

УДК 629.7.018.3

МЕХАНИКА

Член-корреспондент АН СССР Г. Г. ЧЕРНЫЙ, С. Ю. ЧЕРНЯВСКИЙ

ДВИЖЕНИЕ ЗАТУПЛЕННЫХ ТЕЛ С БОЛЬШОЙ СКОРОСТЬЮ В СМЕСИ ВОДОРОДА С КИСЛОРОДОМ

В работах (^{1, 6}) приведены результаты теоретического исследования обтекания затупленных тел, движущихся с гиперзвуковой скоростью в горючей смеси газов с образованием перед телом стационарной детонационной волны. Перескакая волна детонации перед головной частью тела, постепенно ослабевая, переходит на некотором расстоянии от тела к режиму Чепмена — Жуге. В экспериментальных исследованиях (¹⁻⁴) при выстреливании тел в водородно-воздушную или водородно-кислородную смесь наблюдались режимы обтекания с распадом головной перескака-

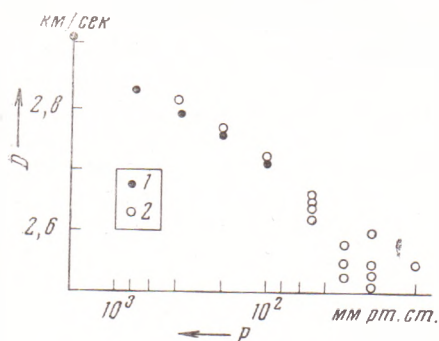


Рис. 1. Зависимость скорости детонации от давления смеси: 1 — расчетные, 2 — измеренные значения

распространения по нормали к поверхности для части фронта с прямолинейной образующей $v_n = 2,55$ км/сек заметно меньше скорости детонации Чепмена — Жуге, равной для данных условий 2,76 км/сек (⁵).

С целью определения условий существования стационарной детонационной волны было проведено экспериментальное исследование влияния давления стехиометрической водородно-кислородной смеси $2H_2 + O_2$ и скорости полета на картину обтекания цилиндрической модели диаметром 12,7 мм со сферическим затуплением. Исследования проводились на установке, состоящей из легкогазовой пушки для метания моделей и герметизированной баллистической трассы длиной 4 м с внутренним диаметром 0,35 м, заполненной смесью газов. Картина обтекания модели газом в баллистической трассе регистрировалась шпирен-методом с помощью оптической системы, включающей искровой источник света с длительностью вспышки около 0,05 мсек, теневой прибор ТЕ-19, ячейку Керра и фотоаппарат. Исследования проводились при начальных давлениях смеси 50, 100, 186, 250 и 380 мм рт. ст. Скорость моделей изменялась от значений, несколько меньших скорости детонации, до величин, заметно превышающих ее. Зависимость скорости детонации от давления смеси, взятая из работы (⁵), приведена на рис. 1.

На рис. 2 приведены фотографии обтекания моделей при скоростях, несколько меньших скорости детонации ($v = 2,57 - 2,64$ км/сек). В смеси

с начальным давлением 100 мм рт. ст. (рис. 2а) реализуется режим обтекания с двумя фронтами: адиабатическим ударным фронтом и колеблющимся с большой частотой фронтом медленного горения. При начальном давлении горючей смеси, равном 186 мм рт. ст., наблюдается режим пульсационного горения за ударной волной. В этом случае в поле течения за моделью возникает детонация (рис. 2б); фотография получена вблизи от

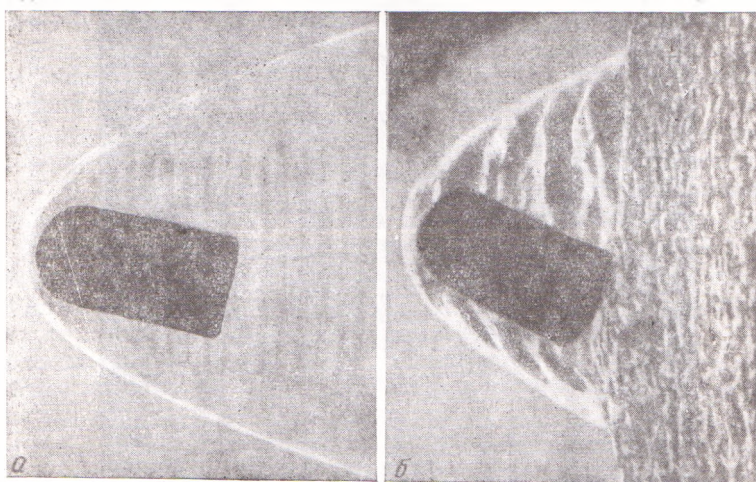


Рис. 2. а — $p=100$ мм рт. ст., $v=2,57$ км/сек; б — $p=186$ мм рт. ст., $v=2,58$ км/сек

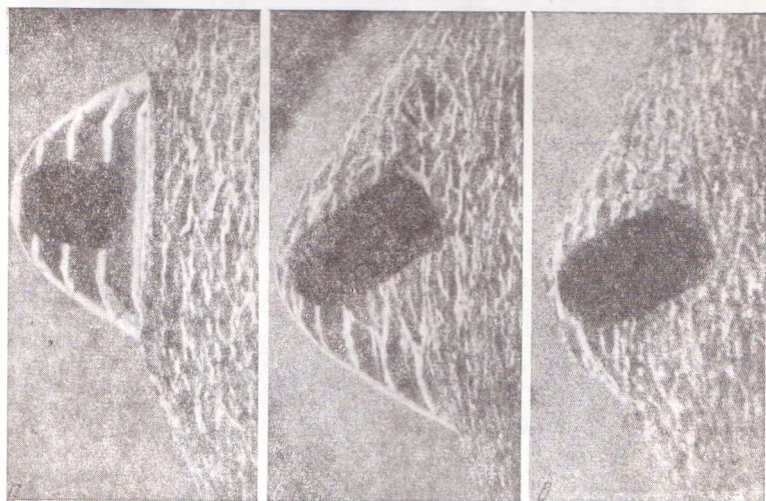


Рис. 3. а — $p=186$ мм рт. ст., $v=2,89$ км/сек, $v_n=2,70$ км/сек, $D=2,76$ км/сек; б — $p=186$ мм рт. ст., $v=2,86$ км/сек; в — $p=250$ мм рт. ст., $v=2,80$ км/сек, $v_n=2,68$ км/сек, $D=2,77$ км/сек

места входа модели в трассу. Скорость образовавшейся детонационной волны больше скорости модели, так что с течением времени волна детонации обгоняет модель.

Следующая серия экспериментов (рис. 3) проведена при скоростях модели, несколько больших скорости детонации для исследованного диапазона давлений газовой смеси ($v=2,80-2,88$ км/сек). Для начального давления смеси 186 мм рт. ст. обнаружен не отмеченный ранее режим обтекания (рис. 3а). Около модели возникает небольшая зона с адиабати-



Рис. 4. $a - p = 186$ мм рт. ст., $v = 3,06$ км/сек; $b - p = 380$ мм рт. ст., $v = 3,3$ км/сек, $v_n = 2,81$ км/сек; $D = 2,81$ км/сек

ческим ударным фронтом и пульсирующим горением за ним; вслед за этой зоной движется детонационная волна. Место перехода ударного фронта в волну детонации чувствительно к небольшим изменениям условий полета модели. На рис. 3б видно, что при полете модели в тех же условиях, что и на рис. 3а, но под углом атаки, на наветренной стороне модели детонационная волна начинается непосредственно у головной части, а на подветренной стороне она возникает лишь на некотором удалении вниз по потоку. При повышении начального давления горючей смеси до 250 мм рт. ст. детонационная волна начинается непосредственно от головной части модели (рис. 3в). Во всех случаях скорость распространения детонационной волны по нормали к поверхности на участках с прямолинейной образующей совпала или оказалась лишь немного (не более чем на 3,6%) ниже скорости детонации, полученной в ударной трубе и рассчитанная путем ⁽⁵⁾ для аналогичных давлений смеси. Такое совпадение позволяет говорить о стационарном характере описанных режимов обтекания моделей. Отметим, что при движении моделей с гиперзвуковой скоростью детонационный режим обтекания возникает при значительно более высоких начальных давлениях газовой смеси, чем детонация в ударных трубах (10 мм рт. ст., ⁽⁵⁾).

Увеличение скорости модели до 3,06 км/сек при начальном давлении смеси 186 мм рт. ст. вызвало резкое изменение картины обтекания. Детонационная волна не возникает в зоне течения, непосредственно прилегающей к модели, а движется в направлении полета модели с нормальной скоростью детонации (рис. 4а). Режим обтекания со стационарной детонационной волной при увеличении скорости модели сохраняется, если одновременно повысить давление горючей смеси, уменьшив этим влияние эндотермических процессов, связанных с диссоциацией.

На рис. 4б приведена картина обтекания модели, движущейся со скоростью 3,3 км/сек в смеси с давлением 380 мм рт. ст. В этих условиях осуществляется обтекание с детонационной головной волной, которая на некотором удалении от тела распространяется в режиме Чепмена — Жуге.

Научно-исследовательский институт механики
Московского государственного университета
им. М. В. Ломоносова

Поступило
15 II 1973

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Г. Г. Черный, *Astronautica acta*, 13, №№ 5, 6 (1968).
- ² A Technique for Studying Supersonic Combustion in the Vicinity of a Hypersonic Missile. *Nat. Bur. Stand. Techn. News Bull.*, 44 (1960).
- ³ H. Behrens, W. Struth, F. Wecken, *Studies of Hypervelocity Firings into Mixtures of Hydrogen with Air or with Oxygen*. X Symposium (Intern.) on Combustion (1965).
- ⁴ H. F. Lehr, *Experimente zur stossinduzierten Verbrennung in Wasserstoff (Luft- und Wasserstoff) Sauerstoff — Gemischen*. Institut Franco-Allemand de Recherches de Saint Louis, France, Rapport — Bericht 20/71 (1971).
- ⁵ Г. Вагнер, Детонация в газе и структура детонационной зоны. Сборн. Основные результаты экспериментов на ударных трубах, М., 1963.
- ⁶ G. G. Chernyi, S. M. Gilinskiy, *Astronautica acta*, 15 (1970).