

поступит меньше, процесс сгорания ухудшится, амплитуда акустических колебаний уменьшится, поэтому возрастет  $n$ . Процесс будет повторяться.

Таким образом, становится ясно, что эффект модуляции возникает за счет изменения коэффициента инжекции при акустических колебаниях.

Казанский государственный  
университет

Поступила в редакцию  
6/1 1975

## УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ПРОТЕКАНИЯ ЭКЗОТЕРМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ В ПОТОКЕ

А. А. Бутаков, Э. И. Максимов

Во многих областях техники и химической технологии используются различные устройства, в которых имеет место поток химически реагирующих веществ. Это ракетные камеры, факельные горелки, форсунки, проточные химические реакторы.

К основополагающим работам в области исследования закономерностей протекания химической реакции в потоке следует отнести теоретические работы Зельдовича, Франк-Каменецкого, Мержанова. Экспериментальные исследования закономерностей теплового взрыва, воспламенения и горения в потоке методами, развитыми применительно к изучению горения конденсированных взрывчатых веществ, позволили получить ряд ценных результатов [1—3]. Однако необходимо отметить трудности, стоящие на этом пути. Во-первых, время разложения образца ВВ (в случае летучих ВВ — время испарения), обеспечивающего поток химически реагирующего газа, мало. Во-вторых, высокие температуры газового потока и узкие зоны химической реакции затрудняют снятие количественных характеристик процесса. В-третьих, ограничены возможности изменения скорости потока, условий теплообмена, гидродинамики. В значительной мере перечисленные недостатки присущи и моделям ЖРД [4].

При создании данной установки руководствовались следующими требованиями: 1) возможность варьирования начальных и граничных условий в широком диапазоне, 2) строгость физической модели и высокая точность поддержания заданных значений параметров, 3) возможность получения большого объема информации как о стационарных, так и нестационарных закономерностях процесса, 4) малогабаритность установки, малый расход реагирующего вещества, большие времена непрерывной работы.

Принципиальная схема установки изображена на рисунке. Основным элементом установки является длинная трубка из нержавеющей стали, по которой движется поток реагирующей жидкости. В опытах использовались реакционные трубки длиной 286 и 645 мм с внутренним диаметром 4 и 6 мм. Толщина стенок реакционной трубки — 1 мм.

С целью уменьшения размеров установки реакционная трубка делалась в виде змеевика. Диаметр змеевика много больше диаметра трубки ( $D/d \geq 17$ ), поэтому кривизна ее не оказывала влияния на гидродинамическую картину течения в исследуемом диапазоне скоростей ( $v_0 = 0,1 \div 3$  см/с). Большое расстояние между двумя соседними витками змеевика ( $l = 60$  мм) исключало взаимное тепловое влияние соседних участков реактора. Данное утверждение было проверено экспериментально.

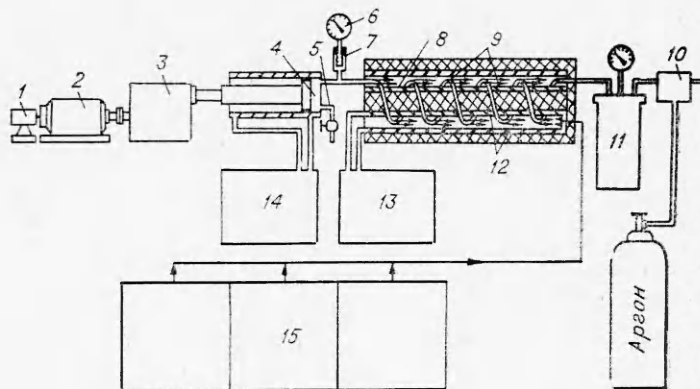


Схема установки.

1 — датчик расхода; 2 — электропривод; 3 — шестеренчатый редуктор; 4 — цилиндр вытеснения; 5 — загрузочный патрубок; 6 — манометр; 7 — сиффон; 8 — реакционная трубка; 9 — термопары; 10 — устройство, поддерживающее постоянное давление в приемном бункере; 11 — приемный бункер; 12 — теплообменник; 13, 14 — термостаты; 15 — блок регистрации.

Змеевик реакционной трубки помещен в кольцевом зазоре теплообменника, выполненного в виде двух коаксиально расположенных медных цилиндров с винтовыми каналами, по которым циркулировал теплоноситель (глицерин). Длина цилиндров теплообменника — 90 см. Заданная температура теплообменника обеспечивалась подачей глицерина из термостата и могла меняться от 20 до 250°C. Особое внимание уделялось обеспечению постоянства температуры по всей поверхности теплообменника. С этой целью наружная поверхность внешнего цилиндра теплообменника была тщательно теплоизолирована. Кроме того, с целью увеличения скорости циркуляции теплоносителя, центробежный насос термостата 13 был заменен погружным шестеренчатым насосом, подающим глицерин из ванны термостата в теплообменник с расходом 12 л/мин.

Изменение размеров воздушного зазора, по средней окружности которого расположен змеевик реакционной трубки, влияло на коэффициент теплоотдачи от реакционной трубки на теплообменник ( $\alpha$ ). Для устранения конвективного движения воздуха в зазоре пространство вокруг реакционной трубки заполнялось кремнийорганическим пухом с объемной плотностью  $\leq 0,01$  г/см<sup>3</sup>. Особое внимание было обращено на постоянство величины  $\alpha$  по всей длине реакционной трубки. Это достигалось тщательной центровкой змеевика реакционной трубки относительно цилиндров теплообменника при помощи тонких конусных распорок из асбоцемента.

Проверка постоянства значений величины  $\alpha$ , а также ее измерение проводилось методом регулярного режима [5] (по темпу нагрева инертной жидкости, быстро закаченной в реакционную трубку). При толщине воздушного зазора 24 мм и наружном диаметре реакционной трубки 8 мм величина  $\alpha$  (при температуре теплообменника 100°C) была постоянна по всей длине реактора и равна  $2,5 \cdot 10^{-4}$  кал/(град·см<sup>2</sup>·с).

Малые значения  $\alpha$  приводят к тому, что значение критерия  $Bi$ , характеризующего меру отношения термического сопротивления среды внутри реакционной трубки к термическому сопротивлению среды вне ее, становится мало ( $Bi = \alpha r / \lambda \ll 1$ ). В этом случае значение температуры в поперечном сечении реакционной трубки можно считать постоянной величиной [6]. Поэтому данная установка позволяет изучать влияние только продольных переносов. Но, с другой стороны, отсутст-

вие распределения температуры в радиальных сечениях реакционной трубки позволяет значительно упростить снятие информации о продольном распределении температуры. А именно, в этом случае спай термопар, регистрирующих температуру в различных участках длины реакционной трубки, не обязательно помещать внутри трубки, а достаточно плотно прикрепить к ее наружной поверхности.

В установке использовались хромель-алюмелевые термопары, прокатанные в месте спая до 20 мкм. Они обхватывали реакционную трубку с таким расчетом, чтобы место спая плотно прилегало к ее поверхности. Термопары прикреплялись на равных расстояниях друг от друга, и в зависимости от длины реактора число их составляло 13 и 27 шт. Сигналы термопар регистрировались с помощью многоточечных электронных автоматических потенциометров типа ЭПП-09.

Реагент подавался в реакционную трубку с помощью дозатора, состоящего из цилиндра вытеснения, шестеренчатого редуктора и электропривода постоянного тока с электронной стабилизацией скорости вращения (марки ПТ-ЗР). Подачей воды из термостата (14) в рубашку цилиндра вытеснения обеспечивалась заданная начальная температура реагентов, которая могла варьироваться от 20 до 100°C. Цилиндр вытеснения имел объем 1,5 л.

Вращательное движение вала электропривода посредством редуктора преобразовывалось в поступательное движение поршня в цилиндре вытеснения. Расход реагента можно было менять как плавным изменением подаваемого на электропривод напряжения, так и ступенчатым переключением шестерен редуктора в пределах от 0 до 500 мл/мин.

В процессе опытов в системе приемный бункер — реактор — цилиндр вытеснения можно было поддерживать давление до 80 атм путем создания газовой подушки (аргон) над поверхностью продукта в приемном бункере. При этом устройство 10, состоящее из газового редуктора и вентиля тонкой регулировки с выходом в атмосферу, обеспечивало постоянство давления в приемном бункере, несмотря на изменение объема, занимаемого продуктами реакции. Давление в приемном бункере и на входе в реактор контролировалось с помощью манометров. Сильфонное устройство предназначено для предотвращения попадания реакционного вещества в чувствительный элемент манометра. Все детали установки, контактирующие с реакционным веществом, были изготовлены из нержавеющей стали.

Датчик расхода представляет собой электродвигатель постоянного тока (ИДР-6), используемый в качестве электротехометра, меняющего величину электрического сигнала в зависимости от скорости вращения вала электропривода.

Погрешность в определении температуры поверхности реакционной трубки дифференциальными термопарами не превышала 0,5°C, максимальное отклонение значений расхода реагента от заданной величины — 3%, перепад температуры по длине теплообменника — 1°C, погрешность в определении значений  $\alpha$  не превышала 20%.

Порядок проведения опытов был следующим. При заданной температуре теплообменника реактор, цилиндр вытеснения и приемный бункер продувались потоком аргона. Затем в цилиндр вытеснения закачивалась реакционная смесь. После того, как реакционная смесь в цилиндре вытеснения принимала заданную начальную температуру, включался электропривод и поршень начинал вытеснять ее в реакционную трубку. Затем в системе создавалось давление (подачей аргона в приемный бункер), которое препятствовало кипению реакционной смеси.

По показаниям термопар следили за распределением температуры по длине реакционной трубки и установлением в ней стационарного теплового режима, соответствующего начальным и граничным условиям эксперимента. В процессе опытов менялись температура теплообмен-

ника, скорость движения реагента, концентрация реагирующих веществ, начальная температура реагента, диаметр и длина реакционной трубки и коэффициент теплоотдачи. Результаты исследований, проведенных на данной установке, опубликованы в работах [7—9].

Авторы выражают благодарность В. Г. Абрамову за внимание к работе и ценные советы.

Отделение института  
химической физики  
АН СССР, Черногоровка

Поступила в редакцию  
13/IV 1975

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Мержанов, А. К. Филоненко. Изв. АН СССР, ОХН, 1963, 560.
2. А. Г. Мержанов, А. К. Филоненко. Докл. АН СССР, 1963, 152, 1, 143.
3. А. Г. Мержанов, А. К. Филоненко. Изв. АН СССР. Сер. хим., 1964, 8, 1509.
4. А. Р. Абульханов, В. В. Белый, В. Б. Либрович. Докл. АН СССР, 1974, 215, 6, 1352.
5. Г. М. Кондратьев. Тепловые измерения. М.—Л., Машгиз, 1957.
6. P. G. Gray, M. I. Haugre. Trans. Faraday Soc., 1959, 55, 581.
7. А. А. Бутаков, Э. И. Максимов. Докл. АН СССР, 1973, 209, 13.
8. А. А. Бутаков, Э. И. Максимов. Матер. Пятой всесоюзной конференции по моделированию химических процессов и реакторов. Уфа, 1974.
9. А. А. Бутаков, Э. И. Максимов. ФГВ, 1975, 11, 5.

#### ДИНАМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПЛЕКСИГЛАСА В ВОЛНАХ РАЗГРУЗКИ

*А. М. Молодец, Г. И. Канель*

Плексиглас широко используется в ударно-волновых экспериментах. Знание его динамических характеристик необходимо для планирования эксперимента и обработки экспериментальных результатов.

Предметом данного сообщения является определение хода изменения состояния оргстекла при разгрузке после ударного сжатия до давлений 60—140 кбар. Ударные волны с амплитудой 141 кбар получены с использованием алюминиевого ударника толщиной 5 мм, имеющего скорость  $2,75 \pm 0,1$  км/с, 94 кбар — ударом плексигласовой пластиной толщиной 6 мм со скоростью  $3,1 \pm 0,05$  км/с, 60 кбар — ударом алюминиевой пластиной толщиной 7 мм, разогнанной до скорости  $1,95 \pm 0,05$  км/с. В последнем случае на поверхность исследуемого образца со стороны подлетающего ударника наклеивался медный экран толщиной 5 мм.

Диаметр плоского участка подлетающей пластины в момент соударения во всех случаях был не меньше 65 мм. Ударник разогнался взрывным устройством, описанным в [1].

Исследуемый образец составлялся из нескольких пластин толщиной от 1,5 до 10 мм. На разных расстояниях от поверхности соударения в образце располагались манганиновые датчики давления [2]. Типичная осциллограмма опыта приведена на рис. 1, а. На профиле волны разгрузки не наблюдается особенностей, характерных для упруго-пластической разгрузки, как, например, для алюминия в [3].

Непосредственно из эксперимента определялась скорость фронта ударной волны  $D$ . Давление за фронтом ударной волны (ФУВ)  $p_\phi$  находилось по измеренной  $D$  с использованием ударной адиабаты, полу-