

АНАЛИЗ РЕЖИМОВ ГОРЕНИЯ И ДЕТОНАЦИИ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

Б. С. Ермолаев¹, Б. А. Хасанов², К. А. Слепцов³

¹ИХФ РАН

г. Москва, Россия

²Институт ППРИМ УПР 3394 CNRS

Пуатье, Франция

³ВНИИАЭС

г. Москва, Россия

Волны химического превращения в газовых смесях, заполняющих свободный объем пористого слоя из зерен инертного материала, охватывают широкий диапазон скоростей от нормального горения до почти идеальной детонации. Исследования представляют интерес для проектирования устройств, реализующих процесс детонационного горения, и обеспечения взрывобезопасности при эксплуатации газовых систем. В литературе содержится обширная экспериментальная информация относительно режимов, их границ и скоростей горения в широком диапазоне газоздушных и кислородных смесей для пористых слоев с различными свойствами (см., например, [1]). Численное моделирование применялось ограничено, лишь для анализа медленного режима горения газов вблизи предела погасания применительно к пористым горелкам.

Данная работа посвящена численному моделированию режимов быстрого горения и детонации в пористых инертных засыпках и анализу стационарных решений. Для расчетов использовалась одномерная версия компьютерной программы EFAE [2], разработанной ранее в рамках механики многофазных реагирующих сред. Процесс горения инициируется точечным взрывом заданной энергии в свободном объеме у закрытого торца трубы. Химическое превращение газа моделируется одностадийной реакцией Аррениусовского типа с константами, которые подбирались, исходя из имеющихся экспериментальных данных по задержкам самовоспламенения за

Таблица 1 Экспериментальные и рассчитанные скорости волн горения и детонации водородно-воздушных смесей

d_0 , мм	P_0 , МПа	W , м/с		
		Эксперимент [1]	Расчет, базовая кинетика	Расчет, кинетика 2
35% водород + воздух				
11,5	0,1	830	1870	1110
5,0	0,1	650	1640	700
2,5	0,1	580	560 ^{*)}	540
1,0	0,1			Погасание
2,5	0,09	Погасание		
5,0	0,05	570	480 ^{*)}	
5,0	0,03	Погасание	Погасание	
15% водород + воздух				
11,5	0,1	80	300	
5,0	0,1	Погасание	Погасание	
11,5	0,2	300	380	
5,0	0,3	120	180	

^{*)}Галопирующий режим горения.

отраженными ударными волнами. Расчеты проведены для водородно-воздушных смесей с 35% и 15% H_2 и сопоставлены с литературными экспериментальными данными, в которых варьировалось начальное давление и диаметр частиц засыпки.

С помощью численного моделирования удалось получить все 3 режима горения (медленное, быстрое и сверхзвуковое), которые наблюдаются в эксперименте, а также прекращение горения при условиях, когда начальное давление газа и размер частиц засыпки оказывались ниже пороговых значений. Расчеты качественно воспроизводят опытные данные по изменению режима горения при переходе от стехиометрии к бедной смеси и по влиянию начального давления и размера частиц засыпки на скорость волны горения и пороговые условия смены режима горения и погасания. Согласие с опытами получено по величинам давления в волне и размерам зон. Полученные результаты частично иллюстрируются в табл. 1 и на рис. 1–3.

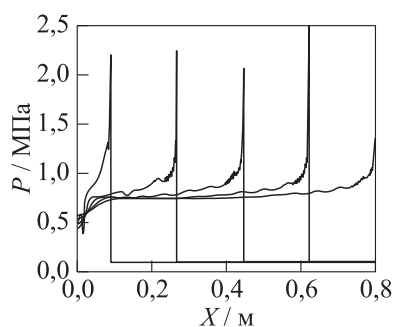


Рис. 1 Профили давления с шагом 0,1 мс: детонационный режим; смесь с 35% H_2 ; $W = 1640$ м/с. Расчет с базовым набором, $d_0 = 5$ мм, $P_0 = 0,1$ МПа.

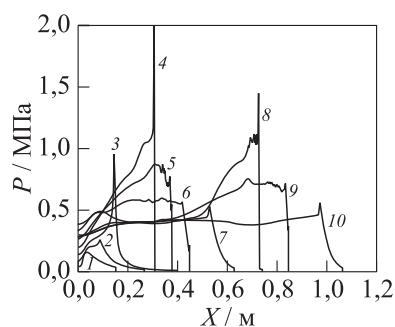


Рис. 2 Профили давления (1 — 0,25 мс; 2 — 0,5; 3 — 0,65; 4 — 0,75; 5 — 0,8; 6 — 0,9; 7 — 1,0; 8 — 1,5; 9 — 1,6; 10 — 2,0 мс): галолирующий режим сверхзвукового горения; смесь с 35% H_2 , $W = 560$ м/с. Расчет с базовым набором, $d_0 = 2,5$ мм, $P_0 = 0,1$ МПа

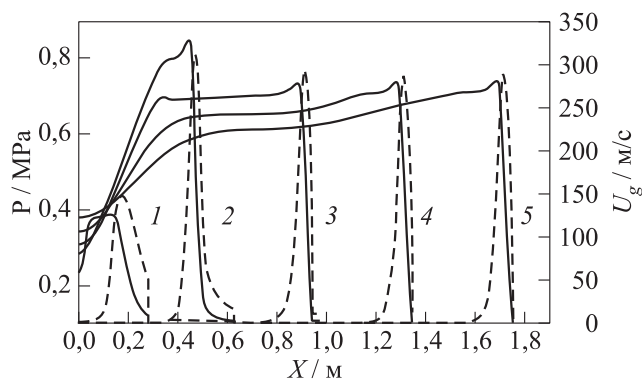


Рис. 3 Профили давления с шагом 0,4 мс: сверхзвуковое горение с выходом на скорость 510 м/с; смесь с 35% H_2 . Расчет с кинетикой 2, $d_0 = 2,5$ мм, $P_0 = 0,1$ МПа

Эволюция волны горения, вошедшей в пористый слой, зависит от свойств газа, размера частиц и энергии инициирования. Типично, что волна горения в засыпке либо быстро выходит на установившийся режим, либо погасает, если начальные условия ниже пороговых. Вместе с тем, в расчетах на смеси с 35% H_2 обнаружен некоторый диапазон начальных условий, когда волна сверхзвукового горения выходит на галопирующий режим. В этом случае фаза ускорения волны, завершающаяся формированием детонационноподобного пика давления, периодически сменяется фазой депрессии с профилем давления без пика и гораздо меньшей скоростью распространения и наоборот. В работах, посвященных опытам с засыпками, нет информации о галопирующем режиме, который дали расчеты. Правда, что-то похожее на галопирующий режим наблюдалось в работе [3] в опытах по распространению детонационной волны по газу (ацетиленовоздушные смеси) в капиллярах.

Сравнивая условия течения реагирующего газа в пористой засыпке и капилляре, можно предположить, что причиной, подавляющей галопирующий режим при распространении волны горения в пористой среде, является значительно более сильная неоднородность распределения характеристик газа и, прежде всего, температуры на мезоуровне, т. е. в масштабе струй газа, обтекающих отдельные частицы засыпки. В расчетах скорость химического превращения газа вычислялась по осредненной температуре, тогда как в реальности химическое превращение газа может начаться и проходить с более высокой скоростью в отдельных очагах, имеющих более высокую температуру, чем осредненное значение. Можно полагать, что брутто-кинетические константы с более низкой энергией активации дадут лучшие результаты при численном моделировании горения газа в засыпке, чем кинетические коэффициенты, отвечающие экспериментальным данным по воспламенению в ударной трубе, т. е. в достаточно однородном газе. Проведенные расчеты подтвердили это предположение. Получен выход волны на установившуюся скорость взамен галопирующего режима. Также улучшилось согласие расчетов с экспериментом по уровню скорости волны и предельным условиям горения.

Одним из дискуссионных вопросов является структура течения в волне сверхзвукового горения, благодаря которой осуществляется отбор установившейся скорости. В литературе волны горения, име-

ющие скорость выше скорости звука в газе, отнесены к детонации. Чтобы разобраться в ситуации, мы рассмотрели систему уравнений стационарного горения газа в неподвижной пористой засыпке. Путем обычных преобразований можно вывести основное уравнение, которое имеет следующий вид:

$$\frac{du}{dx} = \frac{(W - \gamma u)F/\phi_0 + (\gamma - 1) [Q/\phi_0 - q\rho\dot{M}]}{P\gamma - \rho_0 W(W - u)}. \quad (1)$$

Здесь u — скорость течения газа; P — давление; x — координата; q и M — теплота и скорость химической реакции; F — сила межфазного трения; Q — интенсивность теплоотдачи от газа к засыпке. Если скорость волны W выше скорости звука в исходном газе, то расчетная область начинается на ударном скачке. Если температура на ударном скачке невысока, то скорость химической реакции равна нулю и вдоль интегральной кривой скорость u увеличивается, одновременно растут давление и температура. Как только включается химическая реакция, скорость u начинает снижаться. В детонационном режиме интегральная кривая проходит через особую седловую точку, в которой числитель и знаменатель уравнения (1) одновременно обращаются в нуль. Это условие обеспечивает отбор скорости волны. В режиме дефлаграции отбор скорости волны можно обеспечить, если одновременно с завершением химической реакции достигается $u = 0$ (соответственно, F и Q также обращаются в нуль). Результаты численного моделирования (см. рис. 3) подтверждают это условие. Интегральные кривые в координатах давление–удельный объем, полученные по стационарной модели для воздушной смеси с 35% H_2 при различных диаметрах частиц засыпки приведены на рис. 4. Решения при скорости от 1100 м/с и более отвечают детонационному режиму; решения при меньшей скорости относятся к дефлаграции. Существенное отличие от общепринятой картины, когда детонационные и дефлаграционные режимы размещаются в разных квадрантах диаграммы, объясняется особым характером течения в порах.

Итак, численное моделирование горения и детонации водородно-воздушных смесей, заполняющих инертные засыпки, показало, что теоретическая модель, разработанная в рамках механики двухфазных реагирующих сред, дает приемлемые результаты, позволяя

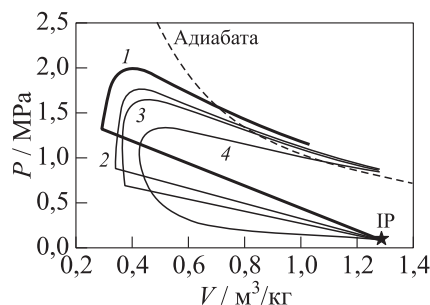


Рис. 4 Пример расчета по стационарной модели, смесь с 35% H_2 , $P_0 = 0,1$ МПа, решения для разных диаметров частиц засыпки (IP — начальная точка). Детонация: 1 — $d_0 = 6$ мм, $D = 1435$ м/с; 2 — $d_0 = 5$ мм, $D = 1174$ м/с. Дефлаграция: 3 — $d_0 = 4,5$ мм, $D = 1045$ м/с; 4 — $d_0 = 2,5$ мм, $D = 591$ м/с

воспроизводить основные свойства и закономерности процесса, наблюдаемые в эксперименте. Правда, для получения количественного согласия и исключения решений в виде галолирующего режима потребовалось изменить макрокинетические коэффициенты химического превращения газа, выведенные на основе экспериментальных данных по воспламенению в ударной трубе. Проведен анализ структуры течения в зоне реакции стационарной волны. Показано, что сверхзвуковые волны, распространяющиеся со скоростью ниже ~ 1100 м/с (скорость звука в продуктах детонации), в конце зоны реакции имеют нулевую скорость газа, плотность продуктов равна начальной плотности газа, а поверхность Чепмена–Жуге отсутствует. Таким образом, по формальным признакам эти волны нельзя относить к детонации, как это делалось до сих пор.

Литература

1. Пинаев А. В., Лямин Г. А. Фундаментальные законы, управляющие дозвуковым и детонационным горением газов в инертной пористой среде // ФГВ, 1989. Т. 25. № 4. С. 77.
2. Khasainov, B. A., and B. Veyssiere. 1996. Initiation of detonation regimes in hybrid two-phase mixtures. *Shock Waves* 6:9.
3. Манжалеи В. И. Пределы низкоскоростной детонации газовых смесей // ФГВ, 1999. Т. 35. № 3. С. 89.