

ЗАДЕРЖКА ВОСПЛАМЕНЕНИЯ БЕНЗИНА ПРИ ВПРЫСКЕ В МОДЕЛЬ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ДВИГАТЕЛЯ

*В. К. Баев, А. Н. Бажайкин, И. В. Болдырев,
А. А. Бузуков, В. А. Терентьев, Б. П. Тимошенко*

(Новосибирск)

Одна из важнейших характеристик рабочего процесса в двигателях внутреннего сгорания — период задержки воспламенения τ_i топливно-воздушной смеси. Особую значимость приобретает этот параметр в условиях работы дизельного двигателя, так как начало процесса здесь не может быть инициировано внешним воздействием. Все более широкое использование бензинов в дизелях в целях обеспечения их многотопливности поставило ряд новых проблем, связанных с высоким значением τ_i по сравнению с дизельным топливом [1]. Для снижения τ_i и улучшения воспламеняемости бензинов обычно разрабатываются различные конструктивные мероприятия или в топливо вводятся присадки [2], что, как правило, усложняет конструкцию двигателя или ухудшает его эксплуатационные показатели. Поэтому не случаен тот интерес, который проявляют специалисты к результатам расчетно-экспериментальных исследований и поиску универсальных зависимостей τ_i от физических условий в камере сгорания.

В настоящее время опубликованы десятки эмпирических или полуэмпирических формул для расчета τ_i [3], подавляющее большинство из которых базируется на разработанной Н. Н. Семеновым модели теплового воспламенения гомогенных газовых смесей [4]. Зависимость τ_i от исходных физических параметров в камере сгорания чаще всего представляется в форме уравнения О. М. Тодеса [5]

$$\tau_i = A p^{1-\nu} \exp(E/RT), \quad (1)$$

где p , T — давление и температура в камере сгорания к моменту начала подачи топлива; ν — суммарный порядок реакции; R — универсальная газовая постоянная; E — эффективная энергия активации.

Характер приведенной выше зависимости предполагает исключительно химическую природу периода задержки воспламенения, значения E для углеводородных соединений одного класса, близких по своему химическому составу, не должны существенно различаться, так как в этом случае превращения в процессе воспламенения и горения топливно-воздушных смесей определяются однозначными лимитирующими стадиями реакции. Между тем определенные различными исследователями (путем измерения τ_i) значения энергии активации меняются от 2 до 50 ккал/моль [3], причем не только в зависимости от вида топлива, но и от схемы проведения эксперимента при использовании одних и тех же топлив. Более того, как будет показано ниже, энергия активации, вычисленная при проведении экспериментов в одних и тех же условиях, оказалась существенно зависящей от температуры и давления в среде. Эти обстоятельства говорят о том, что общепринятые представления об этом числе, как об относительно строгом параметре, характеризующем зарождение и ход химической реакции, нуждаются в корректировке, если рассматривать его в применимости к работе ДВС.

В настоящей статье приводятся результаты экспериментов по определению периода задержки воспламенения бензина А-76 при впрыске его в модель камеры сгорания, в которой поддерживаются температура и давление, характерные для режима работы реального дизельного двигателя. Исследование позволило получить дополнительные сведения о зависимости τ_i от условий в рабочем объеме, в котором осуществляется процесс

распыления, испарения и горения бензина, объяснить некоторые особенности этого процесса и наметить подходы к формированию более совершенной физической модели явления.

Постановка эксперимента

Рабочий объем установки [6] для исследования процесса распыления, воспламенения и горения топлива, имитирующий камеру сгорания дизельного двигателя, представляет собою герметичную камеру цилиндрической формы (рис. 1). Внутренний диаметр камеры 150 мм, расстояние между торцевыми крышками, в которые вмонтированы иллюминаторы из кварцевого стекла, составляло 45 мм. Давление и температура в рабочем объеме повышались путем подачи сжатого воздуха, нагретого внешним омическим подогревателем (на рисунке не показан), через штуцер 10, а сброс продуктов сгорания и продувка объема — через штуцер 8. Температура изменялась с помощью хромель-алюмелевых термопар в центре объема 11, вблизи стенки 5 и непосредственно на стенке 7. Давление воздуха измерялось образцовым манометром 6. При проведении описываемой серии опытов давление в рабочем объеме повышалось до 80 атм, а температура до 670°C.

Бензин впрыскивался с помощью стандартной дизельной форсунки закрытого типа 1 с однодырчатым распылителем с диаметром сопла 0,35 мм. Топливо подавалось в форсунку плунжерным насосом (на рисунке не показан), а режим изменения давления в топливной системе контролировался с помощью пьезокварцевого датчика 2 типа ЛХ-600, установленного в измерительно-регулировочном узле 3 на топливной магистрали на расстоянии около 100 мм от форсунки. В этом же узле смонтирован жиклер 4 для сброса излишков топлива и обеспечения режима работы форсунки, характерного для реального двигателя.

Система управления топливной аппаратурой обеспечивала ее работу в режиме единичного впрыска. После достижения заданных оборотов вала основного двигателя, работающего на плунжерный насос (во всех опытах 900 + 10 об/мин), изменялась на время одного хода плунжера производительность насоса с нулевой на максимальную. При этом в рабочий объем в течение 2,5—3 мс впрыскивалось около 27 мг бензина. Непосредственно перед началом впрыска рабочий объем с помощью пневматических клапанов 9 отсекался от патрубков 8 и 10 для сброса и подачи воздуха.

В корпусе форсунки непосредственно перед распылительной головкой находится игольчатый клапан, отрегулированный так, что истечение топлива из сопла распылителя начинается только при достижении давления в топливной системе 200 атм.

Для регистрации изменения давления в рабочем объеме в боковой стенке корпуса установлен пьезокварцевый датчик 12 типа ЛХ-601 с охлаждаемым водой чувствительным элементом. Сигналы с датчиков 2 и 12 (верхний предел частотной характеристики 30 кГц), через высокоомные преусилители, поз-

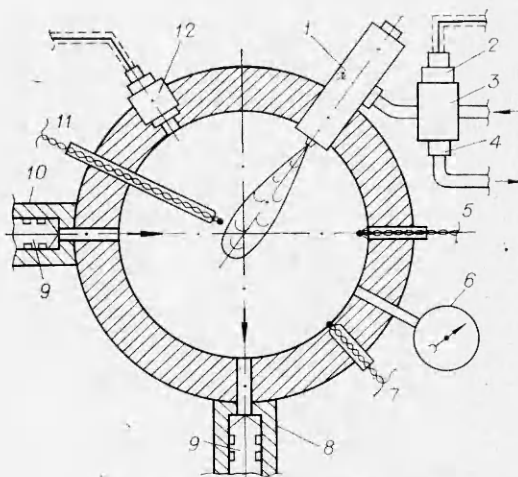


Рис. 1. Схема рабочего объема.

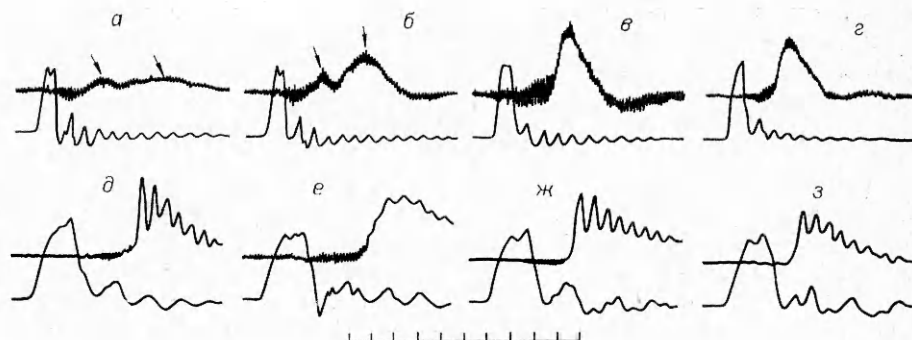


Рис. 2. Примеры осциллограмм давления в топливной системе и в рабочем объеме.

воляющие осуществлять тарировку системы статическим давлением, поступали на двухлучевой осциллограф С8-11. Развертки осциллографа запускались синхронизирующим импульсом, сформировавшимся по началу подъема давления в топливной системе [7].

Факт воспламенения в условиях проводившихся экспериментов констатировался по появлению интенсивного свечения при визуальном наблюдении через иллюминаторы и по характеру возрастания давления в объеме.

Результаты экспериментов

На рис. 2 приведено несколько типичных осциллограмм, записанных при впрыске бензина А-76 в рабочий объем при различных исходных избыточных давлениях Δp и температурах t . Нижняя кривая — эпюра давления в топливной системе, верхняя — изменение давления в объеме при впрыске топлива. В таблице содержатся данные, количественно характеризующие приводимые данные.

Изучение серии полученных осциллограмм позволяет сделать некоторые качественные выводы. Отметим, что даже при достаточно высокой начальной температуре (до 650°C) вызвать воспламенение бензина при впрыске в воздух с избыточным давлением до 10 атм не удалось. Однако нельзя считать, что в этих условиях воспламенение принципиально невозможно. Топливный факел при впрыске в газ, находящийся под относительно небольшим давлением, представляет собою компактную топливно-воздушную струю, стремительно пересекающую объем. И при характерных для бензина значениях t_i топливо, не успев воспламениться, попадает на стенки рабочего объема. Кроме того, компактность струи и высокая степень концентрации топливного компонента в ней затрудняют испарение бензина в объем и затягивают весь процесс. В этом смысле указанное выше значение избыточного давления нельзя считать критическим, задающим некоторый предел воспламеняемости бензина.

Осциллограммы на рис. 2	Δp , атм	t , $^\circ\text{C}$	Скорость раз- вертки, мс/дел	Масштабы давления, атм/дел		Осциллограммы на рис. 2	Δp , атм	t , $^\circ\text{C}$	Скорость раз- вертки, мс/дел	Масштабы давления, атм/дел	
				в топлив- ной сис- теме	в объеме					в топлив- ной сис- теме	в объеме
а	16	520	3,8	125	0,17	д	32	560	1,5	125	0,35
б	16	540	3,8	125	0,17	е	48	490	1,5	125	0,35
в	16	620	3,8	125	0,17	ж	64	590	1,5	125	0,50
г	32	520	3,8	125	0,35	з	80	525	1,5	125	0,50

Эксперименты показали, что относительно четко может быть установлен температурный предел воспламенения, который существенно зависит от давления среды. На рис. 3, 3 приведен диапазон температур, внутри которого лежит этот предел. Точно его определить трудно, так как на критических режимах на процесс оказывают влияние интенсивность продувки камеры, наличие остатков продуктов сгорания, температурные неоднородности в объеме, нестабильность в работе топливной системы и т. д. Поэтому на приводимом графике температурный предел воспламеняемости бензина представлен зоной, границы которой обозначены в соответствии с результатами обработки большого количества опытов. Подчеркнем, что при более низких температурах, чем определенная выше критическая, в рабочем объеме не наблюдается каких-либо явлений (свечение или повышение давления), свидетельствующих о возникновении активного процесса.

При температурах, превышающих критическую на 20—30°, при всех давлениях в объеме наблюдается двухстадийное тепловыделение. Это приводит к появлению своеобразной «двугорбой» энтальпии давления (см. рис. 2, а, б). При дальнейшем повышении температуры амплитуда вторичного импульса резко возрастает и время его формирования относительно начала всего процесса сокращается (рис. 2, б — г). Изменение же характеристик первичного импульса оказывается менее значительным, поэтому он с повышением температуры перекрывается вторичным.

Скоростная киносъемка процесса, проведенная с помощью кинокамеры ZL-1, показала, что до момента начала слияния импульсов природа их появления различна. Первичный образуется в результате возникновения одного или нескольких очагов воспламенения в рабочем объеме в зоне, занятой парами полностью к этому времени испарившегося топлива. Но фронт пламени в этих условиях не формируется, и процесс не заканчивается сгоранием всего объема топливно-воздушной смеси. Вторичное повышение давления обязано своим появлением воспламенению частиц сажи, образовавшейся в результате распада топлива [8]. На фрагментах кинограммы, приведенной на рис. 4, отчетливо видно появление первичного очага воспламенения (1) и зоны, занятой медленно горящими частицами сажи (2).

Рассмотренный режим превращений в рабочем объеме характеризуется большими временами задержек, составляющими 15—25 мс. Но, начиная с некоторой температуры (см. рис. 3, 2), характер воспламенения бензино-воздушной смеси резко меняется. Здесь по-прежнему сначала наблюдается относительно небольшое повышение давления в рабочем объеме, связанное с возникновением очагов пламени, затем давление резко возрастает, достигая своего максимального значения за 2—3 мс (см. рис. 2, г, е). Киносъемка показывает, что в этом случае из очага воспламенения пламя распространяется по всему объему, занятому парами топлива, а сажеобразование не наблюдается. Эта вторая критическая температура в меньшей степени зависит от давления в среде и при изменении его от 20 до 80 атм падает всего на 40—50°.

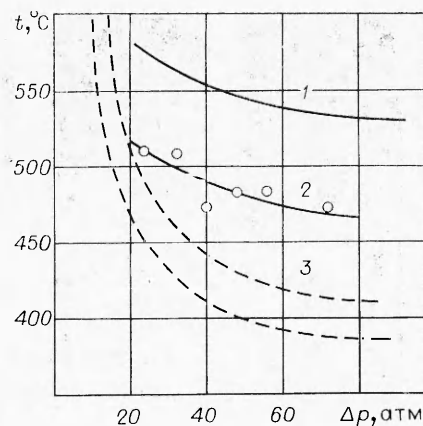


Рис. 3. Зависимость температуры смены механизмов горения (1 и 2) и критической температуры воспламенения бензина А-76 (3) от перепада давления Δp в рабочем объеме.

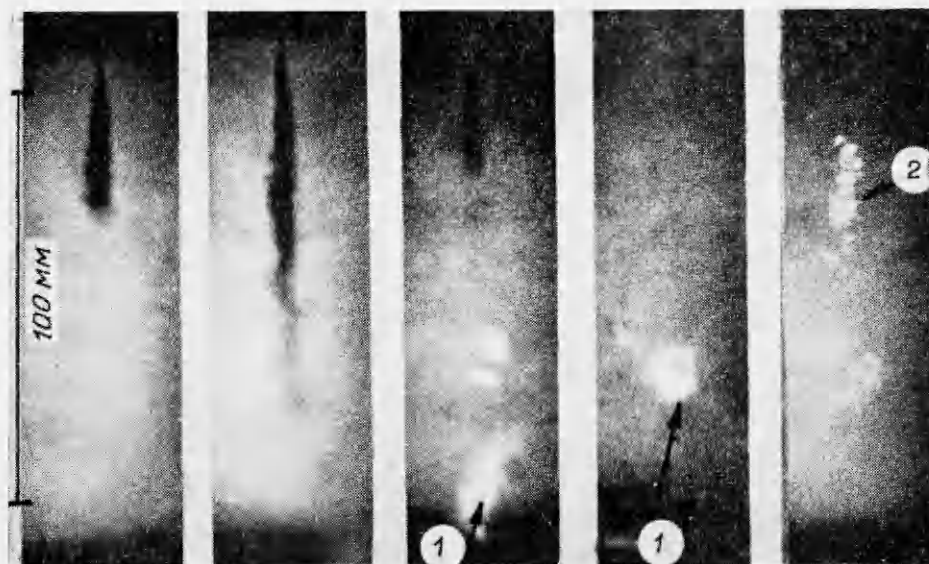


Рис. 4. Кинограмма впрыска и воспламенения бензина А-76 в рабочий объем; $T = 500^\circ\text{C}$, $\Delta p = 32$ атм.

При дальнейшем увеличении исходной температуры воздуха (до $530\text{--}570^\circ\text{C}$ в зависимости от давления в диапазоне $20\text{--}80$ атм) наступает новый качественный скачок в процессе воспламенения и сгорания бензино-воздушной смеси (см. рис. 3, 1). Фронт пламени распространяется по топливному факелу с большой скоростью и горение осуществляется в квазидетонационном режиме. Датчик давления в объеме регистрирует сигнал, аналогичный такому, который создавался бы при действии на него ударной волны. Приведенные для иллюстрации этого явления на рис. 2, δ — z осциллограммы отчетливо показывают ударный характер нагрузки с последующими затухающими колебаниями. Эти пульсации могут носить как газодинамическую природу, так и быть вызваны механическими колебаниями корпуса рабочего объема в несимметричной системе крепления. Датчик в последнем случае работает как датчик ускорения. При выполнении настоящей работы истинная причина появления указанных пульсаций давления не устанавливалась.

Описанные выше режимы воспламенения и горения топливно-воздушных смесей известны и неоднократно изучались. Приведенный здесь материал дает дополнительную качественную и количественную информацию, касающуюся характера воспламенения такого широко распространенного топлива, как бензин А-76, в применении к условиям, характерным для работы дизельного двигателя.

Рассмотрим зависимость τ_i от давления и температуры, поддерживаемых в объеме перед началом впрыска топлива. Понятие периода задержки воспламенения строго не определено. Для условий работы дизельного двигателя чаще всего за этот параметр принимается отрезок времени, определяемый на основе следующих соображений. Сразу же после начала поступления топлива в камеру сгорания давление в ней за счет испарения уменьшается и становится ниже, чем при таком же положении поршня, но без впрыска. После начала тепловыделения оно возрастает и через некоторое время становится выше, чем без впрыска. Поэтому за τ_i обычно принимают время от начала впрыска до момента, соответствующего пересечению эпюр давления в камере при впрыске и без него.

В ряде исследований τ_i определялось с помощью фотоэлементов, фиксирующих начало свечения в камере сгорания [9]. Однако в [9] по-

казано, что значения τ_i , полученные даже в одном опыте разными способами, не совпадают, что объясняется несоответствием характера изменения давления в камере сгорания и появлением светящихся зон в ней, которые неоднозначно связаны с воспламенением и горением топливно-воздушной смеси.

В настоящих экспериментах впрыскивалось относительно небольшое количество топлива, и его испарение не приводило к заметному на фоне помех снижению давления в объеме. Поэтому значение τ_i здесь определяется или по моменту пересечения эпюрой давления нулевого уровня сигнала при высокой степени его усиления, или по началу резкого подъема давления при заглубленном входе прибора. Величина τ_i отсчитывалась от начала впрыска топлива, которое на $0,89 \pm 0,19$ мс отставало от начала подъема давления в топливной системе. Линии на рис. 5 отображают средние значения τ_i ; разброс данных — 20—25%.

Приведенные на рис. 5 результаты экспериментов отчетливо свидетельствуют о наличии, по крайней мере, двух характерных форм зависимости τ_i от давления и температуры. До $480\text{--}530^\circ\text{C}$ они представлены параллельными линиями, что говорит о возможности описания τ_i соотношением вида (1). Однако при более высоких температурах (как указывалось выше, этот переход совпадает с переходом через вторую критическую температуру, когда качественно меняется форма эпюры давления в объеме) зависимости τ_i от температуры при различных давлениях не параллельны, несмотря на то, что каждая из них представлена прямой. Это свидетельствует о невозможности строгого определения значения E в (1), которая оказывается зависящей от давления в среде.

Неоднозначность определения энергии активации неоднократно фиксировалась различными исследователями. Проанализируем это обстоятельство. На результаты измерения оказывают влияние условия проведения эксперимента. На рис. 5, например, штриховой линией нанесены результаты измерений τ_i для бензина А-72, взятые из работы [3], где исследования проводились на реальном двигателе с камерой в поршне, работавшем в форсированном режиме, а в настоящей работе использовалась установка со стационарным рабочим объемом. Это обстоятельство, а также зависимость $E(t, \Delta p)$ [3] позволяют предположить, что величина E определяется не только реакционными возможностями топливно-воздушной смеси и кинетикой окисления, но и в равной степени физико-механическими характеристиками топливного факела, т. е. полями концентраций и степенью дисперсности топливного компонента в нем. Именно этими параметрами, зависящими от давления в среде и динамики впрыска, определяется режим испарения топлива и формируется истинное поле температур. Начало химической реакции и ее ход уже вторичным образом зависят от исходных параметров среды в камере сгорания. На зависимость τ_i от условий распыления и испарения топлива при работе дизельных двигателей обращалось внимание и ранее [3, 10], однако влия-

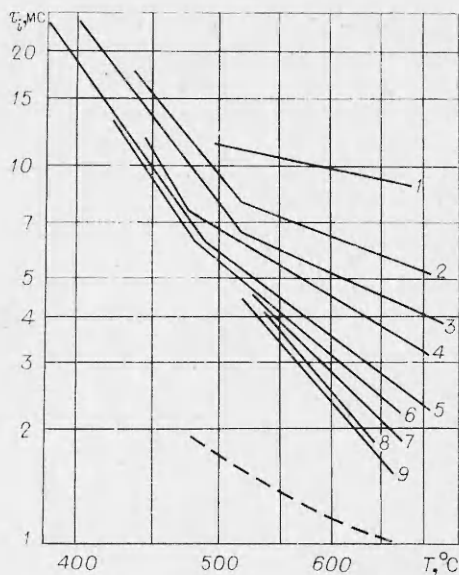


Рис. 5. Зависимость периода задержки воспламенения бензина А-76 от исходных температуры и избыточного давления в объеме.

Δp , атм: 1 — 16, 2 — 24, 3 — 32, 4 — 40, 5 — 48, 6 — 56, 7 — 64, 8 — 72, 9 — 80.

нию этих факторов на процессы воспламенения и горения не придавалось до сих пор существенного значения.

Полученные результаты позволяют выписать эмпирическое соотношение, связывающее период задержки воспламенения с начальными давлением и температурой. При этом не ставится задача определения энергии активации, а ищется такой эквивалентный параметр, зависящий от давления в среде, с использованием которого формула хорошо бы описывала данные эксперимента в диапазоне избыточных давлений от 16 до 80 атм и температур от 500 до 700°C. Данные для температур, меньших 500°C, не анализировались, так как представляют относительно небольшой практический интерес как не характерные для режимов работы реального дизельного двигателя.

Указанное соотношение выглядит следующим образом:

$$\tau_i = 14 \exp(41,7\Delta p^{1,44}/T - 0,11\Delta p). \quad (2)$$

Примечательно, что в формуле фигурирует отношение Δp (атм) в степени, близкой к 1, к температуре T (°K). Таким образом, оказывается, что τ_i (мс) зависит в основном от **плотности среды**, которая определяет динамику распыления топлива, форму топливного факела, распределение в нем топливного компонента. Отметим также, что проведенные на этой же установке опыты, в которых в рабочий объем впрыскивалось дизельное топливо, позволили получить аналогичное соотношение, содержащее тот же характерный параметр $\Delta p/T$ [11]. Этот вывод еще раз подчеркивает влияние физико-механических условий на процесс воспламенения и на некорректность определения такого параметра, как энергия активации, по измеряемому во многих опытах τ_i . Замечание по этому поводу, высказанное еще в работе [12], до настоящего времени остается без внимания.

Очевидно, что для определения истинного значения энергии активации необходимо проведение опытов в особых условиях. В этом случае должны быть приготовлены гомогенные смеси с заранее заданными концентрационными характеристиками, температурой, давлением. Проведение таких экспериментов возможно, например, с помощью методики ударных труб [13]. Однако и в этих условиях существенным остается вопрос о смесеобразовании. Значительный объем исследований на ударных трубах проводился с использованием гетерогенных смесей, поэтому в величину τ_i включалось время распыления капель горючего и время образования смеси, способной к химическим превращениям. Так, например, τ_i для смеси воздух + гептан (газ) оказался на порядок меньше, чем для смеси такого же стехиометрического состава воздух + гептан (жидкость) при проведении опытов в идентичных условиях. Аналогичный вывод был получен также в [14].

Определение истинной эффективной энергии активации для топливно-воздушных смесей различного состава позволит построить правильную физическую и математическую модель явления.

*Поступила в редакцию
17/III 1980*

ЛИТЕРАТУРА

1. И. В. Болдырев, Е. Г. Дятлов. Автомобильная промышленность, 1976, 11.
2. Р. М. Мохов. — В сб.: Сгорание и смесеобразование в дизелях. М., Изд-во АН СССР, 1960.
3. В. И. Семенов. Изв. вузов, Машиностроение, 1970, 1, 81.
4. Н. Н. Семенов. ЖФХ, 1933, 4, 1, 63.
5. O. M. Todes. Acta Physicochimica, 1936, 5, 785.
6. В. К. Баев, А. Н. Бажайкин и др. ФГВ, 1979, 15, 1, 26.
7. В. К. Баев, А. Н. Бажайкин и др. ПМТФ, 1980, 1.
8. В. З. Махов, М. М. Ховах. Изв. вузов, Машиностроение, 1976, 5, 103.

9. С. А. Батурич, Н. Х. Дьяченко, Л. Е. Магидович. Тр. Алтайского политехнического ин-та. Вып. 47. Барнаул, 1975.
10. Н. Х. Дьяченко, Ю. Б. Свиридов.— В сб.: Горение и взрыв. М., Наука, 1972.
11. В. К. Баев, А. Н. Бажайкин и др.— В сб.: Нестационарное смесеобразование и горение в замкнутом объеме. Новосибирск, ИТПМ, 1979.
12. М. А. Хайлов.— В сб.: Сгорание и смесеобразование в дизелях. М., Изд-во АН СССР, 1960.
13. С. М. Когарко, А. А. Борисов. Изв. АН СССР, ОХН, 1960, 8, 1348.
14. Ю. М. Трушин.— В сб.: Распространение пламени и детонации в газовых смесях. М., ИХФ АН СССР, 1960.

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ВОЛНЫ ГОРЕНИЯ В СИСТЕМЕ $Zr - Al$

Е. А. Некрасов, Ю. М. Максимов, А. П. Алдушин
(Томск)

Вслед за выяснением качественных закономерностей распространения волны горения в безгазовых системах [1, 2] на повестку дня встает задача расчета абсолютных характеристик процесса. Существующие теоретические представления о распространении волны горения в безгазовых системах выделяют две основные трудности в задаче количественного описания процесса. Одна из них, присущая всем макрокинетическим задачам, связана с недостатком информации по кинетике высокотемпературного взаимодействия. Другая, специфичная для данного класса систем, обусловлена ролью структурных факторов, характеризующих масштаб гетерогенности среды и условия контакта реагентов.

Первым шагом на пути к количественному описанию процесса горения в безгазовых системах может служить расчет скорости и структуры волны реакции в идеализованной упорядоченной системе с идеальным контактом реагентов. Для описания кинетики взаимодействия примем предположение о лимитирующей роли взаимодиффузии компонентов. В этом приближении скорость и последовательность превращения исходных реагентов в продукты реакции определяются фазовой диаграммой рассматриваемой конкретной системы [3—5].

Подобная идеализация не лишает расчет количественного смысла, поскольку как в структурном, так и в кинетическом плане принятые предположения способствуют завышению скорости взаимодействия реагентов. Полученная таким способом скорость горения должна быть верхней оценкой скорости для данной конкретной системы при заданном масштабе гетерогенности. Побочный результат расчета в сопоставлении с экспериментальными данными — вывод о роли структурных и кинетических факторов при горении гетерогенных конденсированных систем. Для иллюстрации сформулированного подхода ниже приведены методика и результаты расчета параметров и структуры волны горения в системе $Zr - Al$.

Распространение волны горения в смесях порошков Zr и Al характеризуется тем, что наиболее тугоплавкий металл (Zr) остается твердым в зоне реакции, находясь в контакте с расплавленным легкоплавким компонентом (Al) [6]. Продукты реакции в системе $Zr - Al$ являются фазами постоянного состава с нулевой областью гомогенности (рис. 1) [7]. Наиболее вероятным путем образования конечного продукта в процессе горения является его кристаллизация из насыщенного или пересыщенного раствора, образующегося при растворении циркония в расплаве алюминия. В этом смысле система $Zr - Al$ представляет не только количественный, но и качественный интерес.