

## РАСЧЕТ НЕПРЕРЫВНОЙ СПИНОВОЙ ДЕТОНАЦИИ СМЕСИ ВОДОРОД-КИСЛОРОД В КОЛЬЦЕВОЙ КАМЕРЕ ПРИ ЭЖЕКЦИИ КИСЛОРОДА

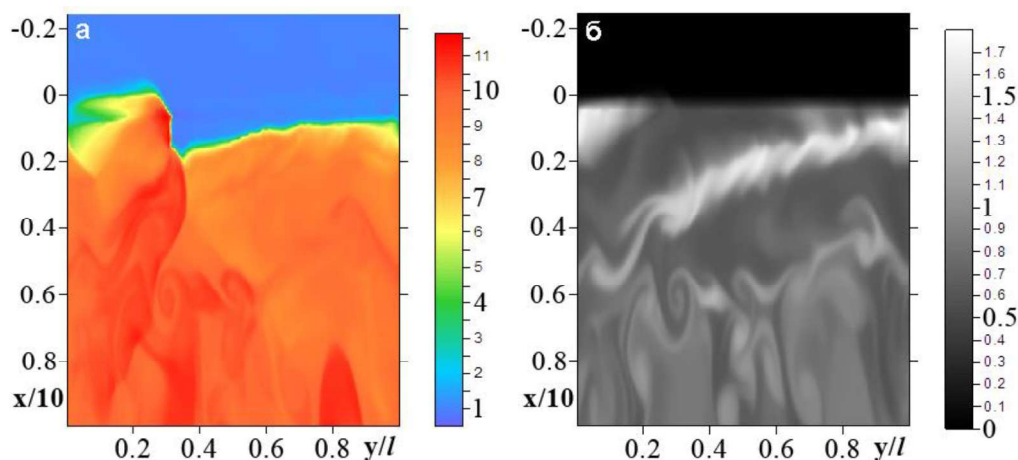
Е.В. Симонов, С.А. Ждан

*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,  
630090, Новосибирск, Россия*

Результаты исследований непрерывной спиновой детонации (НСД) по схеме Б.В. Войцеховского представлены в работах [1, 2]. Экспериментально режим НСД смеси водород-кислород при эжекции окислителя впервые был получен в [3, 4], а расчеты НСД – в [5] в приближении классического эжектора по Абрамовичу на входе в камеру сгорания (КС). В данном докладе сформулирована в квазитрехмерной нестационарной постановке замкнутая математическая модель НСД в режиме эжекции кислорода без упрощающего предположения [5]. Численно исследована динамика детонационного процесса сжигания смеси водород-кислород в режиме эжекции кислорода в проточной кольцевой КС с геометрическими размерами [4] (внешний диаметр  $d_c = 10$  см, длина  $L_c = 10$  см, начальная ширина канала  $\Delta = 0.5$  см, щелевой зазор на входе в КС  $\delta = 1.75$  мм) и проведена верификация численного алгоритма на экспериментальных данных [4]. Водород подавался через систему микросопел Лавалля, равномерно распределенных на входе в КС в полосе шириной 0.5 см, что обеспечивало эжекцию кислорода в КС из окружающего пространства с давлением  $p_a = 1$  атм. Течение описывалось системой уравнений нестационарной газовой динамики, дополненной уравнением на массовую долю кислорода  $z$ , и двухстадийной моделью химической кинетики [6]. При соответствующих граничных и начальных условиях задача решалась численно конечно-разностным методом, основанным на схеме Годунова–Колгана.

**Результаты расчетов.** Численное исследование выполнено при следующих значениях обезразмеривающих констант: температура  $T_0 = 300$  К, давление  $p_0 = 1,013 \cdot 10^5$  Па, молярная масса кислорода  $\mu_0 = 32$  кг/кмоль. В расчетной области ( $-10$  см  $< x < 10$  см,  $0 < y < l$ ) решалась двумерная нестационарная периодическая задача с периодом  $l = \pi(d_c - \Delta) = 29.845$  см и параметрами в системе подачи водорода: давление торможения  $p_{H_2}/p_0 = 3.133$ , температура торможения  $T_{H_2}^*/T_0 = 1$ , начальный удельный расход водорода  $g_{H_2} = G_{H_2}/S_\Delta = 3.75$  кг/(с·м<sup>2</sup>), который соответствует экспериментам [4]. Здесь  $x = 0$  соответствует координате входа в КС,  $S_\Delta = \pi(d_c - \Delta) \cdot \Delta = 14.9$  см<sup>2</sup> – площадь сечения на расстоянии 1 см от входа в КС. На выходе из КС задавалось противодавление  $p_a/p_0 = 1$ .

Из расчетов инициирования поперечной детонационной волны (ПДВ) и динамики ее формирования установлено, что к моменту времени  $t \approx 11,2$  мс после инициирования ПДВ выходит на самоподдерживающийся режим НСД с частотой вращения ПДВ  $f \approx 7.87$  кГц, скоростью детонации  $D \approx 2.35$  км/с и высотой фронта  $h \approx 1.8$  см. На рис. приведено распределение безразмерной температуры  $T/T_0$  (а) и коэффициента избытка горючего  $\phi = 8(1/z - 1)$  (б) в расчетной области на момент времени  $t = 11,2$  мс. Из поля температур видно, что фронт ПДВ движется слева направо по треугольнику холодной смеси, сформированной перемешиванием эжектирующего водорода и эжектируемого из окружающего пространства ( $x < 0$ ) кислорода. Вниз влево отходит косая ударная волна (шлейф). На рис. б отчетливо видна светлая полоса повышенного содержания  $H_2$  в смеси ( $\phi > 1.5$ ) за фронтом ПДВ. Заметим, что на фоторегистрограммах [4], в структуре ПДВ также наблюдалась низкотемпературная полоса, предположительно вызванная втеканием низкотемпературного водорода под высоким давлением.



Расчетное поле температур  $T/T_0$  (а) и коэффициента избытка горючего  $\phi$  (б) при НСД смеси водород-кислород в режиме эжекции кислорода:  $g_{H_2} = 3.75 \text{ кг/(с}\cdot\text{м}^2)$ ,  $D = 2.35 \text{ км/с}$ ;  $h = 1.8 \text{ см}$ .

Проведены расчеты НСД, в которых варьировался расход водорода  $g_{H_2} = 3 - 3.75 \text{ кг/(с}\cdot\text{м}^2)$ . Некоторые результаты представлены в таблице. Здесь  $\langle p \rangle / p_a$  – среднее статическое давление на расстоянии 5 мм от входа в КС,  $\langle \phi \rangle$  – средний коэффициент избытка горючего смеси в КС,  $n = G_{O_2} / G_{H_2}$  – коэффициент эжекции кислорода.

Расчетные параметры НСД смеси водород-кислород при эжекции кислорода.

$g_{H_2}, \text{кг/(с}\cdot\text{м}^2)$	$\langle p \rangle / p_a$	$h, \text{см}$	$D, \text{км/с}$	$\langle \phi \rangle$	$n$
3.75	1.19	1.8	2.35	0.88	9.09
3.5	1.19	1.75	2.31	0.83	9.64
3.25	1.18	1.7	2.28	0.76	10.53
3	1.17	1.6	2.19	0.69	11.6

Установлено, что при НСД с уменьшением параметра  $g_{H_2}$  монотонно растет коэффициент эжекции кислорода  $n$ , а параметры  $\langle p \rangle / p_a$ ,  $\langle \phi \rangle$ , скорость и высота фронта ПДВ, монотонно убывают. Полученные результаты соответствуют [4], где при уменьшении  $g_{H_2}$  наблюдался спад скорости ПДВ ( $1.76 \rightarrow 1.57 \text{ км/с}$ ) и уменьшение  $\langle \phi \rangle$  ( $0.84 \rightarrow 0.47$ ).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bykovskii F.A., Zhdan S.A., and Vedernikov E.F. Continuous Spin Detonations // Journal of Propulsion and Power. 2006. V. 22, No. 6. P. 1204 – 1216.
2. Быковский Ф.А., Ждан С.А. Непрерывная спиновая детонация. Новосибирск: Изд-во ИГиЛ СО РАН, 2013.
3. Быковский Ф.А., Ждан С.А., Ведерников Е.Ф. Непрерывная детонация в режиме нестационарной эжекции окислителя. Докл. АН, 2009, т. 424, № 1, С. 40-42.
4. Быковский Ф.А., Ждан С.А., Ведерников Е.Ф. Непрерывная детонация в режиме автоколебательной подачи окислителя. 1. окислитель – кислород. // Физика горения и взрыва. 2010. Т. 46, № 3. с. 116-124.
5. Симонов Е.В. Моделирование непрерывной детонации водородокислородной смеси в кольцевой камере в режиме эжекции окислителя по классической модели эжектора // Сибирский журнал чистой и прикладной математики. 2017, Т. 17, № 1, С.55-72.
6. Николаев Ю.А., Зак Д.В. Согласование моделей химических реакций в газах со вторым началом термодинамики. // Физика горения и взрыва. 1988. т. 24, № 4, с.87-90.