

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Гриб. ПММ, 1944, 8, 3, 169.
2. А. А. Гриб. ПММ, 1944, 8, 4, 273.
3. С. А. Ждан, В. И. Феденко. — В кн.: Механика быстропротекающих процессов. Вып. 51. Новосибирск, 1981.
4. Т. П. Гавриленко, В. В. Григорьев, С. А. Ждан и др. ФГВ, 1982, 18, 2, 109.
5. С. А. Губин, С. М. Когарко и др. Вычислительная программа термодинамического расчета равновесного состава и параметров продуктов детонации горючих газовых смесей и низкотеплотных конденсированных ВВ. Отчет МИФИ № 0181.6005447. М., 1981.
6. Ch. L. Mader. Numerical Modeling of Detonations. Berkely — Los Angeles — London: Univ. Calif. Press., 1979.
7. А. А. Самарский, Ю. П. Попов. Разностные методы решения задач газовой динамики. М.: Наука, 1980.

ПРЕДЕЛЫ И РЕЖИМЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЕТОНАЦИИ В ГАЗОПЛЕНОЧНЫХ СИСТЕМАХ

Г. А. Лямин, А. В. Пинаев

(Новосибирск)

В результате исследования гетерогенной газ — пленка детонации (газ в объеме трубы, пленка жидкого горючего на ее стенках) установлено [1], что в трубах диаметром 6—30 мм при начальном давлении окислителя $p_0 = 1 \div 40$ атм скорость детонации слабо зависит от p_0 и практически не зависит от состава системы при $\varphi > 2 \div 3$ (φ — коэффициент переобогащения системы горючим по сравнению со стехиометрическим составом). Обзор литературы по механизмам распространения и моделям детонации, а также результаты по структуре зоны реакции при детонации систем газ — пленка представлены в работе [2]. В [3] приведены результаты экспериментального исследования пределов детонации в зависимости от концентрации горючего в системе. Исследования газопленочной детонации в трубах диаметром $d = 22,2; 11,1$ и $4,75$ мм проведены в [4], в литературе отсутствуют сведения о возможности и режимах распространения детонации в каналах меньшего сечения. Не существует также публикаций о нахождении пределов гетерогенной детонации по начальному давлению окислителя при фиксированной толщине пленки горючего на стенках.

В настоящей работе исследуется газопленочная детонация в круглых и квадратных каналах с малым сечением и определены предельные давления p_{*} , при которых еще возможно распространение детонационной волны для случая достаточно переобогащенных систем ($\varphi > 3$). В качестве окислителя использовался кислород, горючими служили предельные углеводороды декан ($C_{10}H_{22}$) и гексадекан ($C_{16}H_{34}$), вакуумное масло ВМ-4 — смесь углеводородов нафтового ряда.

Каналы квадратного сечения размером $6 \times 6, 3 \times 3, 1 \times 1$ мм, длиной 600 мм располагались вертикально; снизу, вблизи торца, размещалось прозрачное окно длиной 120 мм. Внутренний диаметр стеклянных трубок $d = 1,3$ и $3,3$ мм, длина 600 и 900 мм соответственно. Иницирование детонации во всех каналах осуществлялось подрывом манганиновой проволоочки от батареи конденсаторов емкостью 2160 мкФ, напряжение на батарее изменялось от 200 до 600 В. Проволочка устанавливалась в камере иницирования объемом около 3 см^3 , примыкающей непосредственно к началу каналов. Для съемки самосвечения процесса использовался фоторегистратор барабанного типа, направление вращения диска которого было перпендикулярно распространению детонационной волны.

Дополнительно в квадратных каналах проводилась запись давления на осциллографе ОК-33 двумя пьезодатчиками, описанными в [5]. Дат-

чики размещались в пластине, закрывающей и уплотняющей каналы, на расстоянии 300 и 400 мм от камеры инициирования. Сигналы с пьезодатчиков предварительно подавались на истоковый повторитель с постоянной времени $\tau > 0,5$ с. Для измерения задержек воспламенения напротив датчика установлено прозрачное окно диаметром 1 мм, свечение из которого попадало в фотоумножитель ФЭУ-31 и регистрировалось осциллографом.

На стенки каналов квадратного сечения горючее наносилось тампоном, количество горючего в системе определялось взвешиванием тампона до и после смазывания стенок. Нанесение жидкой пленки в трубках круглого сечения осуществлялось путем свободного стекания горючего. В каналах квадратного сечения проводилось многократное смазывание стенок, что способствовало более равномерному нанесению пленки горючего. В стеклянных трубках этот же эффект достигался путем перетекания капли горючего от одного конца трубки к другому. Средняя толщина пленки δ на стенках определялась делением объема жидкости в системе на площадь стенок. Отсутствие сухих пятен проверялось визуально. Максимальная ошибка в определении средней толщины пленки составляла 10%. В большинстве опытов для декана и гексадекана $\delta = 5 \div 15$ мкм, при этих значениях еще не наблюдается стекания вдоль стенки. Для вакуумного масла ВМ-4 вследствие большой вязкости в канале диаметром 1,3 мм наносились слои $\delta = 20 \div 30$ мкм, а при $d = 3,3$ мм $\delta = 80 \div 120$ мкм.

Эксперименты в стеклянных трубках показали, что детонация выходит на установившийся режим на расстояниях 100—150 и 200—300 мм при $d = 1,3$ и 3,3 мм соответственно. Для выяснения вопроса о стационарности детонации в канале 6×6 мм сравнивались значения скоростей детонации, измеренные по сигналам с пьезодатчиков и по фоторазверткам самосвечения в одном и том же опыте. В большинстве случаев скорости совпадали в пределах ошибки измерения (5%). Для исключения возможности получения пересжатой детонации напряжение на батарее конденсаторов варьировалось 2—3 раза, что не приводило к различию в скоростях установившейся детонационной волны. Доказательством того, что процесс является детонационным вблизи предела по p_0 , служили опыты в сухих каналах — при этом скорость ударной волны от взрыва проволоочки затухала к концу каналов до 500—600 м/с.

Получены данные о зависимости скорости гетерогенной детонации от p_0 и значения p_0^* для случая «толстых» пленок ($\varphi > 3$, $\delta \geq 5-15$ мкм). Результаты эксперимента приведены в таблице. Здесь d — характерный

Горючее	d , мм	p_0^* , атм		D^* , м/с		D_0 , м/с	
		1	2 [7]	1	2 [7]	1	2 [9]
Декан	1	0,7+0,2	0,29	1100+100		2050+100	
	1,3	0,9+0,3	0,24	800+50		2100+100	
	3	0,3+0,1	0,14	1000+50	1617	1950+100	1925
	3,3	0,2+0,1	0,13	1050+100		—	
	6	$\leq 0,1$	0,08	≤ 900		1900+100	
Гексадекан	1	0,5+0,2	0,81	1100+100		2000+100	
	1,3	0,8+0,2	0,71	800+50		1900+100	
	3	0,3+0,1	0,47	1050+50	1603	1950+100	1908
	3,3	0,25+0,1	0,45	950+50		—	
	6	$\leq 0,2$	0,33	≤ 1000		1850+100	
ВМ-4	1,3*	3,0+0,5	0,97	1850+100		—	
	3	1,4+0,2	0,64	1650+100	1593	1850+100	1897
	3,3**	1,0+0,3	0,61	1700+100		—	
	6	1,3+0,2	0,45	1650+100		1800+100	

П р и м е ч а н и е. 1 — эксперимент, 2 — расчет. Во всех опытах толщина пленки горючего $\delta = 5 \div 15$ мкм, за исключением * $\delta = 20-30$ мкм и ** $\delta = 80-120$ мкм.

Рис. 1. Зависимости D от p_0 при $\varphi > 3$ для декана (1), гексадекана (2) и ВМ-4 (3).

размер трубы ($d = 4S/\pi$, где S — площадь поперечного сечения, а π — его периметр), D^* и D_0 — скорости детонации соответственно вблизи (при $p_0 \sim p_0^*$) и вдали от предела (при $p_0 \sim (10 \div 20) p_0^*$). Наблюдаемая скорость детонации при $p_0 \sim (10 \div 20) p_0^*$ во всех исследуемых каналах для систем декан — кислород и гексадекан — кислород составляла 1800–2000 м/с и падала до 750–1100 м/с при $p_0 \sim p_0^*$; в системе кислород — ВМ-4 $D = 1600 \div 1800$ м/с при $p_0 \gg p_0^*$ и уменьшалась примерно на 10% вблизи предела.

Зависимости $D = D(p_0)$ в канале 3×3 мм приведены на рис. 1. Слабое изменение скорости детонации для ВМ-4 по сравнению с деканом и гексадеканом можно объяснить большей стабильностью пленки масла при газодинамическом воздействии на нее потока газа. Различие в величине скорости детонации для декана и гексадекана, вероятно, следует из отличия температуры кипения и давления насыщенных паров этих горючих [6]. Столь резкое падение величины D для этих горючих вблизи критического давления ранее в экспериментах не замечалось.

Для выяснения совместного влияния толщины пленки, давления и размера канала проведено несколько серий опытов, в которых менялось количество наносимого на стенки горючего при фиксированных p_0 . Результаты измерений скорости детонации для гексадекана при $p_0 = 1$ и 5 атм представлены на рис. 2. Здесь на верхней оси сверху и снизу дополнительно нанесены значения φp_0 соответственно для канала 3×3 мм и трубки $d = 1,3$ мм. Обращает на себя внимание рост скорости детонации при уменьшении δ ниже 5 мкм (кривые 1, 2') и расположение кривых, полученных соответственно для $p_0 = 1$ и 5 атм в каналах различного сечения. С повышением p_0 до 7–8 атм в трубке с $d = 1,3$ мм скорость детонации в системе гексадекан — кислород равна 1900 ± 100 м/с для $\delta \geq 5$ мкм. Эти факты свидетельствуют о достаточно сложном совместном влиянии на механизм детонационного горения и параметры детонации величин φ , δ , p_0 , d и μ (где μ — коэффициент вязкости горючего).

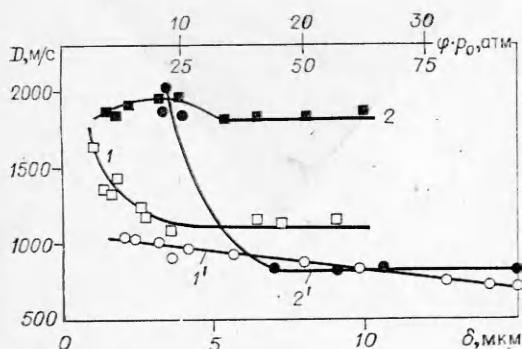


Рис. 2. Зависимости D от δ для гексадекана в канале 3×3 мм (1, 2) и в трубке диаметром 1,3 мм (1', 2').
 p_0 , атм: 1, 1' — 1, 2, 2' — 5.

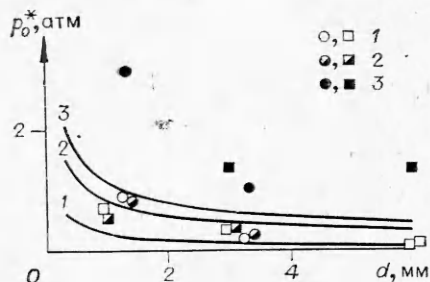


Рис. 3. Экспериментальные (точки) и теоретические (кривые) зависимости p_0^* от d ($\varphi > 3$) для декана (1), гексадекана (2) и ВМ-4 (3).

Экспериментальные данные сравнивались с результатами диффузионной модели гетерогенной детонации типа газ — пленка [7—9] (рис. 3). При расчете p_0^* использовались результаты работы [7] с исправленным критерием пределов детонации для случая толстых пленок ($\varphi > 1,7$)

$$X = \frac{(T_\alpha - T_1)^{8/3} (\rho' c_p' \lambda')^{4/3}}{\rho_1^{7/3} d \mu_0^{1/3} a_1^{19/3}},$$

где $X = X_e = 49,4$. (Обозначения здесь совпадают с обозначениями работы [7], все величины подставляются в одной системе единиц.) Значения p_0^* , полученные при расчете по данной формуле, удовлетворительно совпадают с расчетом по упрощенному выражению из [8].

Сравнение эксперимента и теории по величине D показало, что одномерная диффузионная модель [9] дает хорошее согласие с опытом вдали от предела даже для труб малого диаметра. В то же время при приближении к пределу скорость детонации для случая маловязких горючих (декан или гексадекан) падает гораздо ниже, чем предсказывает диффузионная модель пределов [7] (см. таблицу). Такое различие можно объяснить тем, что в модели пределов поступление горючего в окислитель определяется испарением горючего со стенки, при этом для расчета массоподачи используются известные экспериментальные зависимости для турбулентного пограничного слоя со вдувом и горением над гладкой поверхностью. Однако, как показали эксперименты, существенную роль в ускорении массоподачи играют процессы образования воли на поверхности пленки [13] и срыва капель жидкости с гребней возмущений [10, 11]. В этой связи представляется возможным объяснить влиянием вязкости, почему близкие между собой p_0^* для декана и гексадекана меньше p_0^* для ВМ-4. Вязкость ВМ-4 на два порядка выше, чем у декана и гексадекана и, следовательно, пленка ВМ-4 гораздо слабее поддается механическому разрушению потоком газа, что в критических условиях требует более высокого начального давления для обеспечения необходимой скорости массорасхода горючего.

На основании экспериментальных данных (см. рис. 1, 2) можно выделить два режима распространения детонационной волны. Высокоскоростной режим ($D \geq 1600$ м/с) характеризуется высокими параметрами за передним ударным фронтом. Так как химические задержки воспламенения при этом малы ($\tau_x \leq 10^{-6}$ с), то воспламенение осуществляется ударной волной вблизи ее фронта, т. е. по классической модели Зельдовича — Неймана — Дёришга (ЗНД). Воспламенение смеси за фронтом при этом происходит за времена $t_b \leq 5 \div 10$ мкс (рис. 4, а).

При низкоскоростном режиме распространения ($D \leq 1100$ м/с) параметры потока за фронтом столь низки, что затрудняется испарение и разрушение пленки, химические задержки воспламенения, согласно выводам работы [12], для исследуемых смесей горючих с кислородом при стехиометрическом составе $\tau_x \geq 100$ мкс. Однако измерения показывают (см. рис. 4, б), что пламя отстоит от переднего

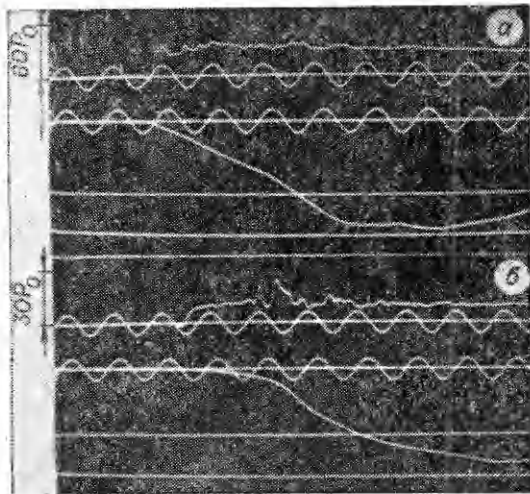


Рис. 4. Осциллограммы давления (верхний луч) и свечения (нижний луч) волны гетерогенной детонации для системы гексадекан — кислород в канале 6×6 мм; $T = 10$ мкс.

а) $D = 1750$ м/с, $p_0 = 3$ атм, $\delta = 10$ мкм;
б) $D = 1100$ м/с, $p_0 = 1$ атм, $\delta = 10$ мкм.

фронта на расстоянии порядка 1—1,5 см (т. е. $t_b \approx 10 \div 15$ мкс). Таким образом, подтверждается предположение работы [13] о том, что при небольших скоростях гетерогенной детонации воспламенение осуществляется не передним ударным фронтом (по модели ЗНД), а за счет турбулентного проникновения горячих продуктов в невоспламенившуюся горючую смесь. Определенную роль в зажигании играют и периодические взрывные волны в зоне реакции. Образование горючей смеси на таких расстояниях от фронта происходит в основном за счет срыва микрокапель жидкости с гребней образовавшихся возмущений и их последующего испарения [10, 13].

Измерения профилей давления в волне детонации в канале 6×6 мм показали, что при высокоскоростном режиме давление за ударной волной монотонно падает и датчики не регистрируют практически никаких возмущений в зоне реакции (см. рис. 4, а); при низкоскоростном режиме давление за фронтом носит пульсационный характер (см. рис. 4, б). Возмущения давления часто плавного (акустического) и реже ударного типа с максимальной амплитудой $p \approx 2p_1$, где p_1 — давление за передним ударным фронтом. Пульсации давления возникают в зоне горения из-за накопления горючей смеси при недостаточно высокой скорости химических реакций и носят взрывной характер.

Наибольший интерес представляют околопредельные режимы ($p_0 \sim p_0^*$) в системе кислород — ВМ-4. В этом случае на фоторазвертках самосвечения видны периодические изменения светимости по всей длине зоны реакции, указывающие на колебательный характер процесса. Предположение о периодических взрывных волнах, догоняющих передний фронт, в данном случае не подтверждается, поскольку по измерениям их скорость относительно движущегося потока должна составлять 2—2,5 км/с; расчетное давление за ними $p \sim (2 \div 4)p_1$, однако пьезодатчики регистрируют лишь слабые периодические колебания с относительной амплитудой $\Delta p = p - p_1 \leq 0,1p_1$. Период колебаний составлял 14—16 мкс для канала 3×3 мм и трубы с $d = 3,3$ мм и 30—34 мкс для канала 6×6 мм. Такой детонационный процесс по аналогии с [2] можно назвать спиновым. Эффективная скорость звука в зоне реакции, рассчитанная по акустической теории для первой гармоники, составила величину $c \approx (0,25 \div 0,3)D$. Столь низкое значение скорости звука объясняется, по-видимому, сильным охлаждением продуктов сгорания из-за дальнейшего поступления в них микрокапель масла и возрастанием молекулярной массы смеси.

Таким образом, в работе

- определены нижние пределы по давлению для «толстых» пленок горючих ВМ-4, декана и гексадекана в каналах размером от 1 до 6 мм;
- обнаружено существенное уменьшение скорости детонации вблизи p_0^* , показано принципиальное отличие механизмов детонационного горения вблизи и вдали от пределов;
- установлена сложная (многомерная) зависимость параметров детонации от диаметра канала, давления окислителя, толщины и вязкости пленки горючего;
- зарегистрированы режимы спиновой детонации вблизи предела в каналах малого сечения.

Авторы благодарят В. В. Митрофанова за внимание к работе.

Поступила в редакцию 18/XI 1982,
после доработки — 4/II 1983

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Ф. Комов, Я. К. Трошин. Докл. АН СССР, 1967, 175, 1.
2. А. В. Пинаев, В. А. Субботин. ФГВ, 1982, 18, 5.
3. В. Е. Гордеев, В. Ф. Комов, Я. К. Трошин. Докл. АН СССР, 1965, 160, 4.
4. J. R. Bowen, K. W. Ragland et al. 13-th Symp. (Intern.) on Combustion, 1970.
5. А. В. Пинаев. ФГВ, 1983, 19, 1.
6. Физико-химические свойства индивидуальных углеводородов/Под ред. В. М. Ташевского, Гостоптехиздат, 1960.

7. С. А. Лесняк, В. Г. Слуцкий. ФГВ, 1977, 13, 5.
8. М. В. Воробьев, С. А. Лесняк и др.— В кн.: Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация. Черноголовка, 1977.
9. С. А. Лесняк, В. Г. Слуцкий. ПМТФ, 1974, 3.
10. М. В. Воробьев, С. А. Лесняк и др. Докл. АН СССР, 1976, 230, 2.
11. А. А. Борисов, Б. Е. Гельфанд и др. ФГВ, 1981, 17, 5.
12. А. В. Пинаев, А. И. Сычев. ФГВ, 1982, 18, 6.
13. С. А. Лесняк, М. А. Назаров и др. ФГВ, 1975, 11, 6.

О ПАРАМЕТРАХ ДЕТОНАЦИИ ВОДОРОДНО-КИСЛОРОДНЫХ И ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ ПРИ ВЫСОКОЙ НАЧАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ

Н. С. Астапов, Ю. А. Николаев, В. Ю. Ульяницкий

(Новосибирск)

При сильном повышении начального давления p_0 и при сильном понижении температуры T_0 взрывчатой газовой смеси величина плотности в детонационной волне может достигать значений, сравнимых с плотностью жидкости. При этом свойства смеси будут существенно отличаться от свойств идеального газа и при расчете параметров детонации в таких условиях необходимо пользоваться уравнением состояния неидеального газа.

Скорость детонации смесей на основе водорода, измеренная в экспериментах [1] при нормальной начальной температуре, оказывается выше рассчитанной по модели идеального газа при $p_0 = 35$ и 70 атм. В [2] обнаружено, что экспериментальное значение скорости детонации смесей на основе этилена заметно отличается от идеального расчета уже при $p_0 \geq 7$ атм. При анализе применимости различных уравнений состояния неидеального газа для расчета параметров детонации авторы [2] исключили из рассмотрения часть компонентов, содержащихся в продуктах детонации, и использовали ряд других приближений, что, по их мнению, и не позволило сделать обоснованного заключения.

Из многочисленных уравнений состояния неидеального газа уравнение Ван-дер-Ваальса наиболее простое, достаточно надежно «работает» в широком диапазоне температур и давлений и, что особенно важно, позволяет получить простое аналитическое выражение для химического потенциала и вывести явные уравнения химического равновесия неидеальной многокомпонентной газовой системы.

В настоящей работе метод расчета параметров детонации газовых смесей, изложенный в [3], обобщен на случай неидеального газа, описываемого уравнением состояния Ван-дер-Ваальса, и приведены результаты расчетов для смесей на основе водорода.

В дальнейшем используются следующие обозначения: p , ρ , T — давление, плотность и температура газовой смеси соответственно; R — универсальная газовая постоянная; μ — молекулярная масса; $\bar{Y}_i$ — относительные концентрации компонентов смеси; K_{pi} — константы химического равновесия; v_i — стехиометрические коэффициенты; I — энтальпия смеси; M_0 , D_0 — число Маха и скорость детонации Чепмена — Жуге соответственно; u_0 , u — скорость газового потока до и после фронта детонационной волны соответственно; c — скорость звука; c_f — «замороженная» скорость звука в продуктах детонации; γ_f — «замороженный» показатель адиабаты; E_{*2} , E_{*3} — критическая энергия прямого инициирования в случае осевой и центральной симметрии соответственно; r_{*2} , r_{*3} — критические радиусы инициирования; a , b — константы Ван-дер-Ваальса.

Индексы обозначают: 0 — начальное состояние, 1 — состояние на ударной волне; 2 — состояние в плоскости Чепмена — Жуге; 3 — состояние, соответствующее адиабатическому взрыву при постоянном объеме; 4 — состояние в отраженной волне; и, н — модель идеального и неидеального газа соответственно.