

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ ГОРЕНИЯ ДВУХФАЗНОЙ СРЕДЫ ПРИ ПОВЫШЕННОМ НАЧАЛЬНОМ ДАВЛЕНИИ

Б. Е. Гельфанд, С. А. Губин, С. М. Когарко

Рабочий процесс в большинстве энергетических установок совершается при давлении газа, намного превосходящем атмосферное. Поэтому всегда представляет интерес проверить достоверность закономерностей, установленных при низком давлении и при высоком начальном давлении газа. Как правило, в большинстве экспериментальных работ основные результаты представляются в форме критериальных соотношений и поэтому при изменении какого-либо параметра системы целесообразнее всего проверять изменение тех процессов, на которые влияет указанный параметр.

Одним из важнейших процессов, определяющих режим горения двухфазной среды, состоящей из капель жидкости и газа, является процесс дробления капель [1]. Критериальным параметром для него служит число Вебера $We = \rho u^2 d (2\sigma)^{-1}$. Здесь ρ — плотность газа, u — относительная скорость газа и капля, d — диаметр капля, σ — поверхностное натяжение жидкости. Скорость процесса дробления dm/dt пропорциональна величине $(\rho u^2)^{0,5} d \rho_l^{-0,5}$, где ρ_l — плотность жидкости. Легко заметить, что давление газа служит основной величиной, от которой зависит возникновение процесса разрушения капель и его темп. С ростом начального давления изменяется время начала разрушения капель и критическая величина интенсивности возмущения давления, при которой происходит разрушение капель жидких компонентов. Естественно ожидать, что вместе с указанными величинами изменятся и параметры волн давления, необходимых для возбуждения нестационарных режимов горения в двухфазных смесях. При изучении взаимодействия волн давления с горючей газожидкостной смесью при повышенном начальном давлении желательно определить диапазон параметров, внутри которого процесс дробления остается основным фактором возбуждения нестационарного режима горения. Действительно, вместе с увеличением плотности газа возрастает величина We и убывает время дробления. При некотором давлении газа скорость процесса дробления оказывается столь значительной, что скорость горения начинает зависеть от динамических характеристик других процессов, таких как испарение и смешение.

Опыты проводились на установке, описанной в работе [2]. Исследовалось взаимодействие ударных волн с двухфазной смесью, состоящей из капель керосина диаметром $d = 0,6$ мм и эквимолярной смеси кислорода с азотом. Начальное давление газа изменялось в интервале 1–11 бар. Смесью поджигалась в ударной волне от очага нагретого газообразного окислителя с температурой газа $T \approx 1800$ К. При этой температуре в соответствии с данными работы [3] задержка воспламенения двухфазной смеси за фронтом волны определяется только временем начала разрушения капель. Основными измеряемыми параметрами в экспериментах были: начальное давление газа p_0 , число Маха ударной волны M , перепад давления на фронте волны Δp , время запаздывания волны сжатия за фронтом ударной волны τ , и скорость нарастания давления в волне. Количество горючего, впрыскиваемое в камеру сгорания, каковой являлась камера низкого давления ударной трубы, оставалось неизменным. Вследствие этого менялся коэффициент избытка окислителя.

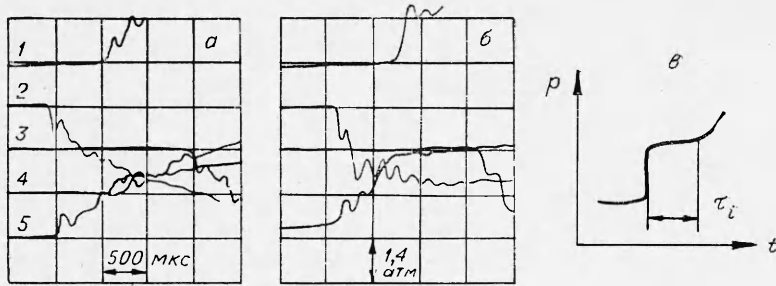


Рис. 1.

На рис. 1, а, б, представлены типичные записи давления, полученные при возбуждении нестационарного режима горения под действием ударных волн (а — $M=1,05$, $p_0=4$ бар; б — $M=1,04$ и $p_0=6$ бар). Лучи 1—5 отвечают показаниям датчиков, отстоящих на расстоянии 1200, 960, 720, 480 и 240 мм от места встречи ударной волны с двухфазной средой. Схематизированная запись показаний одного датчика представлена на рис. 1, в.

Как видно, за фронтом исходной ударной волны 5 через время τ_i появляется вторичная волна сжатия 4, догоняющая передний ударный фронт. С ростом начального давления τ_i убывает (см. рис. 2, 1 — $d_0=0,6$ мм, 2 — $d_0=0,95$ мм, 3 — $d_0=2$ мм). В качестве опорного значения времени, к которому относятся величины τ_i , взято $t_0 = d\rho_j^{0,5}(\rho u^2)^{-0,5}$. В настоящих опытах We менялось от 35 до 240.

Из представленных регистраций легко заметить, что скорость нарастания давлений в волне сжатия с увеличением p_0 возр астает, что способствует быстрейшему возбуждению гетерогенной детонации. Увеличение крутизны вторичных волн сжатия наблюдалось вплоть до $p_0=11$ бар. Таким образом, несмотря на существенное обеднение смеси горючим (при изменении давления от 1 до 11 бар коэффициент избытка окислителя возрос в 11 раз), увеличение начального давления стимулирует переход горения двухфазной смеси в детонацию.

При проведении опытов определялась интенсивность возмущений, уже не вызывающих возбуждение нестационарного режима горения. Результаты опытов представлены на рис. 3, где черные точки соответствуют опытам, в которых зарегистрировано появление нестационарного режима горения, а светлые точки — опытам в которых не наблюдалось изменения параметров исходного возмущения. Отчетливо видно расширение области нестационарных режимов взаимодействия ударных волн с процессом горения двухфазных смесей.

Полученные экспериментальные данные легко объяснить с точки зрения гипотезы о ведущей роли процесса дробления капель при зарождении нестационарного режима горения двухфазной смеси. Воспользуемся известными критериальными соотношениями для процесса дробления и проанализируем изменение остальных параметров системы при повышении начального давления. Существование процесса дробления определяется критерием Вебера $We^* = 5 \div 7$. Условие интенсивного разрушения капель со срывом пограничного слоя жидкости определяется неравенством $We_i^* \geq 2Lp^{0,33}$. Здесь $Lp = \sigma d\rho_j \mu_j^{-2}$ — число Лапласа, а μ_j — вязкость жидкости. По представленным критериальным соотношениям найдена критическая интенсивность возмущений $^1 \delta p = \delta p_1$ и $\delta p = \delta p_2$. Ве-

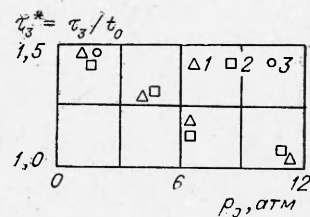


Рис. 2.

$$^1 \delta p = \Delta p p_0^{-1}.$$

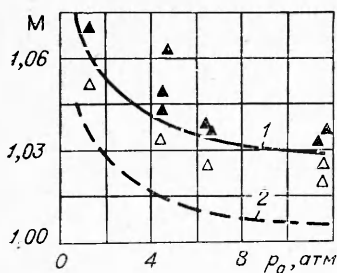


Рис. 3.

пель легко понять почему в области $We^* < We < We_1^*$ нестационарное горение не возбуждается. Дробление капель в указанном диапазоне чисел Вебера носит хаотический характер. В результате разрушения капель образуются крупные вторичные частицы, не образующие реакционноспособные очаги горючей смеси за фронтом волны. При $We > We_1^*$ картина дробления меняется качественно, так как с капель срываются мельчайшие частицы жидкости, образующие позади лидирующего фронта ударной волны очаги горючей смеси, воспламенение которых приводит к появлению вторичных волн давления. При сохранении неизменной интенсивности возмущения и при увеличении начального давления возрастает плотность газа за ударным фронтом. Вместе с увеличением плотности наблюдается утоньшение спектра распыления исходных капель, что способствует все более быстрому воспламенению облака вторичных капель. Этим обстоятельством и объясняется факт увеличения скорости нарастания давления в волне сжатия при увеличении уровня начального давления в системе. Сокращение времени запаздывания появления вторичных волн определяется уменьшением интервала времени от момента пересечения капли ударной волной до начала ее разрушения.

Таким образом, все основные особенности появления нестационарных режимов горения при повышенном давлении объясняются теми изменениями процесса дробления капель, которые вызваны увеличением плотности газа.

Институт химической физики
АН СССР, Москва

Поступила в редакцию
24/II 1975

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Борисов, Б. Е. Гельфанд и др. Докл. АН СССР, 1970, 190, 3, 621.
2. А. А. Борисов, Б. Е. Гельфанд и др. ПМТФ, 1970, 1, 168.
3. Б. Е. Гельфанд, С. А. Губин и др. В сб.; Горение и взрыв. М., «Наука», 1973.

УДК 533.6.011.72

К ТЕОРИИ УСТОЙЧИВОСТИ УДАРНЫХ ВОЛН

А. С. Плешанов

Устойчивость ударных волн по отношению к периодическим возмущениям вдоль поверхности разрыва была впервые рассмотрена в [1], где в зависимости от величины параметра $\varphi = j^2 (\partial V / \partial p)_n$ были получены области абсолютной неустойчивости, в которых возмущения экспоненциально растут со временем, убывая экспоненциально же с удале-