

УДК 534.222.2,544.454.3

## ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ МАЛОИНЕРЦИОННЫМИ ПЬЕЗОДАТЧИКАМИ ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ СПИНОВОЙ ДЕТОНАЦИИ

Ф. А. Быковский, С. А. Ждан, Е. Ф. Ведерников, А. Н. Самсонов,  
А. И. Сычев, А. Е. Тарнайкин

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, bykovskii@hydro.nsc.ru

С помощью сконструированных и изготовленных высокочастотных датчиков давления на основе пьезокерамики ЦТС-19 зарегистрированы профили давления в поперечной детонационной волне, распространяющейся в вихревой плоскорадиальной камере при непрерывной спиновой детонации смеси бурый уголь — синтез-газ — воздух. Определены уровни давления во фронте детонационной волны по отношению к среднему статическому давлению. Показано, что эти уровни снижаются в направлении к центру камеры (от 20 раз и менее) по мере уменьшения интенсивности волны (ее скорости). Колебания давления за фронтом волны указывают на сложную газодинамику процессов в ее окрестности. Выявлена область химической реакции за фронтом волны, составляющая около 8 % периода между волнами.

Ключевые слова: непрерывная спиновая детонация, угольно-воздушная смесь, вихревая радиальная камера, пьезоэлектрические датчики давления.

DOI 10.15372/FGV20170110

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в России и за рубежом ведется интенсивное теоретическое и экспериментальное изучение непрерывного детонационного сжигания топлива по схеме Б. В. Войцеховского в поперечных детонационных волнах (ПДВ) [1]. Нерешенной проблемой является измерение профиля давления в ПДВ при непрерывной спиновой детонации (НСД). Приведенные в ряде работ сигналы высокочастотных датчиков давления указывают лишь на наличие ПДВ и частоту их вращения, но не регистрируют их истинный профиль, и в первую очередь — давление во фронте [2–5]. На это существует несколько причин: недостаточно высокая частота собственных колебаний датчика, покрытие датчика теплоизоляционным слоем, увеличивающим его инерционность, а также нагрев датчика, изменяющий его коэффициент преобразования.

Цель настоящей работы — разработать

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-08-00080) и фонда Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ (НШ-2695.2014.1).

© Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф., Самсонов А. Н., Сычев А. И., Тарнайкин А. Е., 2017.

высокочастотные датчики давления и измерить ими профиль давления в ПДВ. Измерения проводились в вихревой радиальной камере диаметром 500 мм при сжигании в ПДВ частиц бурого угля с воздухом и добавкой синтез-газа состава  $\text{CO} + 2\text{H}_2$ .

### 1. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Схема вихревой радиальной камеры диаметром  $d_{c1} = 500$  мм с истечением к центру приведена на рис. 1. Экспериментальная камера 1 представляла собой полузамкнутый объем, ограниченный цилиндрической и двумя боковыми стенками — плоской и конической, с углом наклона  $\alpha \approx 7^\circ$ . Выбранная геометрия камеры обеспечивала примерно постоянную площадь ее сечения вдоль радиуса  $S_c = \pi d_{c1} \Delta = 235.6 \text{ см}^2$ , где  $\Delta = 15$  мм — расстояние между стенками в месте контакта с цилиндрической поверхностью камеры. Выхлоп продуктов реакции из камеры происходил в отверстие диаметром  $d_{c2} = 250$  мм, расположенное в конической стенке.

Двухфазную смесь угля с синтез-газом подавали в камеру сгорания через форсунку 2, имеющую 150 отверстий с площадью поперечного сечения  $0.5 \times 1$  мм, равномерно распределенных по цилиндрической стенке и направ-

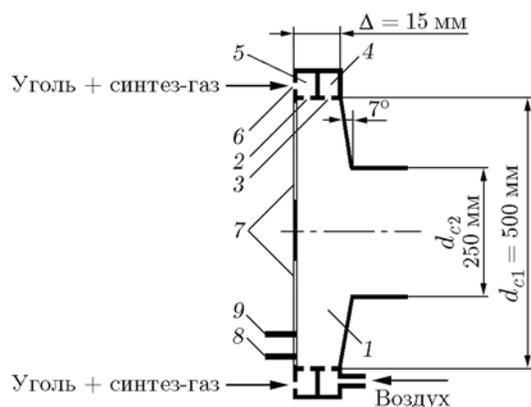


Рис. 1. Схема вихревой радиальной камеры диаметром  $d_{c1} = 500$  мм с истечением к центру с высокочастотными датчиками давления:

1 — камера сгорания, 2 — форсунка, 3 — каналы в кольцевой щели, 4 — кольцевой коллектор воздуха, 5 — кольцевой коллектор частиц угля и синтез-газа, 6 — отверстия для горючего, 7 — радиальные окна, 8, 9 — пьезодатчики

ленных вдоль радиуса. Воздух в камеру подавали по 50 каналам, образованным в кольцевой щели 3 шириной  $\delta = 5$  мм ребрами толщиной  $\delta_p = 1$  мм и наклоненным к радиусу под углом  $\beta = 75^\circ$ . Закрутка воздуха в камере осуществлялась направляющими ребрами с минимальным расстоянием между ними 10 мм. Площадь проходного сечения щели воздуха на входе в камеру равна  $S_\delta = (\pi d_{c1} - 50\delta_p)\delta = 76.04$  см<sup>2</sup>. Коэффициент расширения камеры сгорания  $K_S = S_c/S_\delta = 3.1$ .

Воздух и топливная смесь поступали в камеру из кольцевых коллекторов 4 и 5 соответственно. Кроме того, для более равномерного распределения взвеси частиц угля по коллектору 5 использовали 24 отверстия 6. Воздух подавался в коллектор из ресивера объемом  $V_{r,a} = 41.3$  л (на рисунке не показан), а смесь частиц угля с синтез-газом — из расходомера [6, 7]. Синтез-газ подавался из ресивера объемом  $V_{r,f} = 13.8$  л (на рисунке не показан). Начальное давление в ресивере воздуха —  $p_{r,a0} \approx 60 \cdot 10^5$  Па, в ресивере синтез-газа —  $p_{r,f0} \approx 70 \cdot 10^5$  Па. Расходы воздуха  $G_a$  и синтез-газа  $G_f$  определяли по снижению давления в ресиверах [7], а коэффициент избытка синтез-газа —  $\phi_f = G_f/G_{f,st}$ , где  $G_{f,st}$  — расход синтез-газа, соответствующий стехиометрическому соотношению с воздухом. При полном окислении состава  $CO + 2H_2$  до  $CO_2$  и  $H_2O$  стехиометрия ( $\phi_f = 1$ ) достигается при стехио-

метрическом коэффициенте  $\chi_{0f} = G_a/G_{f,st} \approx 6.44$ .

Помол бурого угля произведен на дисковой мельнице дезинтеграторного типа в Институте теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН. Размеры частиц находились в пределах  $1 \div 12$  мкм. Наибольшее количество частиц имело размер около 1 мкм, однако массовая доля распределялась в обратном порядке — основную массу составляли частицы крупного размера. Фотографии частиц угля, распределение их по размерам и массе, а также методики определения состава угля и его расхода  $G_C$  при подаче в камеру сгорания можно найти в работе [8]. При исключении влажности и минеральных добавок горючим являлось около 80 % исходного угля ( $G'_C \approx 0.8G_C$ ).

Время подачи угля составляло около 170 мс, а его расход во время непрерывной спиновой детонации, длящейся 120 мс, увеличивался:  $G_C = 0.57 \rightarrow 2.6$  кг/с. Коэффициент избытка угля  $\phi_C = G'_C/G_{C,st}$ , где  $G_{C,st}$  — расход угля, соответствующий стехиометрическому соотношению с воздухом, выбирался из предположения чисто углеродного состава угля. При полном окислении углерода С до  $CO_2$  стехиометрия ( $\phi_C = 1$ ) реализуется при стехиометрическом коэффициенте  $\chi_{0C} = G_a/G_{C,st} = 11.54$ . Рассчитанные из этих предположений коэффициенты избытка угля изменялись в пределах  $\phi_C = 0.69 \div 2.94$ , а суммарный коэффициент избытка двухфазного горючего —  $\phi_\Sigma = \phi_C + \phi_f = 1.07 \div 4.48$ . Удельные расходы гетерогенной топливовоздушной смеси  $g_\Sigma = (G_a + G_C + G_f)/S_c$  через поперечное сечение камеры  $S_c$  составляли  $g_\Sigma = 360 \rightarrow 351$  кг/(с·м<sup>2</sup>). Небольшое уменьшение  $g_\Sigma$  связано с тем, что наряду со снижением расхода воздуха  $G_a$  во время существования НСД увеличивался расход угля  $G_C$  (см. на рис. 3, а ход поршня  $L_p$ , выталкивающего уголь).

Образующуюся двухфазную смесь воспламеняли разрядом конденсатора (энергия около 5 Дж) на алюминиевую полоску фольги. Электрод для инициирования располагался на расстоянии 40 мм от цилиндрической поверхности камеры сгорания. Продукты сгорания вытекали в атмосферу.

Оптическая регистрация процессов проводилась через два радиальных окна 7 шириной 20 мм и длиной 150 мм, расположенных симметрично относительно центра (см. рис. 1) с помощью высокоскоростной камеры

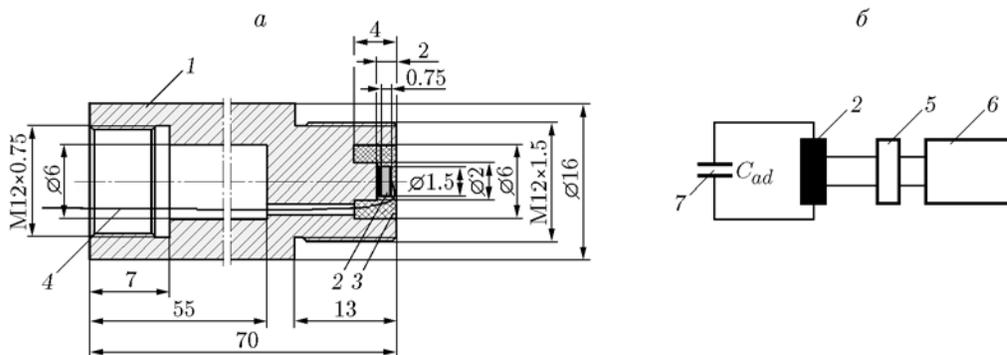


Рис. 2. Конструкция высокочастотного датчика (а) и схема измерения (б):

1 — корпус, 2 — пьезоэлемент, 3 — эпоксидный клей, 4 — провод, 5 — аналого-цифровой преобразователь, 6 — компьютер, 7 — дополнительная емкость; все размеры приведены в миллиметрах

Photron FASTCAM SA1.1 675K-M3 в режиме 400 000 кадр/с. По полученным кадрам, состоящим из 16 пикселей по ширине окна, выбирался только один, который затем соединялся с единичными пикселями других кадров. В результате конструировалось течение в системе волны [9].

Давления в ресиверах и коллекторах воздуха и горючего ( $p_{r,a}$  и  $p_{r,f}$ ,  $p_{m,a}$  и  $p_{m,f}$  соответственно), а также средние давления в камере ( $p_{ci}$ , где  $i$  — номер датчика на расстоянии 5, 47, 87, 126, 163 и 189 мм от цилиндрической поверхности) регистрировались датчиками давления фирмы WIKA (Германия) (на рисунке не показаны). Собственная частота колебаний датчиков составляла 10 кГц. Сигналы датчиков давления записывались и обрабатывались компьютерной системой.

Профиль давления в ПДВ и ее окрестности фиксировался разработанными и изготовленными в ИГиЛ СО РАН двумя пьезоэлектрическими датчиками 8 и 9, установленными на расстоянии 24 и 44 мм от цилиндрической поверхности камеры сгорания (далее называем их датчики 1 и 2 соответственно). Конструкция датчика приведена на рис. 2,а.

Корпус высокочастотных датчиков давления 1 изготовлен из латуни. Пьезоэлемент 2 толщиной  $\delta_g = 0.75$  мм сбоку и сверху заливался эпоксидным клеем 3. Слой клея над датчиком около 1 мм. Пьезоэлемент — пьезокерамика ЦТС-19 — одной поверхностью припаивался сплавом Вуда к корпусу датчика, другой — к тонкому проводу 4, подсоединяемому к центральной жиле коаксиального электрического разъема. Собственная частота колебаний чувствительного элемента из ЦТС-19, равная

двойному пробегу звуковой волны со скоростью  $c_c$  по толщине пьезоэлемента, составляет

$$f_g = c_c / 2\delta_g = 2 \text{ МГц},$$

где, по данным компании-изготовителя «Элла», для ЦТС-19  $c_c = 3$  км/с, точка Кюри  $T_C = 563$  К и рекомендуемый режим работы до 473 К. Наличие слоя эпоксидного клея над пьезоэлементом снижает частоту датчика давления примерно вдвое.

Характерное время  $\tau$  прогрева слоя эпоксидного клея намного превышало время эксперимента  $t_{exp}$ :

$$\tau = \frac{x^2}{a} = \frac{x^2}{\lambda/(\rho c)} \approx 5 \text{ с} \gg t_{exp} \approx 0.1 \text{ с},$$

где  $x = 1$  мм — толщина слоя клея над чувствительным элементом,  $a$  — его температуропроводность,  $\lambda = 0.6$  Вт/(м·К) — удельная теплопроводность клея,  $\rho = 1.2 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> — плотность клея,  $c = 2.58$  км/с — скорость звука в клее.

Датчики давления для акустической развязки со стальными стенками камеры сгорания устанавливали в окне из оргстекла, их чувствительный элемент располагался заподлицо с внутренней поверхностью плоской стенки камеры (см. рис. 1). Сигнал пьезоэлемента через аналого-цифровой преобразователь (АЦП) 5 с входным сопротивлением  $R_{com} \approx 10^9$  Ом регистрировался компьютером 6 (рис. 2,б). Во избежание «завала» исследуемых сигналов параллельно пьезоэлементу, емкостное сопротивление которого составляло  $C_{PE} \approx 100$  пФ, подключалась дополнительная емкость 7  $C_{ad} = 1600$  пФ. Постоянная времени измерительной

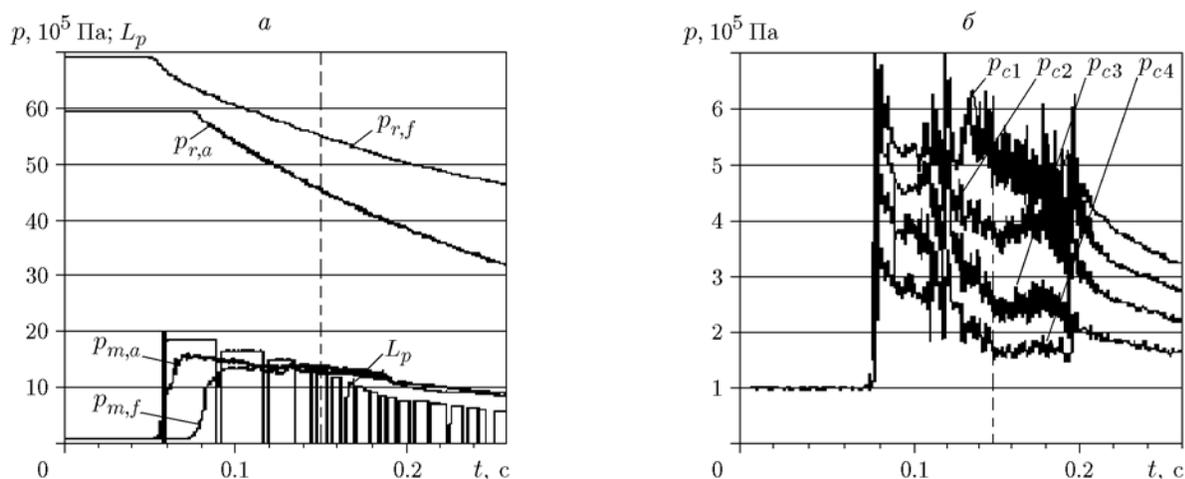


Рис. 3. Осциллограммы среднего давления в системе подачи (а) и в камере сгорания (б)

Таблица 1

Параметры НСД в фиксированные моменты времени

$t$ , мс	$G_a$ , кг/с	$G'_C$	$G_f$	$g_\Sigma$ , кг/(с·м <sup>2</sup> )	$\phi_C$	$\phi_f$	$\phi_\Sigma$	$G_f/G_C$ , %	$D$ , км/с	$n$
		кг/с								
0	7.48	0.45	0.43	360	0.693	0.375	1.07	76	Нерегулярная	
35	6.7	0.52	0.41	329	0.887	0.397	1.28	63	1.79	1
75	5.96	1.47	0.382	347	2.8	0.417	3.22	21	1.69	1
115	5.3	2.08	0.357	351	4.47	0.438	4.91	13.7	1.28	1

цепи  $\tau_g$  становилась значительно больше характерного времени пробега ПДВ по окружности камеры  $\tau_w$ :  $\tau_g = R_{com}(C_{PE} + C_{ad}) = 1.7 \text{ с} \gg \tau_w = \pi d_{c1}/D \approx 10^{-3} \text{ с}$ . Здесь  $D \approx 1.5 \text{ км/с}$  — скорость ПДВ.

Тарировка датчиков давления проводилась падающими ударными волнами в ударной трубе с помощью регистрирующей аппаратуры при установке на компьютере диапазона измерения выходного напряжения 1 или 3 В. Тарировка всего измерительного тракта позволяла получить калибровочную зависимость, связывающую электрический сигнал датчика, выраженный в делениях на оси ординат, с давлением волнового процесса.

Колебания сигналов относительно средних значений происходили с частотой несколько сотен килогерц, поэтому их можно квалифицировать как шумы, не влияющие на частоту примерно 1 кГц, задаваемую ПДВ. Их уровень по амплитуде не превышал  $\pm 10\%$  от среднего значения и может считаться точностью измерения амплитуды датчиками давления.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Характерные осциллограммы давления, зарегистрированные низкочастотными датчиками в системе подачи топливных компонентов и в камере сгорания, приведены на рис. 3, а и 3, б соответственно.

Начало НСД отмечено резким подъемом давления в камере сгорания после открытия соответствующих клапанов подачи топливных компонентов и срабатывания системы инициирования, а конец — через 115 мс после инициирования (окончание пульсаций высокой амплитуды). Параметры процесса в начале инициирования ( $t = 0$ ), в начале регулярной НСД ( $t = 35 \text{ мс}$ ), в середине процесса (штриховая вертикальная линия,  $t = 75 \text{ мс}$ , на рис. 3) и в конце процесса ( $t = 115 \text{ мс}$ ) приведены в табл. 1. Прекращение НСД связано с достижением предела по минимальной добавке синтез-газа к углю ( $\approx 14\%$ ), а также с большим коэффициентом избытка угля ( $\phi_C = 4.47$ ) [8].

После инициирования в камере сгорания в течение 35 мс наблюдалось от пяти нерегуляр-

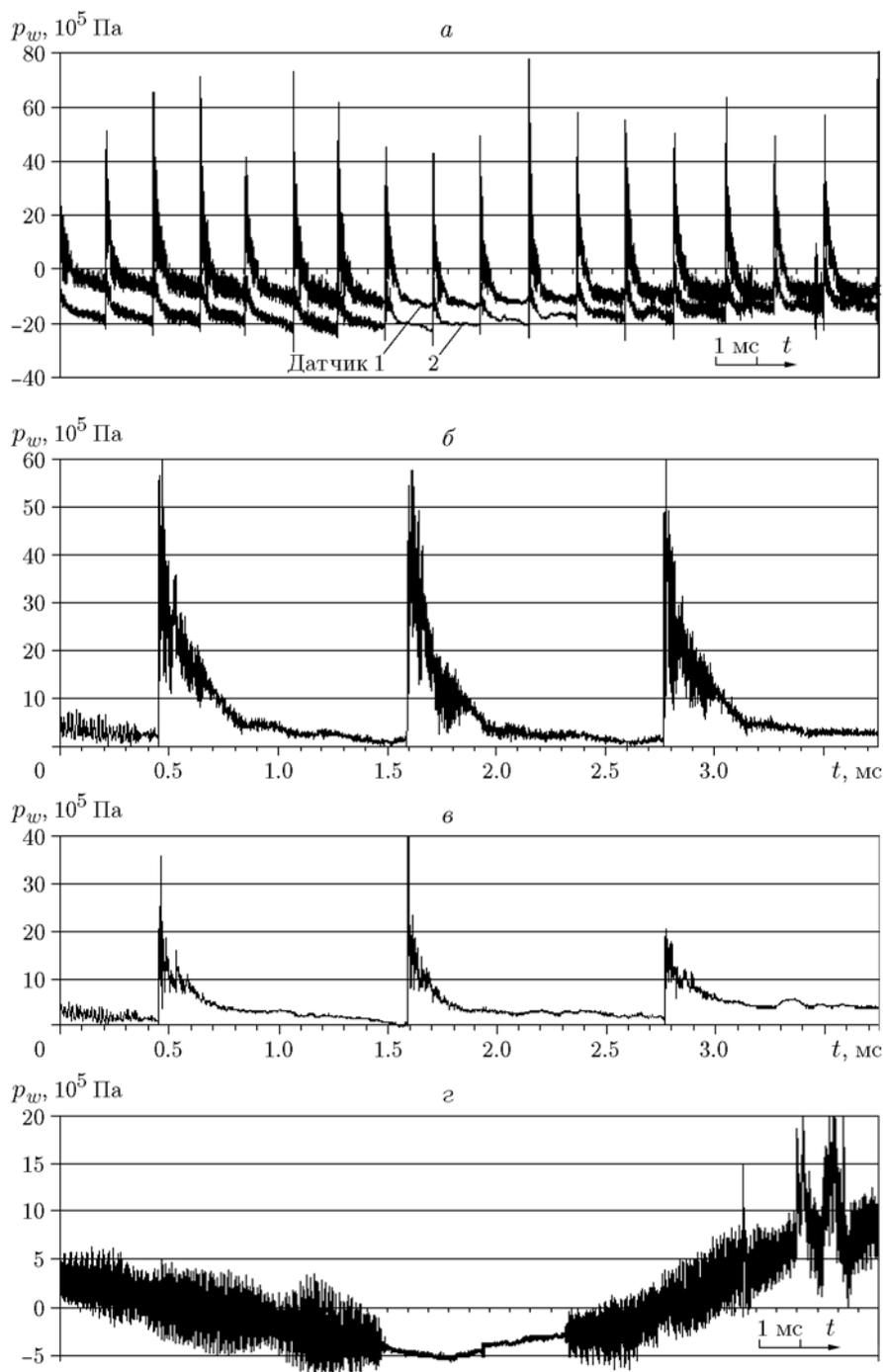


Рис. 4. Осциллограммы давления в ПДВ, зафиксированные высокочастотными датчиками 1 и 2: *a* — за период времени 16 мс (середина периода отмечена штриховой линией на рис. 3, *a, б*); *б* — за три оборота ПДВ, датчик 1; *в* — за три оборота ПДВ, датчик 2; *г* — «нулевая линия» для датчика 1 до подачи компонентов в камеру сгорания

ных ПДВ до одной ( $n = 5 \div 1$ ). Затем в камере сгорания формировалась регулярная одноволновая НСД, которая протекала с монотонным уменьшением скорости относительно наружно-

го диаметра камеры:  $D = 1.79 \rightarrow 1.28$  км/с (частота  $f = 1.14 \rightarrow 0.815$  кГц).

На рис. 4, *a* представлены две осциллограммы давления в ПДВ  $p_w$ , записанные высо-

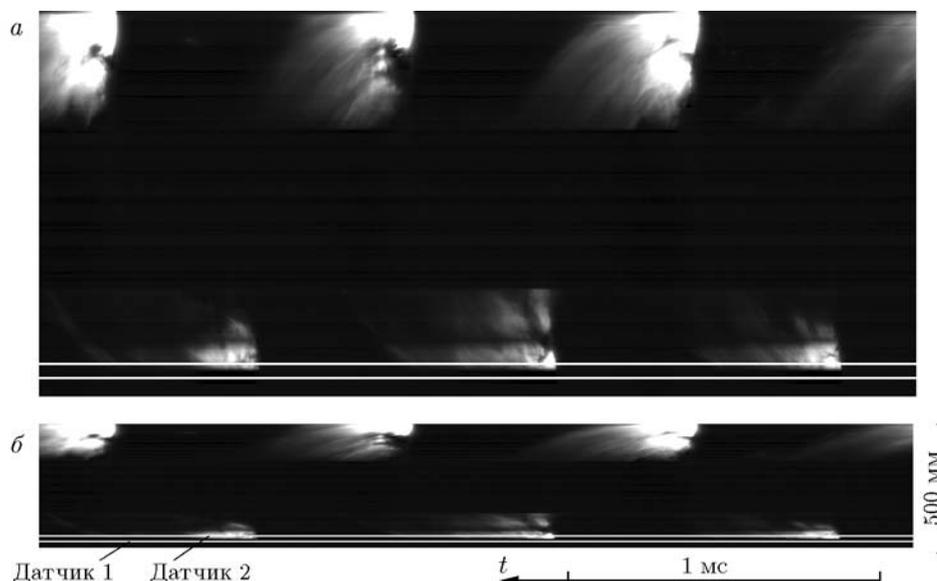


Рис. 5. Фоторегистрограмма ПДВ с тремя оборотами (фрагмент):

*a* — сконструированная по видеокдрам, *б* — приведенная к размерам камеры сгорания

кочастотными датчиками давления 1 и 2 в диапазоне времени  $\pm 8$  мс от вертикальной штриховой линии на рис. 3. На рис. 4, б, в изображены по отдельности осциллограммы соответственно от датчиков 1 и 2 за три оборота ПДВ, приведенные к среднему давлению в камере, зафиксированному низкочастотными датчиками (см. рис. 3, б).

Эти фрагменты осциллограмм, на которых зарегистрированы три оборота ПДВ, выбраны для гладкого участка при отсутствии высокочастотных наводок на датчики, существовавших еще до момента инициирования (рис. 4, з). Видно, что при отсутствии нагрузки на датчик 1 (так же, как и на датчик 2) в регистрирующей электрической цепи имеются наводки промышленной частоты (50 Гц) и высокочастотные ( $\approx 85$  кГц) пакеты сигналов. Приведение осциллограмм давления к виду, изображенному на рис. 4, б, в, выполнялось следующим образом. Находили среднее значение амплитуды давления  $p_w$  за период вращения волны, а затем это значение приводили в соответствие со средним давлением  $\langle p \rangle$  в этой точке, определенным низкочастотными датчиками  $p_{ci}$ . Поскольку два первых низкочастотных датчика были сдвинуты по радиусу камеры (5 и 47 мм от цилиндрической поверхности камеры), то давление в точках установки высокочастотных датчиков (24 и 44 мм от цилиндрической поверхности камеры) находи-

лось линейной интерполяцией показаний низкочастотных датчиков. В результате начальное давление перед фронтом ПДВ составляло  $p_1 = p_{w, \min} \approx (0.3 \div 0.5) \langle p \rangle$ .

Фоторегистрограмма ПДВ, давление в которой зафиксировали датчики 1 и 2, приведена на рис. 5. Белыми прямыми линиями отмечено положение датчиков. ПДВ, зафиксированная в верхнем окне, движется в заданном направлении завихрения потока. Изображения волны в нижнем окне получились с тем же направлением вращения. На самом деле ПДВ в камере проходит около окон во встречных направлениях. Такова специфика конструирования волн из последовательности фотографий. На рис. 5, б отражено соответствие наружного диаметра камеры (расстояния между двумя изображениями волны) диаметру камеры сгорания. Поскольку развертка линейная, а волна вращается в плоскости камеры, картина течения остается искаженной. Реальную картину течения в плоскости камеры можно получить при дальнейшем свертывании развертки в верхнем окне на рис. 5, б в кольцо [7].

### 3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Выбор топливовоздушной смеси бурый уголь — синтез-газ — воздух для проведения измерений профиля давления в ПДВ определялся следующими причинами. Во-первых,

Таблица 2

Параметры ПДВ (средние на трех оборотах)

Датчик	$\langle p \rangle$	$p_{w,max}$	$p_{w,min}$	$p_{w,max}/\langle p \rangle$	$p_{w,max}/p_{w,min}$	$g_{\Sigma}$ , кг/(с·м <sup>2</sup> )	$\phi_{\Sigma}$	$f$ , кГц	$D$ , км/с	$n$	$h$ , мм	$l/h$
	10 <sup>5</sup> Па											
1	4.41	60	2	13.6	30	347	3.22	1.08	1.53	1	≈100	15.7
2	3.8	20	2	5.26	10				1.39			

пьезоэлемент имеет конкретные размеры (диаметр 1.5 мм), а также вместе со слоем клея конечную частоту собственных колебаний ( $f_g \approx 1$  МГц), поэтому размер зоны реакции должен быть намного больше диаметра датчика, а время ее движения вдоль поверхности датчика должно намного превышать период его собственных колебаний; во-вторых, необходимо реализовать в камере большого диаметра одну крупномасштабную ПДВ для надежной фиксации амплитуды фронта волны, зоны реакции и поведения волны разрежения за фронтом до ее прихода к фронту на следующем обороте; в-третьих, следует максимально ограничить время процесса, чтобы исключить нагрев датчика до точки Кюри, выше которой исчезает пьезоэффект.

Указанные выше причины и определили выбор большой (диаметром 500 мм) плоско-радиальной камеры и смеси бурый уголь — синтез-газ — воздух. Режим НСД наблюдали в течение времени  $t_{exp} \approx 0.1$  с, которого оказалось достаточно для регистрации ПДВ высокочастотными датчиками давления. Средние параметры ПДВ в месте установки датчиков на трех оборотах волны и их привязка к средним давлениям в камере в момент времени  $t_{exp} = 75$  мс от начала инициирования приведены в табл. 2.

Видно, что давление во фронте ПДВ ( $p_{w,max}$ ) и линейная скорость ПДВ уменьшаются к центру камеры. Если предположить, что давление уменьшается линейно вдоль радиуса, то у цилиндрической стенки камеры оно будет  $p_{w,max} \approx 110 \cdot 10^5$  Па, т. е. примерно в 20 раз больше среднего давления в камере, измеренного низкочастотным датчиком,  $p_{c1} = 5 \cdot 10^5$  Па. По свечению ПДВ вдоль радиуса, которое занимает  $2/3$  окна ( $\approx 100$  мм), определяли высоту фронта ПДВ ( $h$ ). В результате отношение длины окружности цилиндрической стенки  $l = \pi d_{c1} = 1570$  мм к высоте фронта оказалось равным  $l/h = 15.7$ , что значительно больше, чем при НСД топливозвоздушной смеси в

камерах цилиндрической геометрии, в которых  $l/h = 4 \div 5$  [7]. Причина — наличие центробежных сил, препятствующих течению продуктов вдоль радиуса камеры к ее выходу.

При большем растяжении осциллограмм на рис. 4, б, в по оси времени удается определить длительность регистрации давления во фронте ПДВ. Для датчика 1 это время оценивалось величиной  $\tau_f = 5$  мкс, а для датчика 2 —  $\tau_f = 3.5$  мкс. Известно [10], что газодинамические превращения в ударном фронте происходят по длине свободного пробега молекул, поэтому его шириной можно пренебречь. Максимальное время регистрации фронта датчиком в идеальном случае должно ограничиваться временем его прохождения напротив чувствительного элемента диаметром 1.5 мм ( $\approx 1$  мкс). Однако чувствительный элемент имеет заливку из эпоксидного клея диаметром 6 мм. Скорость звука в клее больше скорости ПДВ ( $c = 2.58$  км/с  $>$   $D = 1.53$  или  $1.39$  км/с). Поэтому по клею распространяются возмущения давления от фронта ПДВ с момента его входа в область клеевой заливки и вплоть до выхода, а регистрируемый сигнал будет осредненным значением сил давления на диаметре 6 мм. Время регистрации фронта ПДВ (см. приведенные выше значения) как раз и оценивается временем прохождения волной области клеевой заливки. Если времена физических превращений и химических реакций за фронтом будут значительно превышать время нарастания сигнала датчика, то можно утверждать, что правильно измеряется амплитуда фронта детонационной волны. Зарегистрированное датчиком время сохранения среднего давления за фронтом (при сглаживании колебаний сигнала) составляет  $10 \div 30$  мкс, т. е. превышает время регистрации фронта, поэтому амплитуда фронта ПДВ близка к реальной. Наблюдаемые колебания сигнала за фронтом ПДВ могут быть как проявлением волн сжатия, присутствующих в большом количестве в плоских камерах при ис-

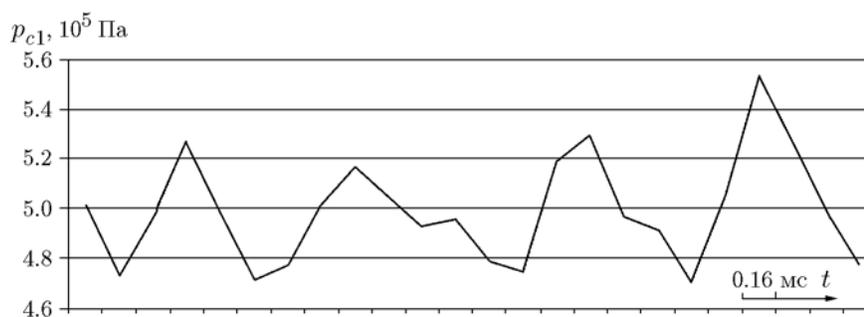


Рис. 6. Оциллограмма (фрагмент), полученная с помощью низкочастотного датчика давления, расположенного на расстоянии 5 мм от цилиндрической поверхности камеры

течении к периферии [7], так и паразитными колебаниями самого датчика, которые, однако, не проявляли себя при его тарировке. Выяснение их природы требует дополнительных исследований.

На рис. 4, *a–b* видно, что уменьшение темпа спада давления за фронтом ПДВ начинается при  $p_w \approx p_{w,\max}/2$ . По теории детонации [11] перегиб в профиле давления происходит в точке Чепмена — Жуге. В приведенных опытах промежуток времени спада давления от  $p_w = p_{w,\max}$  до  $p_w \approx p_{w,\max}/2$  по отношению к периоду  $\tau_w$  составляет около 8 %, а в масштабе волны — около 12 см (см. рис. 5).

Как видно из рис. 3, *б*, на оциллограмме среднего статического давления в камере сгорания имеются значительные высокочастотные колебания. На рис. 6 показан растянутый по времени фрагмент оциллограммы, зарегистрированной низкочастотным датчиком давления на расстоянии 5 мм от цилиндрической поверхности камеры в момент времени, отмеченный штриховой вертикальной линией на рис. 3. Частота основной гармоники такова, что совпадает с частотой вращения ПДВ —  $f_{c1} \approx 1.08$  кГц. Значит, низкочастотные датчики с собственной частотой колебания 10 кГц также реагируют на воздействие ПДВ, однако сильно искажают профиль давления. То есть они могут регистрировать факт существования одной ПДВ, не отражая ее профиля. При большем числе волн выделить их колебания на оциллограмме становится затруднительно.

Датчики, имеющие большое собственное сопротивление и подключенные к регистрирующим устройствам с большим входным сопротивлением, подвержены всевозможным наводкам. И в данном случае еще до регистрации ПДВ наводки уже существовали (см. рис. 4, *з*).

Но так как частота 50 Гц намного меньше регистрируемой частоты вращения ПДВ, а высокочастотные наводки существовали в виде пакетов малой амплитуды и оставляли свободными часть оциллограмм, удалось выделить их фрагменты, на которых влиянием этих помех можно пренебречь (см. середину рис. 4, *a*). Если осреднить высокочастотные наводки, то профиль давления по обе стороны этого фрагмента в среднем сохраняется и можно анализировать все оциллограммы ПДВ. Остается невыясненным появление постоянной составляющей сигналов, сдвигающей нуль отсчета в отрицательную (нереальную в действительности) область значений давления. Не исключено появление термической ЭДС между нагретыми спаями разнородных металлов (проволоки-электрода и металлической обкладки пьезоэлемента), обращенных в сторону камеры сгорания, и холодными выводами, подключенными к регистрирующей аппаратуре.

## ВЫВОДЫ

С помощью сконструированных и изготовленных высокочастотных датчиков давления на основе пьезокерамики ЦТС-19 зарегистрированы профили давления в ПДВ, распространяющейся в вихревой радиальной камере при НСД смеси бурый уголь — синтез-газ — воздух. Определены уровни давления во фронте детонационной волны по отношению к измеренному среднему статическому давлению. Показано, что эти уровни снижаются в направлении к центру камеры (от 20 раз и менее) по мере уменьшения интенсивности волны (ее скорости вдоль радиуса камеры). Колебания давления за фронтом волны указывают на сложную газодинамику процессов в ее окрестности. Стандарт-

ные низкочастотные датчики давления могут фиксировать факт существования ПДВ, не претендуя на истинность профиля давления. Выявлена область химической реакции за фронтом волны, составляющая около 8 % периода между волнами.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Войцеховский Б. В.** Стационарная детонация // Докл. АН СССР. — 1959. — Т. 129, № 6. — С. 1254–1256.
2. **Михайлов В. В., Топчиян М. Е.** К исследованиям непрерывной детонации в кольцевом канале // Физика горения и взрыва. — 1965. — Т. 1, № 4. — С. 20–23.
3. **Kindracki J., Kobiera A., Wolanski P., et al.** Experimental and numerical study of the rotating detonation engine in hydrogen-air mixtures // Prog. Propul. Phys. — 2011. — V. 2. — P. 555–582.
4. **Васильев А. А.** Особенности применения детонации в двигательных установках // Импульсные детонационные двигатели / под ред. С. М. Фролова. — М.: Торус пресс, 2006. — С. 129–158.
5. **Wang J., Shi T., Wang Y., Liu Y., Li Y.** Experimental research on continuous detonation engine // 23rd ICDERS, Irvine, USA, 2011. — N 208.
6. **Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф., Жолобов Ю. А.** Непрерывная спиновая детонация угольно-воздушной смеси в плоскорadiaльной камере проточного типа // Физика горения и взрыва. — 2013. — Т. 49, № 6. — С. 93–99.
7. **Быковский Ф. А., Ждан С. А.** Непрерывная спиновая детонация. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013.
8. **Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф., Жолобов Ю. А.** Детонационное сжигание частиц антрацита и бурого угля в проточной радиальной камере // Физика горения и взрыва. — 2016. — Т. 52, № 6. — С. 94–103.
9. **Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф., Самсонов А. Н.** Влияние геометрии камеры на реализацию непрерывной спиновой детонации смесей синтез-газ — воздух // Физика горения и взрыва. — 2015. — Т. 51, № 6. — С. 72–84.
10. **Зельдович Я. Б.** Теория ударных волн и введение в газодинамику. — М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1946.
11. **Физика взрыва** / Ф. А. Баум, Л. П. Орленко, К. П. Станюкович, В. П. Челышев, Б. И. Шехтер. — М.: Наука, 1975.

*Поступила в редакцию 5/II 2016 г.*