

СТАБИЛИЗАЦИЯ ДЕТОНАЦИИ ПРИ ЛЮБЫХ ВХОДЯЩИХ ЧИСЛАХ МАХА

Т. Фудживара¹, М. Хишида¹, Ж. Киндрацки², П. Волански²¹Университет г. Нагойя, Нагойя 464-8603, Япония, fujiwaratos35@ybb.ne.jp²Варшавский технологический университет, 00-661 Варшава, Польша

Экспериментально и теоретически исследована устойчивость распространения непрерывной детонации в камере сгорания, состоящей из двух коаксиальных цилиндров при различной скорости входящей смеси. Показано, что детонация стабилизируется при скоростях как больших, так и меньших скорости детонации Чепмена — Жуге.

Ключевые слова: непрерывная детонация, вращающаяся детонация, устойчивость детонации.

При проведении экспериментальных [1] и расчетных работ по проекту «Двигатель с вращающейся детонацией», основой которого (двигателя) является детонационная волна в тороидальной области коаксиального цилиндра (рис. 1), мы установили простой, но интересный факт, связанный с детонационной волной. Вращающаяся детонация, которая устойчиво распространяется азимутально, не распространяется вперед в аксиальном направлении, даже если аксиальная скорость входящей топливно-газовой смеси B намного меньше скорости детонации D_{CJ} . При этом вращающаяся детонация стабилизируется как «устойчивая детонация» из-за существования фрон-

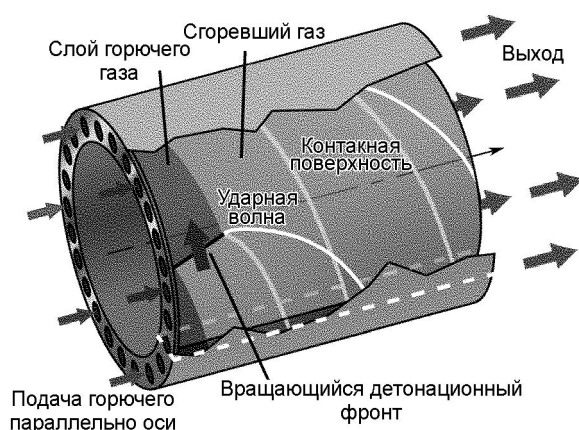


Рис. 1. Моментальный «снимок» поля потока в двигателе на основе вращающейся детонации

Т. Fujiwara¹, М. Hishida¹, Ж. Kindracki², П. Wolanski².

¹Nagoya University, Nagoya 464-8603, Japan.

²Warsaw University of Technology, 00-661 Warsaw, Poland.

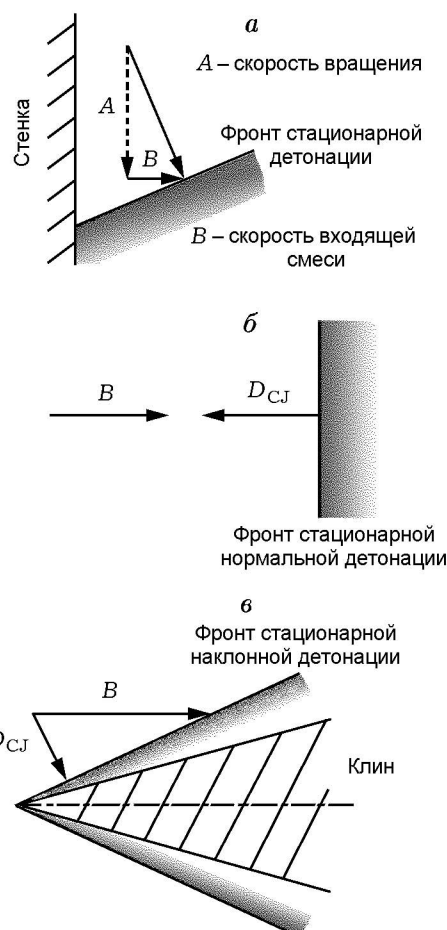


Рис. 2. Устойчивые детонации при различных скоростях входа горючей смеси:

a — вращающаяся детонация, $0 < B < D = (A^2 + B^2)^{1/2} < D_{CJ}$; $б$ — стационарная нормальная детонация, $B = D_{CJ}$; $в$ — стационарная наклонная детонация, $B > D_{CJ}$

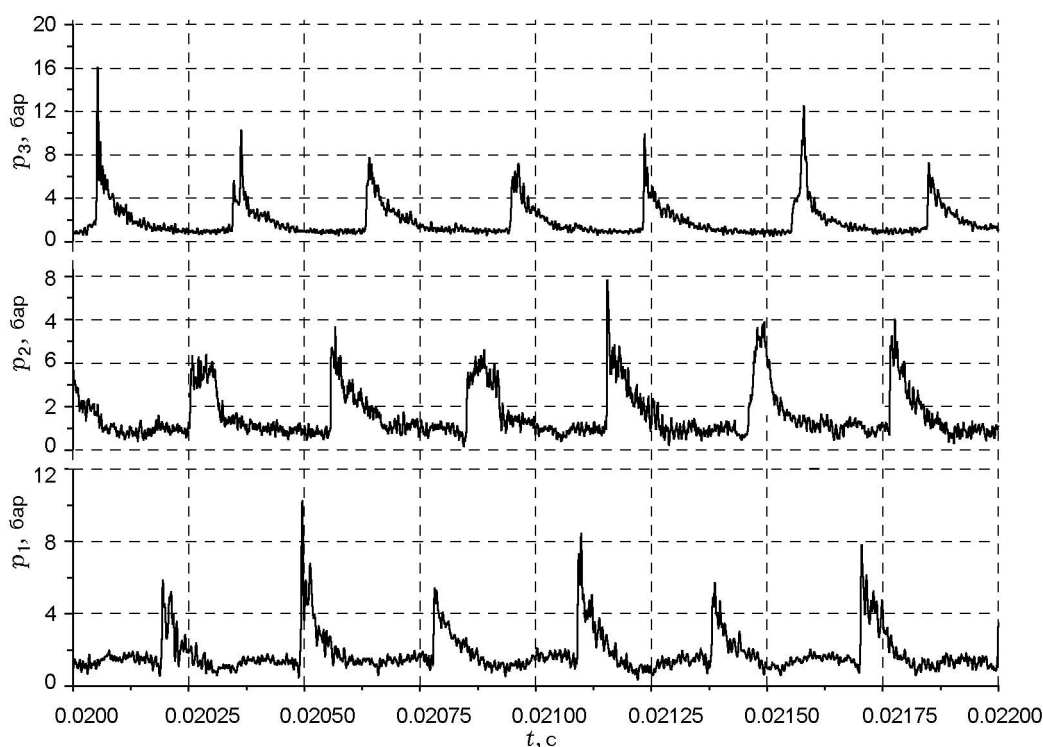


Рис. 3. Экспериментальные профили давления вращающейся детонации в водородовоздушной смеси, распространяющейся азимутально в тороидальной части коаксиальных цилиндров диаметрами 140 и 150 мм

тальной стенки, аналогично тому, как детонация стабилизируется на клине при скорости потока, большей скорости детонации Чепмена — Жуге («сверхдетонационный режим») (рис. 2). Устойчивость распространения подтверждена экспериментально (рис. 3). В одном поперечном сечении, где распространяется вращающаяся детонация, размещались три датчика давления. Все датчики показали, что в течение нескольких сотен циклов наблюдается устойчивое вращение детонации. Численный анализ (рис. 4) также подтвердил, что детонационная волна стабильно вращается в течение сотен циклов. Разброс пиковых значений на рис. 4 вызван тройными точками, движущимися на детонационной волне, в то время как период вращения (временной интервал от пика до пика) равен точно 132.3 мкс, что дает скорость вращения $A = 200 \text{ мм}/132.3 \text{ мкс} = 1512 \text{ м/с}$. При векторном сложении этого значения A и скорости входящей горючей смеси $B = 331.4 \text{ м/с}$ (предполагается, что число Маха инъекции $M = 1$), т. е. $D^2 = A^2 + B^2$ (см. рис. 2), получим нормальную скорость распространения $D = 1548 \text{ м/с}$. Отметим, что

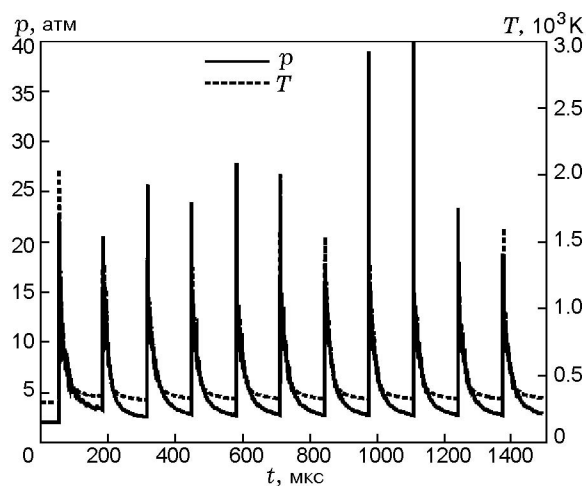


Рис. 4. Профили давления и температуры, рассчитанные на расстоянии 0.05 и 100 мм соответственно по азимуту и в аксиальном направлении от плоскости входа

это значение дает дефицит скорости $(D_{CJ} - D)/D_{CJ} = 0.027$, где $D_{CJ} = 1591 \text{ м/с}$, который может быть объяснен расширением трубки тока.

Следовательно, упрочившееся представление, что устойчивые или стабилизированные детонационные волны могут существовать только при скорости входящей горючей смеси большей, чем скорость Чепмена — Жуге, может быть изменено на следующее: они могут стабилизироваться при любых значениях скоростей входящей смеси, больших нуля. Необходимо отметить, что ограничение, связанное с требованием «сверхдетонационного режима», препятствовало использованию детонации для мощных двигателей.

В настоящее время изучение вращающейся (некоторые специалисты называют ее непрерывной) детонации, экспериментальное и численное, ведут несколько групп исследователей [1–3]. Тем не менее, никто не обращал внимание на то, что она может рассматриваться как расширение формы существования устойчивых детонационных волн даже при скоростях входящего горючего газа, меньших скорости детонации.

В зависимости от входящей скорости потока длина и наклон вращающейся детонационной волны меняются, как это легко себе представить из рис. 1. Когда скорость низкая, детонационная волна короткая и угол ее наклона близок к нулю (см. рис. 2, *a*). При больших входящих скоростях волна становится длиннее и увеличивается аксиальная компонента скорости распространения. Когда входящая скорость равна скорости Чепмена — Жуге, детонационный фронт становится точно по нормали к оси, обеспечивая тем самым идеальное равновесие с входящим потоком (см. рис. 2, *б*).

При скорости, большей скорости Чепмена — Жуге, существует наклонная детонационная волна на клине (см. рис. 2, *в*), не нуждающаяся в объяснении.

Таким образом, мы хотели бы отметить, что природа сама показывает, каким образом детонация может реализовываться при низких входящих скоростях: направление распространения переходит в азимутальное в форме «стационарного вращения».

Зная этот простой факт, ученые и инженеры могут получить более ясное понимание того, что необходимо выяснить в применении детонации к новым и универсальным двигателям.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Wolanski P., Kindracki J., Fujiwara T.** An experimental study of small rotating detonation engine // Pulsed and Continuous Detonations / G. Roy et al. (Eds). — М.: Torus Press, 2006. — P. 332–338.
2. **Быковский Ф. А., Митрофанов В. В., Ведерников Е. Ф.** Непрерывное детонационное сжигание топливно-воздушных смесей // Физика горения и взрыва. — 1997. — Т. 33, № 3. — С. 344–353.
3. **Ждан С. А., Быковский Ф. А., Ведерников Е. Ф.** Математическое моделирование вращающейся волны детонации в водородно-кислородной смеси // Физика горения и взрыва. — 2007. — Т. 43, № 4. — С. 449–459.

Поступила в редакцию 1/ХП 2008 г.