

зультатов работы [1] и формулы (5), возможно возбуждение неустойчивости горения, определяющееся в основном величиной производной $d \ln RT/d\alpha$ при заданной конструкции горелки.

На рис. 4 приведены также границы устойчивости в правой части плоскости режимных параметров, лежащие вне рабочей области горелки. Появление подобных границ закономерно, так как при $\alpha \rightarrow \infty$ горение исчезает и поток должен стабилизироваться.

Таким образом, проведенный анализ свидетельствует о качественном соответствии теории эксперименту даже в области относительно больших чисел Струхала ($1 > Sh > 0,3$). При больших величинах Sh для объяснения «поворота» экспериментальной кривой при $m \sim 1 \cdot 10^{-3}$ кг/с необходимо привлечение более совершенной теории.

Государственный институт прикладной химии,
Ленинград

Поступила в редакцию
6/XI 1975

ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Тарасюк. Теплофизика высоких температур, 1974, 12, 3, 632.
2. В. А. Тарасюк. Теплофизика высоких температур, 1974, 12, 4, 842.
3. Т. А. Первицкая, А. П. Скабин, В. А. Тарасюк.— В сб.: Горение и взрыв. М., «Наука», 1972.

СКОРОСТНОЙ ИНФРАКРАСНЫЙ СПЕКТРОПИРОМЕТР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАМЕН КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ

Л. П. Бахир, Г. И. Левашенко

В настоящей работе описывается комплекс аппаратуры, предназначенный для исследования процессов горения конденсированных систем при повышенных давлениях по ИК-излучению.

Сжигание образцов производится в камере постоянного давления с внутренним диаметром 80 и высотой 450 мм. В камере имеется два окна диаметром 25 и толщиной 20 мм, изготовленные из кристаллов CaF_2 или NaCl , предназначенные для измерений в инфракрасной области спектра. Перпендикулярно им расположена другая пара окон из оптического стекла размерами $20 \times 100 \times 24$ мм для фотографирования пламени. Окна рассчитаны на работу при давлениях до 60 кг/см^2 .

Основная часть аппаратуры — скоростной инфракрасный спектропирометр, позволяющий регистрировать во времени одновременно спектральную яркость и прозрачность пламени с целью определения продольных профилей температур по методу лучеиспускания и поглощения, а также концентраций отдельных излучающих компонент по высоте пламени; измерять абсолютные излучательные способности пламени в сочетании со скоростной регистрацией спектров в широком диапазоне длин волн при различных режимах сканирования.

Оптическая схема спектропирометра приведена на рис. 1.

В первом оптическом блоке градуировочный источник 1 проектируется сферическим зеркалом 2 ($d=85 \text{ мм}$, $f=214 \text{ мм}$) и плоским зеркалом 3 в камеру постоянного давления на плоскость проходящего через ось образца 7 с увеличением в 1,3 раза. Поворотным зеркалом 4 излучение от источника может быть направлено в пирометрическую головку,

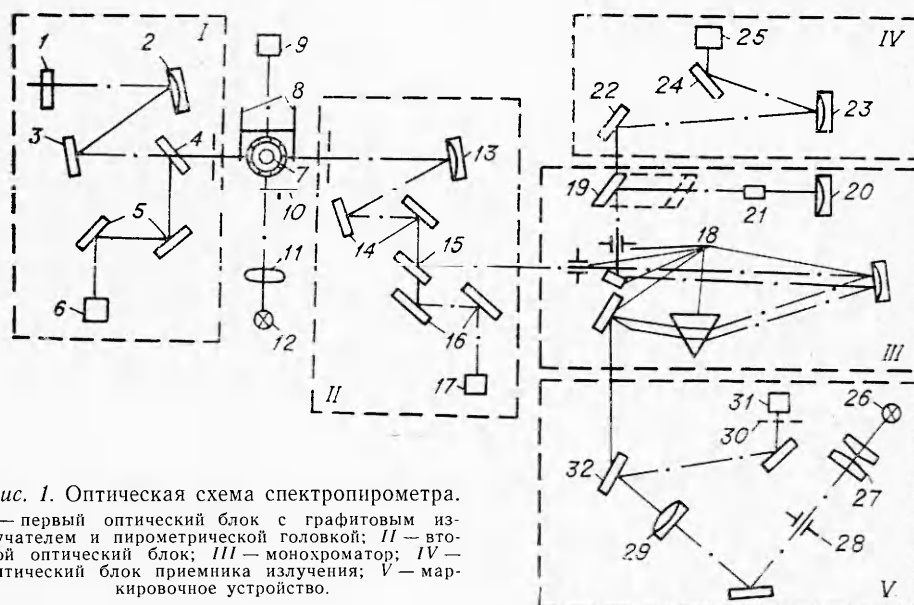


Рис. 1. Оптическая схема спектропирометра. I — первый оптический блок с графитовым излучателем и пирометрической головкой; II — второй оптический блок; III — монохроматор; IV — оптический блок приемника излучения; V — маркировочное устройство.

состоящую из двух плоских зеркал 5 и двух фотодиодов 6, расположенных в плоскости изображения источника.

Во втором оптическом блоке изображение источника (образца) с помощью сферического зеркала 13 ($d=85$ мм, $f=214$ мм) и трех плоских зеркал 14 и 15 поворачивается на 90° и проектируется с увеличением в 1,3 раза на входную щель монохроматора ИКС-11. Зеркало 15 частично прозрачно ($\tau=0,1$) и изображение источника (образца) зеркалами 16 направляется также на матовое стекло 17 для визуального наблюдения за установкой образца относительно щели монохроматора.

Далее следует оптика монохроматора 18. Передвижным плоским зеркалом 19 и сферическим 20 ($d=75$ мм, $f=50$ мм) выходная щель монохроматора проектируется с уменьшением в 3,7 раза на приемную площадку фотодиода ФД-3 21. Фотодиод со стеклянной призмой Ф-1 используется для регистрации излучения в области длин волн $0,7 \div 1,6$ мкм.

Для измерений в области спектра $1,6 \div 8,5$ мкм используется германиевое фотосопротивление с размерами приемной площадки 3×3 мм, легированное золотом Ge(Au), охлаждаемое жидким азотом, и призма из NaCl. В этом случае излучение выводится за пределы монохроматора в четвертый оптический блок. Выходная щель монохроматора проектируется зеркалами 23, 24 ($d=80$ мм, $f=90$ мм) на приемную площадку фотосопротивления 25 с трехкратным уменьшением.

Маркировка спектров по длинам волн осуществляется с помощью специального электронно-оптического устройства, выполненного по схеме Сильвермана [1] и размещенного в пятом оптическом блоке. Нить лампы накаливания СЦ-78 26 проектируется объективом 27 с двукратным увеличением на щель 28 высотой 6 мм и шириной 0,06 мм. Далее конденсор 29 проектирует изображение щели, увеличенное в 1,5 раза, на пластинку 30 размером 20×20 мм, которая имеет 50 вертикальных штрихов разной высоты, полученных фотографическим способом. За штриховой пластинкой установлен фотоумножитель ФЭУ-27 31 с плоским фотокатодом. При колебании зеркала 32, укрепленного на одной оси с зеркалом Литтрова, изображение освещенной щели совершает возвратно-поступательное движение вдоль пластинки со штрихами. Изменение яркости изображения нити при прохождении через пластинку

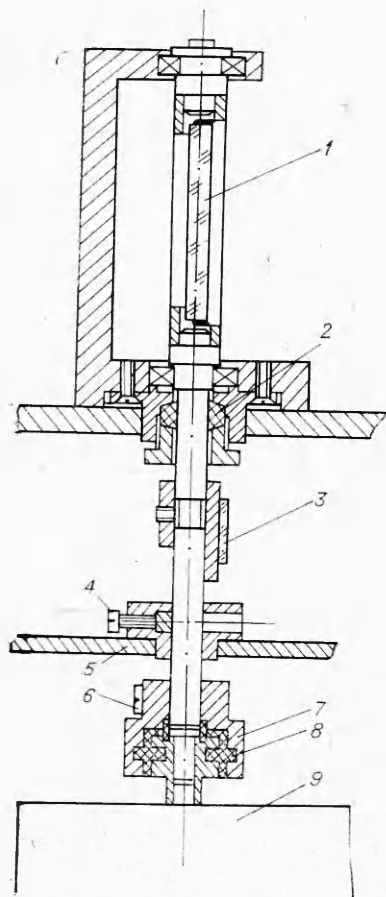


Рис. 2. Узел сканирования спектропирометра.

1 — зеркало Литтрова; 2 — тефлоновая втулка; 3 — зеркало маркировочного устройства; 4 — винт установки режима работы спектропирометра; 5 — рычаг барабана длин волн; 6, 7 — муфта с винтом для крепления оси зеркал с осью шагового двигателя; 8 — герметик; 9 — шаговый двигатель.

задается звуковой частотой, которую задает звуковой генератор. Звуковой генератор собран на лампах 6Ж1П и 6П14П с термистором ТП 6/2 и дает на выходе синусоидальный сигнал с амплитудой 6 В и частотой 30÷600 Гц. Сигнал подается на вход переключающего устройства, состоящего из формирователя импульсов, триггера и усилителя, выполненных по схеме, примененной в серийном блоке управления шаговыми двигателями БУ-160.

При импульсном включении второй секции зеркало поворачивается на некоторый угол, а при отключении возвращается в исходное положение. С увеличением частоты угол размаха уменьшается вначале очень медленно от 3,75 до 3° в области частот 30÷150 Гц, а затем более резко и при 300 Гц составляет 1,2°. При установке среднего положения зеркала на 5 мкм углу размаха 3° соответствует область сканирования 1,5÷7,5 мкм, а углу 1,2°—3,5÷6,5 мкм. Спектральная область сканирования изменяется поворотом оси зеркала относительно оси двигателя при включенной первой секции с помощью механизма барабана длин волн монохроматора ИКС-11. Для этого необходимо отсоединить ось крепления зеркал от муфты, отжав винт 6 (см. рис. 2), и подсоединить ее к рычагу 5 винтом 4. Установка синхронной записи спектра и маркировочной кривой осуществляется поворотом зеркала 3 на оси двигателя.

Механизм барабана длин волн при отключенном шаговом двигателе используется также для выведения на щель требуемой длины волны при работе прибора в режиме пирометра. В этом случае для одновременной записи спектральной яркости и пропускания пламени излучение источника модулируется с частотой 400 Гц, а излучение пламени, просвеченного источником,— с частотой 1200 Гц с помощью дисковых обтюрато-

со штрихами преобразуется фотоумножителем в маркировочный сигнал.

Колебание зеркал, сканирующего и маркировочного, осуществляется с помощью шагового двигателя ШД-4 [2]. Конструкция крепления зеркал и соединения с осью шагового двигателя и рычагом барабана длин волн монохроматора ИКС-11 показана на рис. 2. Для уменьшения момента инерции колеблющихся деталей зеркало Литтрова сделано круглым (диаметр 60, толщина 6 мм) и поставлено в оправу из легкого сплава на герметик УТ-34. Применение герметика в муфте позволило резко снизить передачу вибраций от двигателя к зеркалам. Подавление высокочастотных вибраций достигается применением тефлоновой втулки 2, фильтрации высокочастотных импульсов на обмотках статора с помощью диодов Д226 с набором сопротивлений, а также демпфирующим винтом двигателя. В шаговом двигателе используются две секции по две обмотки каждая. Одна из них включена постоянно (24 В; 1,3 А), а другая переключается с частотой, которую задает звуковой генератор. Звуковой генератор собран на лампах 6Ж1П и 6П14П с термистором ТП 6/2 и дает на выходе синусоидальный сигнал с амплитудой 6 В и частотой 30÷600 Гц. Сигнал подается на вход переключающего устройства, состоящего из формирователя импульсов, триггера и усилителя, выполненных по схеме, примененной в серийном блоке управления шаговыми двигателями БУ-160.

При импульсном включении второй секции зеркало поворачивается на некоторый угол, а при отключении возвращается в исходное положение. С увеличением частоты угол размаха уменьшается вначале очень медленно от 3,75 до 3° в области частот 30÷150 Гц, а затем более резко и при 300 Гц составляет 1,2°. При установке среднего положения зеркала на 5 мкм углу размаха 3° соответствует область сканирования 1,5÷7,5 мкм, а углу 1,2°—3,5÷6,5 мкм. Спектральная область сканирования изменяется поворотом оси зеркала относительно оси двигателя при включенной первой секции с помощью механизма барабана длин волн монохроматора ИКС-11. Для этого необходимо отсоединить ось крепления зеркал от муфты, отжав винт 6 (см. рис. 2), и подсоединить ее к рычагу 5 винтом 4. Установка синхронной записи спектра и маркировочной кривой осуществляется поворотом зеркала 3 на оси двигателя.

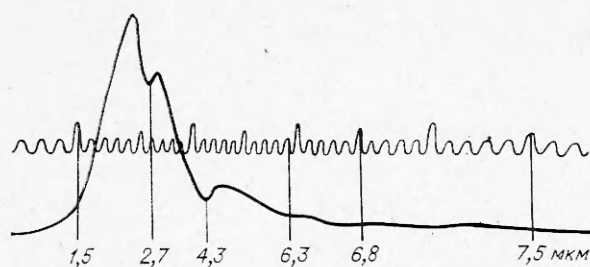


Рис. 3. Спектр излучения градуировочного источника с атмосферными полосами поглощения.

ров, расположенных по обе стороны камеры постоянного давления. Диски имеют диаметр 380 мм, укреплены на одной оси и приводятся во вращение с помощью двух двигателей постоянного тока 2Д-60.

При работе в режиме спектрометра сигнал от фотосопротивления усиливается в 300 раз широкополосным предусилителем с полосой пропускания $5 \div 5 \cdot 10^6$ Гц и записывается на одном из каналов двухлучевого электронного осциллографа. Сигнал от фотодиода ФД-3 поступает на вход осциллографа без предварительного усиления. Маркировочная кривая записывается на другом канале осциллографа. Фотографирование с экрана осциллографа осуществляется фотоаппаратом «Зоркий-6», а также скоростной кинокамерой СКС-1М на непрерывно движущуюся пленку (призма кинокамеры удалена, электронная развертка осциллографа выключена).

На рис. 3 приведен спектр излучения градуировочного источника с атмосферными полосами поглощения при частоте сканирования 200 спектров/с, скважности 1,5, ширине щели 0,2 мм, апертуре 0,05, температуре излучателя 2000 К. Из рисунка видно, что скорость колебания оси шагового двигателя неравномерна, что вместе с нелинейной дисперсией призмы NaCl приводит к существенной неравномерности сканирования спектра. В этой связи проводится очень подробная градуировка маркировочной кривой по длинам волн с помощью интерференционных и дисперсионных фильтров, а также полос поглощения атмосферы и органических пленок. Относительно низкая разрешающая способность спектрометра, особенно в коротковолновой части спектра, вызвана применением призмы NaCl, а также вибрацией зеркал. Однако для исследования пламен при высоких температурах и давлениях, когда имеет место сильное уширение полос излучения, высокого спектрального разрешения не требуется. В то же время широкая спектральная область сканирования позволяет с помощью интерференционного фильтра, отсекающего область до 4,0 мкм, исследовать спектральную область от 1,5 до 7,5 мкм за два приема без перестройки угла сканирования спектрометра. Следует отметить, что частота сканирования спектрометра равна удвоенной частоте звукового генератора и изменяется в пределах 60—600 Гц.

При работе прибора в режиме пирометра сигнал от фотодиода или фотосопротивления (с предусилителем) разделяется на два сигнала с частотами 400 и 1200 Гц с помощью двух узкополосных усилителей. Каждый усилитель состоит из трех резонансных каскадов усиления на лампах 6Н2П с двойными Т-образными мостами, настроенными соответственно на частоты 380, 400, 420 Гц и 1175, 1200 и 1225 Гц. Благодаря этому частотные характеристики усилителей имеют плоские вершины, и небольшие колебания скорости вращения дисков обтюраторов не сказываются на амплитудах выходного сигнала. Делители напряжения на входе усилителей позволяют уменьшать входные сигналы в 2; 5 и 10 раз. Сигналы с выходов усилителей поступают на двухлучевой ос-

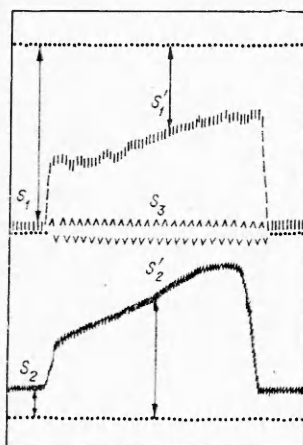


Рис. 4. Типичная осциллограмма пламени конденсированной системы.

S_1 и S_1' — сигналы, записанные при частоте 400 Гц; S_2 и S_2' — сигналы, записанные при частоте 1200 Гц, до и во время горения образца; S_3 — отметчик времени, расстояние между двумя соседними пиками 0,02 с.

(на нем нанесена риска, соответствующая положению щели монохроматора) с точностью 0,05 мм с помощью диоптрийной трубки. Для контроля за качеством горения образца и определения положения образца относительно щели пламя фотографируется скоростной кинокамерой СКС-М. В процессе съемки пламя периодически с помощью дискового обюратора 10 просвечивается температурной лампой Си10-300 12, нить которой спроектирована в пламя линзой 11 с пятикратным увеличением (см. рис. 1). Это позволяет обнаруживать малейшие признаки задымления оптического пути.

Образец поджигается нихромовой проволокой, накаливаемой электрическим током. Время горения образцов измеряется фотоэлектросекундомером, а также по отметчикам времени кинокамер СКС-1М и шлейфового осциллографа. Включение тока, скоростных кинокамер, муфты барабанной кассеты шлейфового осциллографа с опережением или запаздыванием относительно момента поджигания образца осуществляется через реле времени дистанционно с помощью переносной кнопки. Реле времени собраны на тиротронах МТХ-90, которые вынесены на переднюю панель электронного блока спектропирометра для визуального наблюдения за процессом включения.

Градуировочным источником излучения служит модель абсолютно черного тела, выполненная в виде горизонтально расположенной графитовой трубки с прямоугольной щелью размером 1×10 мм², накаливаемой электрическим током [3]. Графитовая трубка помещена в кожух с окном из CaF_2 или NaCl , наполняемый аргоном до давления 20 атм и охлаждаемый водой. Температура излучателя регулируется от 600 до 3200 К путем изменения тока выпрямителя ВУ 12/600 с помощью регулятора напряжения РНТ-220-6. Поскольку графитовый излучатель нестабилен во времени, предусмотрено быстрое измерение его температуры пирометрической головкой, которая предварительно градуируется следующим образом. С помощью поворотного зеркала, введенного внутрь камеры, излучение графитового источника направляется на оптический яркостный пирометр через прямоугольное окно (стекло вынуто). Сразу же после измерения яркостной температуры излучение источника направляется на пирометрическую головку и записывается фо-

циллограф для визуального наблюдения за процессом измерений, а также через катодные повторители и детекторы — на измерительные шлейфы светолучевого осциллографа. Постоянная времени регистрирующих трактов составляет 0,01 с. Типичная осциллограмма горения приведена на рис. 4. Пропускание пламени находится по отношению сигналов S_1' и S_1 с частотой 400 Гц, измеренных во время и до горения образца, $\tau = S_1'/S_1$. Спектральная яркость пламени $b_{\lambda}^{\text{пл}}$ находится по величине сигнала $S_{\text{пл}}$, равного разности сигнала S_2' с частотой 1200 Гц от пламени, просвеченного излучателем, и некоторой добавки от излучателя τS_2 на частоте 1200 Гц.

При исследованиях продольных профилей температур и концентраций отдельных излучателей, а также изменения спектров излучения по высоте пламени образец устанавливается на 1—2 мм выше щели монохроматора. Измерение расстояния от щели до среза образца и проверка их параллельности производится по матовому стеклу 17 (см. рис. 1)

ток. В области температур $1200 \div 3200$ К используется эталонный оптический пирометр ЭОП-66 ($\lambda_e = 0,65$ мкм), а в области $600 \div 1200$ К — визуальный инфракрасный яркостный пирометр ВИП-350 ($\lambda_e = 1$ мкм) [4]. Для области низких температур в пирометрической головке используется фотодиод ФД-3, а для высоких — фотодиод КФДМ. Фототок регистрируется микроамперметром М-131, встроенным в основание первого оптического блока.

Градуировка спектропирометра по абсолютным спектральным яркостям проводится сразу же после сжигания образца. При этом запись сигналов по каналу 1200 Гц осуществляется при снятом первом диске обтюлятора. Спектральные яркости излучения графитового излучателя в камере постоянного давления рассчитываются по формуле

$$B_{\lambda}^{\text{н}} = r_{\lambda}^2 \cdot \tau_{\lambda}^{\text{к}} \cdot \tau_{\lambda}^{\text{н}} \cdot B_{\lambda}^{\circ}(T_{\text{н}}),$$

где $B_{\lambda}^{\circ}(T_{\text{н}})$ — яркость черного тела при истинной температуре излучателя, найденной по измеренной с помощью пирометрической головки яркостной температуре излучателя $T_{\text{я}}$ из выражения

$$B_{\lambda_e}^{\circ}(T_{\text{н}}) = B_{\lambda_e}^{\circ}(T_{\text{я}}) / r_{\lambda_e}^3 \cdot \tau_{\lambda_e}^{\text{к}} \cdot \tau_{\lambda_e}^{\text{н}},$$

где r_{λ} — спектральное отражение зеркал; $\tau_{\lambda}^{\text{к}}$ и $\tau_{\lambda}^{\text{н}}$ — спектральное пропускание окон в камере и в излучателе, определяемые экспериментально.

Погрешности определения яркостной температуры излучателя при λ_e , равных 0,65 и 1 мкм, не превышают 0,5 и 0,3% соответственно. Погрешности градуировки спектропирометра по абсолютным значениям спектральных яркостей в диапазоне длин волн $1,0 \div 8$ мкм составляют $15 \div 5\%$ для низких температур и $5 \div 4\%$ для температур выше 2000 К без учета поглощения атмосферными газами. Для уменьшения влияния атмосферного поглощения предусмотрен продув всей оптической системы инертным газом.

При измерениях продольных профилей температур и концентраций по ИК-излучению принципиальным ограничением пространственного разрешения является искривление горячей поверхности образца. Даже при тщательной подготовке торцевой поверхности образца трудно добиться параллельности горения слоев лучше 0,2 мм при диаметре образца 10 мм даже для такой однородной по структуре конденсированной системы, как порох Н. Для обеспечения пространственного разрешения 0,2 мм апертура прибора должна быть уменьшена до $\sin u = 0,02$, а высота щели — по крайней мере до 6 мм. Это приводит к уменьшению потока, регистрируемого спектрометром

$$\Phi_{\lambda} = \tau_{\lambda}^4 r_{\lambda}^4 \pi B_{\lambda}^{\text{н}} \sin^2 u S_{\text{из}} \Delta \lambda,$$

в 70 раз. Одновременно в связи с ограничением действующего отверстия объектива монохроматора спектральная разрешающая способность его уменьшается в 5 раз и составляет при $\lambda = 2; 4$ и 8 мкм соответственно 0,05; 0,1 и 0,2 мкм. Потери потока можно восполнить, лишь увеличивая ширину щели, которая, исходя из требования пространственного разрешения, может достигать 0,25 мкм. Однако, если имеется потребность в полном использовании спектрального разрешения монохроматора, например при измерении концентраций, то ширина щели при длинах волн 2 и 4 мкм должна быть ограничена до 0,05 и 0,15 мм. При регистрации спектров излучения по высоте пламени в широком диапазоне волн (см. рис. 3) оптимальной является ширина щели 0,2 мм, так как в этом случае действительное спектральное разрешение будет примерно постоянным и равным 0,2 мкм.

Согласно экспериментальной проверке прибора при апертуре 0,02, размерах щели $0,2 \times 4$ мм, отношение сигнала к шуму 10 и 3 (соответственно при работе в режиме пирометра и спектрометра) может быть получено при яркостных температурах пламени или излучателя 1000, 1200 и 2200 К при длинах волн соответственно 2,4 и 6 мкм. Увеличение апертуры до 0,05 приводит при тех же длинах волн и размерах щели к расширению нижнего предела измерений температур до 750, 900 и 1250 К соответственно. При полном заполнении объектива монохроматора, имеющего апертуру $\sin u = 0,11$, отношение сигнала к шуму возрастает в 4 раза. Однако размеры разрешаемого по высоте участка пламени возрастут до 1 мм при диаметре образца 10 мм.

*Институт физики БССР,
Минск*

*Поступила в редакцию
16/VI 1975*

ЛИТЕРАТУРА

1. S. Silverman. JOSA, 1948, 38, 664.
2. В. А. Ратмиров, Б. А. Ивоботенко. Шаговые двигатели для систем автоматического управления, М.—Л., Госэнергоиздат, 1962.
3. Л. П. Бахир, Г. И. Левашенко. ЖПС, 1970, XII, 1.
4. Л. П. Бахир. ЖПС, 1965, II, 2.

О РЕЖИМАХ ПРОТЕКАНИЯ ЦЕПНЫХ РЕАКЦИИ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ФОТОИНИЦИИРОВАНИИ

Г. К. Васильев, Е. Ф. Макаров, Ю. А. Чернышев

Для многих реакций, инициируемых импульсным облучением, как было показано Норришем с сотрудниками (см., например, [1]), характерно наличие критических явлений: в зависимости от начальных условий — энергии инициирования, температуры, концентраций реагентов, полного давления смеси — реакция либо протекает во взрывном режиме, характеризующемся практически полным превращением реагентов, либо останавливается на достаточно малых глубинах превращения реагентов. При этом переход от одного режима к другому происходит при малом изменении начальных условий. В последнее время критические явления были обнаружены еще для целого ряда фотоиницируемых реакций (см., например, [2]). Попытка количественного описания критических явлений, а также кинетического поведения смеси $D_2 + F_2$ при импульсном фотоинициировании была проведена в [3] на базе представлений о тепловом ускорении реакции, которые, как известно, лежат в основе теории теплового взрыва Н. Н. Семенова [4] и других критических явлений в химической кинетике [5].

Цель настоящей работы — общее рассмотрение критических условий взрыва при импульсном фотоинициировании цепных реакций. Рассматривается также влияние саморазогрева на кинетику процесса.

Математическая постановка задачи

При рассмотрении режимов протекания фотоиницируемой цепной реакции сделаем два основных допущения. Во-первых, будем пренебрегать процессами массо- и теплопереноса, в частности теплоотводом,