме того, пропускание, полученное при длине волны 2,74 мкм после учета влияния частиц углерода, необходимо разделить на пропускание паров воды при $\lambda = 2,74$ мкм, которое рассчитывается по измеренному по $\tau_{2,53}^{H_2O}$ содержанию. Таким образом, $\tau_{2,53}^{H_2O} = \tau_{2,53}^a / \tau_{2,53}^C$ и $\tau_{2,74}^{CO_2} = \tau_{2,74}^a / \tau_{2,74}^C / \tau_{2,74}^{H_2O}$.

Частицы углерода в продуктах сгорания углеводородных топлив характеризуются однократным режимом рассеяния, и для расчета их поглощения a_λ^C и ослабления τ_λ^C также применим закон Бугера

$$a_\lambda^C = 1 - \exp(-K_\lambda^C z), \quad \tau_\lambda^C = \exp(-K_\lambda^C z).$$

Пропускание и яркость излучения частиц углерода измеряются при $\lambda = 2,2$ и $3,9$ мкм, где газы не поглощают. По измеренному τ_λ^C определяют коэффициенты ослабления K_λ^C , а коэффициенты поглощения K_λ^C находят по поглощению a_λ^C , рассчитанному из закона Кирхгофа по измеренным яркости излучения частиц и температуре продуктов сгорания. Для определения содержания и средних размеров частиц рассчитывались зависимости полнораспределенных коэффициентов ослабления K_λ^C / C_v и поглощения K_λ^C / C_v , отнесенные к единице объема C_v , параметров Шустера $S_C = \frac{K^C - K^O}{K^O}$ и отношения $\bar{K}_{2,9}^C / \bar{K}_{3,9}^C$ от среднего диаметра частиц d_{32} (рис. 3). Расчет выполнялся по данным [3].

В области размеров $d_{32} < 0,2$ мкм ($K_{2,2}^0/K_{3,9}^0 \approx 3$) ослабление частицами обусловлено только их поглощением ($K^0 = K^n$), не зависит от размеров частиц и определяется их содержанием

$$\begin{aligned} K_{2,2}^0 &= 2,6 \cdot 10^4 C_v = 1,1 \cdot 10^4 \rho^C \quad (\text{г/см}^3), \\ K_{3,9}^n &= 0,95 \cdot 10^5 C_v = 4 \cdot 10^4 \rho^C \quad (\text{г/см}^3). \end{aligned} \quad (1)$$

При $d_{32} > 0,1 \div 0,2$ мкм размеры частиц можно находить по параметрам Шустера, а затем по известным d_{32} и K_λ^0 находят объемную концентрацию $C_v = \rho^C/2,3$, используя зависимость $K_\lambda^0/C_v = f(d_{32})$. При этом наибольшая точность определения размеров частиц приходится на область $d_{32} = 0,2 \div 1$ мкм. При $d_{32} > 2$ мкм ($K_{2,2}^0/K_{3,9}^0 \approx 1$) зависимость S_c от d_{32} имеет более плавный характер и точность определения размеров частиц ухудшается.

Имеется также возможность определять размеры частиц в диапазоне $d_{32} = 0,4 \div 1$ мкм по отношению $K_{2,2}^0/K_{3,9}^0$, которое в этой области изменяется в пределах от 4 до 1,25.

При малом массовом содержании частиц a_λ очень мало, его трудно измерить и определить температуру частиц непосредственно из закона Кирхгофа практически нельзя. В этом случае температуру частиц определяют по отношению измеренных яркостей излучения частиц при $\lambda = 2,2$ и $3,9$ мкм, воспользовавшись тем, что a_λ^C мало и пропорционально K^n :

$$\frac{B_{2,2}^C}{B_{3,9}^C} = \frac{K_{2,2}^n B_{2,2}^0(T^C)}{K_{3,9}^n B_{3,9}^0(T^C)}. \quad (2)$$

Для крупных частиц при $d_{32} > 1$ мкм K^n практически не зависят от длины волны и можно полагать $K_{2,2}^n/K_{3,9}^n = 1$. Тогда температуру частиц можно найти из отношения функций Планка

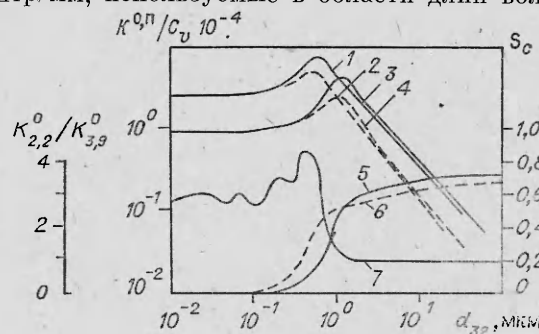
$$\frac{B_{2,2}^C}{B_{3,9}^C} = \frac{B_{2,2}^0(T^C)}{B_{3,9}^0(T^C)} = 5,6 \exp(-2850/T^C). \quad (3)$$

Для мелких частиц K^n не зависит от их размеров, а $K_{2,2}^n/K_{3,9}^n = 2,9$, тогда

$$\frac{B_{2,2}^C}{B_{3,9}^C} = 16,2 \exp(-2850/T^C). \quad (4)$$

Дифракционный спектрофотометр позволяет регистрировать пропускание и яркость только при фиксированной длине волны в области спектра 2—20 мкм с постоянной времени 0,05 с. Источник излучения — глобар. Излучение его проектируется зеркалами на ось струи, а затем на входную щель монохроматора ИКМ-1, за входной щелью которого установлены оптико-акустический приемник и фотоспротивление из InSb ($T = 77$ К). В комплект монохроматора входят зеркало Литтрова и три реплики 200, 100 и 50 штр/мм, используемые в области длин волн 2—15, 2,5—6, 5,5—12, 11—20 мкм и обеспечивающие спектральное разрешение на середине участков соответственно 3,2, 18, 0,5, 0,5 см⁻¹.

Рис. 3. Зависимость K^0/C_v , K^n/C_v и параметров Шустера при длинах волн 2,2 (1, 2, 6) и 3,9 мкм (3—5), а также отношения $K_{2,2}^0/K_{3,9}^0$ (7) от d_{32} .



Модуляция излучения глобара и струи осуществляется дисками с частотой 600 и 3000 Гц. Прибор снабжен герметичными кожухами, и воздух из него может откачиваться с целью исключения влияния поглощения атмосферными газами. Апертура прибора $\sin u = 0,1$.

На выходе из сопла среда является разреженной ($p_a = 20 \div 50$ торр) и колебательно-неравновесной. Спектральные линии характеризуются фойгтовским контуром, имеют полуширину $\gamma = 0,002 \div 0,003$ см⁻¹ и далеко отстоят друг от друга. Поэтому при расчетах колебательно-вращательных спектров активных сред используются модели полос и необходимо знать колебательные температуры мод T_1 , T_2 , T_3 , уровней, участвующих в переходе T_v , и поступательную температуру среды T . В центрах полос переходов в основное состояние функция Планка зависит только от колебательной температуры верхних уровней T_v [1]. Экспериментально определив с помощью дифракционного спектрофотометра ДИКС-20 значения функций Планка вблизи центров наиболее интенсивных полос молекул CO₂ 00⁰1—00⁰0, 10⁰1—00⁰0 и 01¹0—00⁰0 при частотах 2350, 3720 и 667 см⁻¹, найдем колебательные температуры уровней 00⁰1, 10⁰1, 01¹0, а из отношения функций Планка — $T_{10^0 0}$. Поскольку $T_{10^0 0} = T_1$, $T_{01^1 0} = T_2 = T$ и $T_{00^0 1} = T_3$ в условиях CO₂-ГДЛ, можно рассчитать кривые роста $\bar{a}_v = f(p, z)$ при частоте 2350 см⁻¹, с помощью которой по измеренному среднему спектральному поглощению a_{2350} найдем содержание CO₂. Далее, используя соответствующие выражения [1], найдем число колебательных квантов в первой и третьей модах молекулы CO₂ l_1 , l_3 удельный запас колебательной энергии $\epsilon_{\text{кол}}$, мощность, запасенную в потоке колебательной энергии $W_{\text{кол}}$, заселенности уровней $N_{10^0 0}$, $N_{00^0 1}$, максимальную мощность генерации P_{max} и коэффициент усиления исследуемой активной среды K_{v_3} .

Выходные сигналы спектрофотометров поступают в систему автоматизированной обработки данных, а также могут записываться на светолучевых осциллографах.

Система автоматизированной обработки данных состоит из устройства аналого-цифрового преобразования и сопряжения (АЦП-БС), ЭКВМ «Электроника ДЗ-28» и термопечатающего устройства. Аналоговые сигналы пропускания и яркости спектрофотометра «Свирель», а также сигналы датчиков температуры и давления, синхронизируемые импульсами, соответствующими включению определенных светофильтров, поступают в 4-канальный аналоговый коммутатор, где производится прием, выделение и запоминание их максимальных амплитуд, а затем преобразуются в цифровой код. Цифровая информация, получаемая в аналого-цифровом преобразователе (АЦП), поступает в оперативное запоминающее устройство (ОЗУ), где накапливается и хранится до передачи в ЭКВМ или выключения прибора. Информация, накапливаемая в ОЗУ, по команде с ЭКВМ подается в блок сопряжения (БС), где преобразуется из двоичного кода в двоично-десятичный, а затем передается в ЭКВМ для численного расчета по заранее введенной программе. За один оборот кассеты (6 фильтров) происходит 24 измерения. Емкость ОЗУ, состоящего из 512 × 8 разрядов, обеспечивает прием информации за 12 циклов измерений в течение 6 с работы установки.

Для автоматизированной обработки данных, получаемых при неподвижном фильтре спектрофотометра «Свирель» и на дифракционном спектрофотометре ДИКС-20, в устройстве АЦП-БС предусмотрена запись сигналов через 0,01 с, обеспечиваемая синхронизированными импульсами с внутреннего генератора. Для уменьшения влияния пульсаций усреднение сигналов в ЭКВМ проводится по 5—10 измерениям.

Обсуждение экспериментальных результатов

Температура и состав продуктов сгорания могут отличаться от рассчитанных по среднему значению коэффициента избытка воздуха в связи с незавершенностью процесса горения, обуславливающей присутствие в потоке частиц углерода, газообразных углеводородов и СО, а также из-за некорректности учета теплопотерь. Поэтому в первых экспериментах исследовалась возможность экспрессного определения температуры и состава продуктов сгорания на входе в сопло, необходимых для расчета параметров активной среды, а также проведено сравнение температур, измеренных оптическим путем и с помощью термопары.

Измерения проведены на одном режиме работы установки при сжигании керосина ТС-1 в воздухе. Расходы первичного, вторичного воздуха и керосина составляли соответственно 125, 170 и 8,6 г/с, коэффициент избытка первичного воздуха $\alpha_1 = 1,0$, суммарный коэффициент избытка воздуха $\alpha_s = \alpha_1 + \alpha_{II} = 2,3$. Первичный воздух нагревался до температуры 620 ± 20 К, вторичный воздух имел температуру 296 ± 2 К. Время горения составляло 6 с.

Расходы первичного и вторичного воздуха рассчитывались по давлениям перед мерными шайбами диаметром 4,3 мм. Расход керосина определялся экспериментально путем проливки его в емкость при давлении перед жиклером, равном перепаду давлений на нем при установившемся горении. Одновременно с измерениями спектрофотометром «Свирель» записывали показания датчиков температур, давления и разрежения на светолучевом осциллографе. Температуру определяли оптическим путем с неподвижным фильтром с $\lambda_{\max} = 4,5$ мкм, при этом наблюдали пульсации яркости и пропускания среды с частотой 30–40 Гц и глубиной до 10%, которые усреднялись в пределах 0,1 с.

На рис. 4 приведено типичное изменение во времени температур $T_{оп}$, $T_{тп}$ и T_0 в течение одного пуска установки. В связи с малой постоянной времени спектрофотометра «Свирель» при воспламенении смеси наблюдается резкий подъем оптической температуры до 1600 К, затем наступает постепенно замедляющийся спад. Подъем температур, измеренных термопарами, и T_0 до максимальных значений (порядка 1350 К) происходил за 1,5–2 с в связи с более инерционным прогревом корпуса термопары, по сравнению с прогревом термосиала. На участке горения в течение 3–5,5 с температуры оставались практически постоянными. Поэтому сопоставление $T_{оп}$ и $T_{тп}$ проводилось по их средним значениям на этом участке. Различие температур в центре измерительной камеры в трех пусках не превышало 10°. T_0 была на 40–70° ниже $T_{тп}$ в центре камеры. Среднеквадратичная погрешность определения $T_{оп}$ при неподвижном фильтре составляла 3,5%, а $T_{тп}$ — 1%.

Таким образом, наблюдается совпадение $T_{оп}$ и $T_{тп}$ на участке установившегося горения. Различие же показаний термопар на входе в сопло и в центре камеры, конструктивно одинаково выполненных и установленных на расстоянии всего 45 мм друг от друга на оси струи, может быть объяснено лишь образованием вблизи соплового блока застойной зоны, имеющей более низкую температуру из-за большего теплоотвода в стенку. В связи с этим, а также из-за более высокой точности определения температуры на участке установившегося горения с помощью термопары при

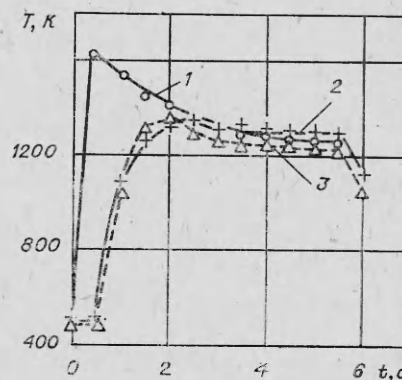


Рис. 4. Изменение во времени температуры в центре измерительной камеры, измеренной оптическим путем $T_{оп}$ (1) и термопарой $T_{тп}$ (2), и температуры на входе в сопло T_0 (3).

Номер пуска	$\bar{r}_{\text{H}_2\text{O}}$, %	\bar{r}_{CO_2} , %	\bar{T}_0 , К	\bar{p}_0 , атм
1	6,4	4,9	1280	11,4
2	6,3	5,0	1290	11,2
3	6,7	4,0	1270	11,2
4	7,0	3,9	1280	11,4
5	6,6	3,8	1280	11,7
6	6,6	3,8	1280	11,6

расчете параметров активной среды на срезе сопла следует пользоваться значениями температуры торможения T_0 , измеренными термопарой на входе в сопло.

При определении температуры и состава продуктов сгорания в течение одного пуска измерения проводились с вращающейся кассетой. Усреднение пульсаций за время прохождения фильтра 0,02 с приводило к увеличению ошибки при обработке данных. Среднеквадратичная погрешность определения $T_{\text{оп}}$ возрастала до 5%. Среднеквадратичные погрешности определения содержаний $r_{\text{H}_2\text{O}}$ и r_{CO_2} равнялись соответственно 10 и 25%. Большие ошибки в определении r_{CO_2} обусловлены необходимостью учета поглощения не только частицами, но и парами воды.

В таблице приведены средние на участке установившегося горения (3,5—5,5 с) для каждого пуска значения объемных содержаний $\bar{r}_{\text{H}_2\text{O}}$ и \bar{r}_{CO_2} при средних параметрах торможения \bar{T}_0 и \bar{p}_0 . Осредненные в 6 различных пусках $\bar{r}_{\text{H}_2\text{O}} = 6,6\%$ и $\bar{r}_{\text{CO}_2} = 4,2\%$ при $\bar{T}_0 = 1280$ К и $\bar{p}_0 = 11,4$ атм. Разброс значений в каждом пуске от осредненных составил для $r_{\text{H}_2\text{O}}$ от $-4,5$ до $+6\%$, а для r_{CO_2} от -10 до $+20\%$ и хорошо согласуется с величинами погрешностей измерений, не выходя за их пределы.

Измерения на длине волны 2,2 и 3,9 мкм показали, что частицы углерода ослабляют излучение просвечивающего источника почти в 2 раза, коэффициенты ослабления частиц слабо зависят от длины волны, $K_{2,2}^0 \approx K_{3,9}^0$. Это свидетельствует о том, что частицы имеют диаметр $d_{32} > 1$ мкм. Более точно определить размер частиц не удалось, поскольку отношение $\bar{K}_{2,2}^0 / \bar{K}_{3,9}^0 \approx 1$ лежит вблизи области неопределенности значений d_{32} , а измеренные параметры Шустера частиц $S_c = 0,8 \div 1$ по величине превосходят максимально возможные для аморфного углерода (см. рис. 3). Температура частиц, найденная по отношению функций Планка $B_{2,2}^0 / B_{3,9}^0$, $\bar{T}_{\text{ср}}^C = 1080$ К, что на 200° ниже температуры газообразных продуктов сгорания.

Все это дает основание предполагать, что в продуктах сгорания наряду с частицами углерода присутствуют неполностью испарившиеся капли топлива, обогащенные углеродом в результате крекинга, что обуславливает пониженное содержание CO_2 в продуктах сгорания, т. е. даже при гомогенной схеме горения, реализованной в ГДУ-Л-90, возможно неполное сгорание топлива. В дальнейших экспериментах необходимо провести измерение содержания CO , получить уточненные данные по параметрам частиц и содержанию H_2O и CO_2 при более высоких значениях d_1 и температуре первичного воздуха и добиться равных объемных содержаний r_{CO_2} и $r_{\text{H}_2\text{O}}$ в рабочей смеси.

Таким образом, первые эксперименты показали необходимость и возможность экспрессного определения содержания газообразных продуктов сгорания и частиц на входе в сопло спектрофотометром «Свирель», а также совпадение температур, измеренных оптическим путем и с помощью термопары на участке установившегося горения. При расчете параметров активной среды на срезе сопла необходимо использовать состав продуктов сгорания, измеренный спектрофотометром «Свирель»,

а температуру и давление торможения, измеренные при помощи датчиков на входе в сопло.

Созданная газодинамическая установка с контролируемыми с помощью автоматизированной системы диагностики параметрами рабочей среды может быть использована для исследования кинетики процессов в ГДЛ на горении перспективных жидких топлив.

Поступила в редакцию 2/IV 1984

ЛИТЕРАТУРА

1. **Л. П. Бахир.** Определение заселенностей колебательных уровней молекулы CO_2 в газодинамических лазерах на продуктах горения методами инфракрасной спектроскопии. Препринт Института физики АН БССР. Минск, 1978.
2. **C. B. Ludwig, W. Malkmus, J. E. Reardon e. a.** Handbook of Infrared Radiation from Combustion Lasers. NASA. Washington DC, 1973.
3. **А. Г. Блох.** Тепловое излучение в котельных установках. Л.: Энергия, 1967.

РАСЧЕТ КРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИНИЦИИРОВАНИЯ ТВЕРДЫХ ВВ УДАРОМ НА КОПРЕ

А. В. Дубовик, М. В. Лисанов
(Москва)

Разработан численный метод расчета известных характеристик механической чувствительности твердых взрывчатых веществ (ВВ) — критических давления инициирования $p_{кр}$ и толщины образца $\delta_{кр}^0$, определяемых в опытах с ударом на копре [1]. В основу расчета положены новейшие теоретические и экспериментальные результаты исследований механического поведения тонких образцов твердых органических веществ, в том числе взрывчатых, при ударе [1—5]:

1. Большая пластическая деформация образцов неустойчива. При достаточно быстром приложении осевой нагрузки достигается состояние, когда деформации образца растут, а его несущая способность катастрофически уменьшается. При этом непрерывная сетка линий скольжения в образце перестраивается в локализованные полосы «адиабатического» сдвига. Вещество в них подвергается сильному разогреву, тогда как в промежуточных областях остается текучим, по холодным. Полосы сдвига со временем становятся линиями разрывов прочности и разрушения образца.

2. Продукты разрушения образца первоначально состоят из треугольных (в сечении) фрагментов, контактирующих между собой боковыми сторонами, а с поверхностями ударника и наковальни — вершинами и основаниями. С течением времени треугольники деформируются в трапеции, при этом их вершины истираются, а основания удлиняются. Предполагается, что диссипативный разогрев на контактных границах этих фигур в критических условиях нагружения достаточен для возникновения взрыва. Причем источником тепловыделения является трение на плоскостях скольжения, удельная сила которого равна пределу прочности (текучести) вещества на сдвиг.

Величина разогрева вещества зависит от природы прочностного разрыва на контакте. На боковых поверхностях фрагментов разрушения образца имеет место контакт ВВ — ВВ (обозначим индексом 1), на их основаниях — ВВ — металл (2), если поверхность ударника (наковальни) гладкая, или ВВ — ВВ (3), если на ней имеются микронеровности (обычно размером несколько микрометров).

Оценки температур вещества на контактных границах фрагментов в целом подтвердили вывод об эффективности трибомеханического разогрева при инициировании ВВ [6, 7]. Однако их выполняли вне связи