

исчезновению зоны рециркуляции и реализации струйного режима истечения. Использование дискретной кольцевой струи могло бы улучшить процесс смесеобразования в донной области, однако такое течение существенно трехмерно. Перенос места вдува на периферию торцевой поверхности тела при тех же параметрах потоков не привел к положительным результатам.

Результаты численного моделирования «комбинированного» воздействия на след представлены на рис. 5. В этом случае подача топлива по периферии течения и умеренный вдув ($n = 3$) водорода вдоль оси симметрии течения осуществлялись одновременно. При этом донное давление (см. рис. 5, а) вследствие теплового и механического воздействий на след почти вдвое превышало давление в набегающем потоке. Число M обратного течения (см. рис. 5, б) при наличии донного вдува уменьшается; структура течения в донной области соответствует столкновению двух встречных струй. Зона рециркуляции переобогащена топливом и горение происходит в основном вдоль ее внешней границы. Увеличение значения n центральной струи (до 20—30) приводит в конечном итоге к полному исчезновению зоны рециркуляции (см. рис. 6, а) и реализации струйного режима горения в ближнем следе. Давление в донной области определяется особенностями развития течения в сильно недорасширенной струе и слабо зависит от размеров донного среза. Такой режим истечения реализуется при существенно большем давлении ипжекции, чем в случае подачи топлива кольцевой струей.

На рис. 6, б приведены изолинии статической температуры смеси, наглядно иллюстрирующие положение зон интенсивного тепловыделения в потоке при наличии сильного вдува.

Автор признателен П. К. Третьякову за полезные обсуждения результатов работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Aerodynamics of Base Combustion. Progress in Astronautics and Aeronautics. Vol. 40, N. Y., 1976.
2. В. К. Баев, В. И. Головичев, П. К. Третьяков и др. Горение в сверхзвуковом потоке. Новосибирск: Наука, 1984.
3. П. С. Коконинская, Б. М. Павлов, В. М. Паскопов. Численное исследование сверхзвукового обтекания тел вязким газом. М.: Изд-во МГУ, 1980.
4. В. И. Головичев. ФГВ, 1983, 19, 1.
5. В. И. Головичев, П. И. Яценко. Докл. АН СССР, 1983, 272, 3.
6. N. L. Rapagnani, D. W. Lankford.— In: Flames, Lasers, and Reactive Systems. Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 88, N. Y., 1983.
7. В. М. Ковеня, П. И. Яценко. Метод расщепления в задачах газовой динамики. Новосибирск: Наука, 1981.
8. J. E. Hubbard et al. AIAA Paper 77—925, 1977.

Поступила в редакцию 6/VII 1984,
после доработки — 24/VI 1985

ЯВЛЕНИЕ БИСТАБИЛЬНОСТИ И ВЛИЯНИЕ СЛАБЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ОСЦИЛЛЯЦИОННОЕ ОКИСЛЕНИЕ ПРОПАНА

С. Г. Бернатосян, А. А. Мангашян

(Ереван)

Существование колебательных процессов в окислительных реакциях представляет в настоящее время большой интерес [1—5]. Исследования осцилляционного режима окисления пропана в проточных условиях показали, что в зависимости от начальных параметров системы могут наблюдаться как затухающие, так и стабильные осцилляции [6—8]. Последние, в свою очередь, бывают гармоническими, квазигармоническими

и релаксационными [7]. Показана взаимосвязь осцилляций с явлениями холодного пламени и отрицательного температурного коэффициента скорости реакции (ОТК). Осцилляции наблюдаются в зонах ОТК (при окислении пропана [7, 8]) или нулевого температурного коэффициента [9, 10] (при окислении пропилена [11]).

В настоящем сообщении приводятся результаты, полученные при изучении влияния небольших возмущений на стабилизированное холодное пламя и стабильные осцилляции при окислении пропана. Некоторые аспекты этого вопроса теоретически рассмотрены в работе [12]. В [10] замечено, в частности, что при наложении возмущения путем понижения температуры стабилизированного холодного пламени в системе возникают слабые осцилляции по температуре. Подобного рода периодические пульсации пламени наблюдались в [13] при перепускании пропиленокислородной смеси из реактора с высокой температурой, уже прореагировавшей до глубокого выгорания реагентов, в другой реактор, находящийся при температуре возникновения холодных пламен. Однако в настоящее время нет определенной точки зрения на влияние возмущений в осцилляционном режиме окисления углеводородов. Задача изучения устойчивости стабилизированного холодного пламени и осцилляционного режимов окисления углеводородов, поиска путей управления ими представляет также практический интерес как для технологических процессов, так и для реализации горения углеводородного топлива в различных устройствах (в двигателе внутреннего сгорания, в камере газотурбинного двигателя и т. п.).

Эксперименты проводились для эквимолярной пропанокислородной смеси ($C_3H_8 : O_2 = 1 : 1$) на проточной установке, подробно описанной в [6], в двухсекционном цилиндрическом реакторе ($d_1 = d_2 = 60$ мм; $l_1 = 310$; $l_2 = 130$ мм), позволяющем стабилизировать холодное пламя и изучать процесс осцилляций методом термометрического зондирования. Температура в первой секции реактора поддерживалась постоянной в пределах $T_1^0 = 566 \div 570$ К, а во второй, где фиксировались осцилляции или стабилизированное холодное пламя, начальная температура T_2^0 изменялась в пределах 570—620 К. Давление реагирующей смеси составляло 35—45 кПа, а время контакта во второй секции реактора варьировалось от 5 до 80 с.

В данной работе использованы два метода исследования. В первом случае к осцилляциям переходили от области медленной реакции к области стабилизированного холодного пламени повышением температуры. От эксперимента к эксперименту при переходе к более высокой температуре реактор предварительно откачивался. При этом в установившемся режиме определялись характеристики колебаний. Во втором случае в область существования осцилляций переходили от режима стабилизированного холодного пламени путем понижения температуры. При этом реактор также предварительно откачивался и в каждом установившемся режиме определялись характеристики осцилляций. Как показали результаты экспериментов, при этих двух подходах отмечаются несовпадения областей параметров существования осцилляционного режима, т. е. наблюдается гистерезис. Существование гистерезиса при окислении пропана обнаружено также в работах [14, 15].

На рис. 1 приводятся области существования различных режимов окисления пропана (τ_c — время контакта). Сплошными линиями показаны границы областей, полученные путем понижения температуры, а штриховыми — повышением. Штрихованная область соответствует параметрам, при которых наблюдается гистерезис. Таким образом, в процессе низкотемпературного окисления при одних и тех же начальных параметрах реализуются два различных состояния системы, т. е. наблюдается явление бистабильности. В качестве примера на рис. 2 показаны возникновение и установление различных режимов осцилляционного процесса при одних и тех же исходных параметрах, полученных путем повышения (рис. 2, а) или уменьшения (рис. 2, б) начальной температуры

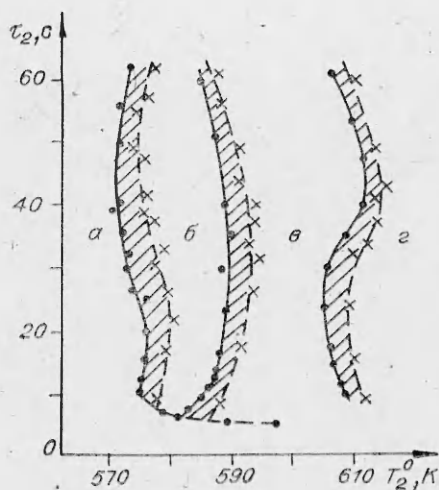


Рис. 1. Области существования медленной реакции (а), стабильных осцилляций (б), затухающих осцилляций (в) и стабилизированного холодного пламени (г); $T_1^0 = 565 \div 570 \text{ K}$, $p = 42,5 \text{ кПа}$.

второй секции реактора. При повышении T_2^0 система переходит в стабилизированное холодное пламя через многократные затухающие осцилляции, а при понижении устанавливается устойчиво колебательный режим с определенной частотой и амплитудой. Следует отметить, что температура стабилизированного холодного пламени $T_{\text{ст}}$ совпадает с максимальной температурой стабильных осцилляций (пороговая температура $T_{\text{пор}}$). При этих подходах отличаются также времена установления режима стабилизированного холодного пламени через затухающие осцилляции.

Таким образом, с понижением T_2^0 система может оказаться в осциллирующем режиме при более низких начальных температурах, чем в экспериментах с повышением T_2^0 . Вблизи границы областей стабильных осцилляций и медленного окисления при понижении T_2^0 могут быть достигнуты также устойчиво колебательные состояния, которые недоступны при проведении экспериментов первым путем.

В установившемся том или ином режиме протекания процесса изучалось влияние искусственных возмущений. Возмущения в экспериментах достигались кратковременным прекращением (с дальнейшим возобновлением) подачи кислорода в реагирующую смесь, быстрым откачиванием небольшой части реакционных газов из реактора, впрыскиванием (пульсациями) инертного газа в реактор, а также уменьшением температуры печи, подогревающей вторую секцию реактора, и изменением скорости струи.

При кратковременном прекращении подачи кислорода в режиме стабилизированного холодного пламени с ее возобновлением система теряет устойчивость и вновь возвращается в прежнее устойчивое состояние че-

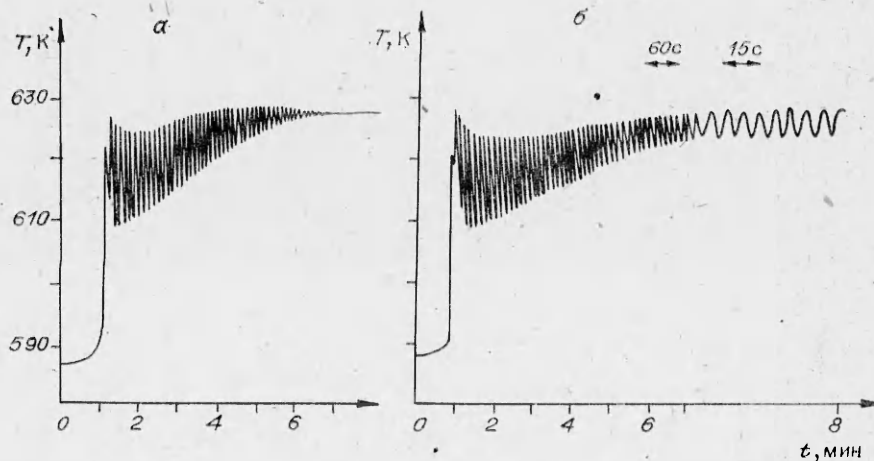


Рис. 2. Явление бистабильности при осцилляционном окислении пропана при одинаковых начальных условиях: $p = 42,5 \text{ кПа}$; $T_1^0 = 570 \text{ K}$, $T_2^0 = 587,5 \text{ K}$ и $\tau_2 = 30 \text{ с}$.

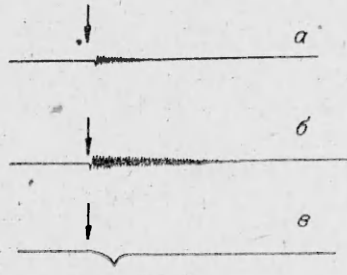


Рис. 3. Влияние кратковременной остановки подачи струи кислорода в реакционный сосуд (отмечено стрелкой) на температуру устойчивых состояний системы; $T_1^0 = 570$ К, $p = 42,5$ кПа, $\tau_2 = 20$ с, $T_2^0 = 620$ (а), 608 (б) и 575 К (в).

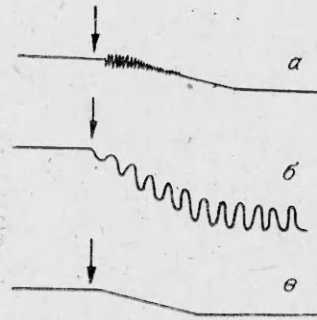


Рис. 4. Влияние уменьшения температуры печи, обогревающей реактор, на температуру устойчивых состояний системы; $p = 40$ кПа, $\tau_2 = 30$ с, $T_1^0 = 570$ (а, б) и 566 К (в), $T_2^0 = 607$ (а, б) и 572 К (в).

рез затухающие осцилляции (рис. 3, а). При этом число колебаний тем больше, чем ближе система к пределам области осцилляционного режима окисления (рис. 3, б). В режиме медленного окисления кратковременное прекращение и возобновление подачи кислорода приводит к понижению температуры реагирующей системы и ее монотонному восстановлению до прежнего стационарного уровня (рис. 3, в).

Аналогический эффект, показанный на рис. 4, наблюдается при понижении температуры печи. Если в режиме стабилизированного холодного пламени понизить температуру печи, например, на 2 К, то система переходит в новое устойчивое состояние через затухающие осцилляции с меньшей температурой (рис. 4, а). Вместе с тем, в режиме медленного окисления при уменьшении температуры на столько же градусов переводит систему в новое устойчивое состояние без каких-либо осцилляций (рис. 4, в). В режиме стабилизированного холодного пламени, однако, более существенное воздействие на реагирующую систему может привести к установлению другого режима окисления — устойчиво колебательного. Например, при тех же начальных условиях уменьшение температуры печи на 8 К переводит систему в режим стабильных осцилляций с постоянной амплитудой и периодом колебаний (рис. 4, б). Следует отметить, что стабильные осцилляции при данных скоростях потока и давлении наблюдаются при $T_2^0 = 599$ К. Снижением температуры без откачки смеси можно прийти к осцилляционному режиму и при более низких температурах, при которых, если применить обычный подход (с откачкой реактора для изменения температуры), наблюдается только медленная реакция.

Подобный отклик системы на возмущения возникает и с изменением скорости струи газовой смеси. Таким образом, во всех случаях, вводя в систему то или иное искусственное возмущение, при необходимости можно обнаружить природу устойчивого состояния, т. е. выяснить, в каком режиме (стабилизированного холодного пламени или медленного окисления) протекает реакция и узнать местоположение данного состояния в фазовом пространстве [16].

Сравнение полученных данных показывает, что отличие в параметрах существования двух различных режимов (гистерезис) более ощутимо, когда переход к этим параметрам происходит при непрерывном протекании окислительного процесса без предварительной откачки системы путем введения возмущений (при понижении температуры). Наличие гистерезиса можно связать с изменением состояния поверхности реактора при различных подходах. Высокие концентрации радикалов [17], возникающие в холоднопламенном режиме, могут оказать на поверхность обрабатываемое влияние и расширить область параметров, при которых

наблюдается осцилляционное окисление. В результате, когда система переходит от стабилизированного холоднотлеменного режима к осцилляционному и далее к медленной реакции, холоднотлеменное окисление и осцилляции могут наблюдаться, в частности, при более низких температурах, чем в случае, когда в этот режим системы переходят при повышении температуры, т. е. от медленной реакции. В последнем случае концентрация радикалов в десятки раз ниже [18], поэтому их обрабатывающее влияние на стенки реактора должно быть слабее. В этой связи естественно, что при понижении температуры в условиях стабилизированного холодного пламени без предварительной откачки (в экспериментах с возмущениями) обрабатывающее влияние сильнее и осцилляционный режим может существовать в более широкой области температур.

Явление гистерезиса может быть связано также с влиянием и теплофизических факторов [15] в процессе установления того или иного режима при изученных подходах.

Необходимо отметить, что наложением возмущений можно нарушить режим стабильных осцилляций и через затухающие осцилляции перейти в режим стабилизированного холодного пламени или осцилляции могут исчезнуть с переходом в режим медленного окисления.

ЛИТЕРАТУРА

1. P. Gray, J. F. Griffiths, R. J. Moule. Faraday Symp. Chem. Soc., 1974, 9, 103.
2. P. Gray. 16-th Symp. (Intern.) on Combustion. Pittsburgh, Pa, 1976.
3. Ya. Yu. Stepankii, N. P. Evmenenko, G. S. Jablonskii e. a. React. Kinet. Catal. Lett., 1980, 14, 3, 335.
4. V. Caprio, A. Insola, P.-G. Lignola. Comb. Flame, 1981, 43, 1, 23.
5. P. Gray, J. F. Griffiths, S. M. Hasko e. a. Proc. Roy. Soc. (Lond.), 1981, A 374, 1758, 313.
6. С. Г. Бернатосян, А. А. Манташян. Арм. хим. ж., 1983, 36, 1, 28.
7. С. Г. Бернатосян, А. А. Манташян. Там же, с. 34.
8. А. А. Mantashyan, S. G. Bernatossyan, T. R. Simonyan. Oxidat. Comm., 1983, 1—2, 207.
9. С. С. Поляк, В. Я. Штерн. ЖФХ, 1953, 27, 341.
10. T. R. Simonyan, A. A. Mantashyan. React. Kinet. Catal. Lett., 1981, 17, 3—4, 319.
11. С. Г. Бернатосян, А. А. Манташян. Хим. физика, 1984, 12.
12. V. F. Gray, L. Z. Aarons. Faraday Symp. Chem. Soc., 1974, 9, 129.
13. С. С. Поляк, В. Я. Штерн.— В кн.: Цепные реакции окисления углеводородов в газовой фазе. М.: Изд-во АН СССР, 1955.
14. V. F. Gray, V. G. Felton. Comb. Flame, 1974, 23, 3, 295.
15. P.-G. Lignola, V. Caprio, A. Insola e. a. Ber Bunsenges. Phys. Chem., 1980, 84, 4, 369.
16. А. А. Андронов, А. А. Витт, С. Э. Хайкин. Теория колебаний. М.: Наука, 1981.
17. П. С. Гукасян, А. А. Манташян, Р. А. Саядян. ФГВ, 1976, 12, 5, 789.
18. А. А. Манташян, П. С. Гукасян. Докл. АН СССР, 1977, 234, 2, 379.

*Поступила в редакцию 3/1 1985,
после доработки — 3/VI 1985*

КИНЕТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ПИРОЛИЗА ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ

*С. Г. Бьчков, А. В. Десятков, А. А. Бикетов, Г. И. Ксандопуло
(Алма-Ата)*

Интерес к изучению процессов взаимодействия лазерного излучения с полимерными материалами обусловлен прежде всего широким применением лазеров для технологической обработки [1—3]. В то же время использование излучения лазера в качестве источника нагрева при проведении термоаналитических исследований дает возможность изучить процесс деструкции полимеров в зависимости от подводимой энергии, а не только как функцию температуры и времени [4, 5].