

УДК 534.222.2,544.454.3

ПАРАМЕТРЫ НЕПРЕРЫВНОЙ МНОГОФРОНТОВОЙ ДЕТОНАЦИИ СМЕСИ МЕТАНА С НАГРЕТЫМ ВОЗДУХОМ В КОЛЬЦЕВОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ КАМЕРЕ

Ф. А. Быковский, С. А. Ждан, Е. Ф. Ведерников

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

В проточной кольцевой камере сгорания диаметром 503 мм впервые реализованы и исследованы режимы непрерывной многофронтной детонации смеси метан — нагретый воздух. Воздух предварительно нагревался огневым способом в форкамере от 600 до 1200 К при сжигании поступающей в форкамеру стехиометрической смеси водород — кислород, расход воздуха $6 \div 20.9$ кг/с. Коэффициент избытка горючего (метана) составлял 1.15 ± 0.1 . Исследовано влияние степени нагрева воздуха на область реализации непрерывной детонации, давление в камере сгорания и удельный импульс. Во всех опытах при температуре воздуха $600 \div 1200$ К наблюдали режимы непрерывной многофронтной детонации с одной парой сталкивающихся поперечных волн с частотой 1.2 ± 0.1 кГц. По измеренным на выходе из камеры сгорания давлениям торможения определены удельные импульсы при непрерывной детонации в зависимости от расхода воздуха и температуры его подогрева. Выяснено, что с повышением температуры воздуха удельный импульс силы тяги уменьшается вследствие увеличения степени диссоциации продуктов. Максимальный удельный импульс с учетом энергии нагретого воздуха 1630 с получен при температуре воздуха в форкамере 600 К.

Ключевые слова: непрерывная спиновая детонация, метан, воздух, поперечные детонационные волны, кольцевая камера сгорания, форкамера, фоторегистрация, структура течения, тяговые характеристики.

DOI 10.15372/FGV20220203

ВВЕДЕНИЕ

Исследование режимов непрерывной спиновой детонации (НСД) в кольцевых камерах сгорания берет свое начало от работ Б. В. Войцеховского [1, 2]. Впервые детонационное сжигание метана с воздухом в режиме НСД было осуществлено в вихревой плоскорадиальной камере сгорания (КС) диаметром 204 мм [3]. Результаты первых экспериментальных исследований НСД топливовоздушных смесей с горючим ацетилен [4], водород [5, 6] и синтез-газ [7] в проточных кольцевых цилиндрических КС внешнего диаметра $d_c = 306$ мм (ДК-300) подробно проанализированы, систематизированы и обобщены в обзоре [8]. Там же анализируется влияние геометрических параметров проточных КС и указано, что переход к исследованию режимов НСД более трудно детонирующих смесей углеводородное топливо — воздух

требует увеличения диаметра КС.

Так, в проточной кольцевой цилиндрической КС внешнего диаметра $d_c = 503$ мм (ДК-500) [9] впервые были реализованы одноволновые и двухволновые режимы НСД трудно детонирующих бинарных смесей метан/водород — воздух при массовой доле водорода в бинарном горючем $m_H = 1/2$ и $1/3$. Там же было установлено, что с уменьшением доли водорода в бинарном горючем до $m_H = 1/5$ и $3/19$ формировались режимы непрерывной многофронтной детонации (НМД) со сталкивающимися поперечными детонационными волнами (ПДВ), отличающимися сильной нерегулярностью структуры, а также низкой средней скоростью. В работе [10] показано, что при ширине кольцевой щели подачи воздуха $\delta = 10$ мм для смесей CH_4/mH_2 — воздух ($m = 2, 1, 0$) при заужении выходного сечения камеры сгорания ДК-500 до трех раз удается реализовать в смеси чистый метан — воздух двухволновые режимы НСД с частотой вращения ПДВ $1.19 \div 1.45$ кГц и скоростью детонации около 1 км/с.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-01-00270а).

© Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф., 2022.

В работе [11] для полой (без центрального тела) камеры сгорания диаметром $d_c = 100$ мм с очень узкой щелью подачи воздуха (ширина 0.7 мм) и с соплом Лавалия на выходе был реализован в смеси метан — воздух при расходе воздуха $0.54 \div 0.56$ кг/с одноволновый режим НСД со скоростью $1.67 \div 1.77$ км/с, близкой к скорости детонации Чепмена — Жуге. Однако измерение давления в полой КС показало, что в режиме НСД при давлении подачи воздуха около 8 атм из-за больших потерь в узкой щели на входе в КС давление в КС снижается до 2.4 атм, т. е. более чем в три раза.

В работе [12] в смесях природный газ — нагретый воздух впервые были реализованы режимы непрерывной детонации со скоростями распространения волн до 70 % от скорости детонации Чепмена — Жуге. Исследования проведены в кольцевой КС внешнего диаметра $d_c = 228$ мм, длиной 130 мм, с кольцевым зазором 19 мм, расход предварительно нагретого до 800 К воздуха составлял $2.5 \div 6.24$ кг/с, коэффициент избытка горючего $0.85 \div 1.2$.

Цель настоящей работы — получить и исследовать режимы непрерывной детонации смеси метан — нагретый воздух и области их реализации в проточной кольцевой камере ДК-500. Предварительный огневой подогрев воздуха осуществлялся в кольцевой форкамере сжиганием в воздухе стехиометрической водородокислородной смеси. Подобный способ подогрева воздуха перед подачей в КС широко используется в исследовательских центрах [13, 14].

1. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Схема экспериментальной кольцевой КС ДК-500 наружного диаметра $d_{c1} = 503$ мм, длиной $L_c = 780$ мм, площадью поперечного сечения $S_\Delta = 810.8$ см² с заужением кольцевого канала на выходе КС с помощью дисковой перегородки описана в работе [10], поэтому здесь не приводится. Коэффициент заужения потока на выходе КС $K_{ex} = S_\Delta/S_{ex} = 2.96$ и 1.74 . Здесь $S_{ex} = \pi(d_{c1} - \Delta_{ex})\Delta_{ex}$ — площадь поперечного сечения на выходе КС, Δ_{ex} — ширина кольцевого зазора на выходе КС.

Для огневого подогрева подаваемого в КС воздуха устанавливалась кольцевая форкамера (ФК) 1, схема которой представлена на рис. 1. Размеры ФК: наружный диаметр 503 мм, длина $L_f = 250$ мм, зазор с внутренней стенкой

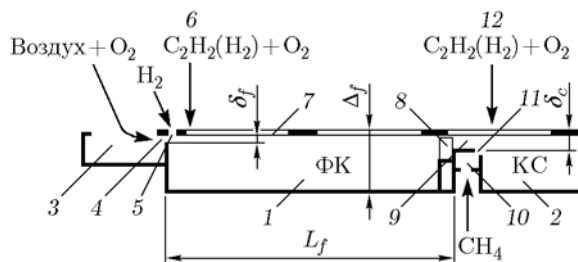


Рис. 1. Схема кольцевой форкамеры

$\Delta_f = 60$ мм. Воздух, обогащенный кислородом, с закруткой в кольцевом коллекторе 3, поступал в ФК через кольцевую щель 4 шириной $\delta_f = 3.5$ мм. Водород подавался в ФК через форсунку 5, имеющую 600 отверстий с поперечным сечением 0.35×1.43 мм. Водород и кислород находились в соотношении, близком к стехиометрии ($\phi_H \approx 1$). Зажигание водорода в ФК проводилось следующим образом. Четыре струи ацетиленокислородной смеси, расположенные на расстоянии 20 мм от форсунки водорода и равноотстоящие друг от друга по окружности, вдувались в ФК. Одна из струй 6, расположенная в начале первого окна 7, поджигалась подрывом электротоком полоски алюминиевой фольги (энерговыведение ≈ 5 Дж) и поджигала в ФК водород. От его возгорания поджигались другие три струи смеси $C_2H_2 + O_2$, создающие более равномерное горение водорода по окружности ФК. Для придания нагретому потоку воздуха движения в осевом направлении на выходе из ФК устанавливалась решетка 8, после которой нагретый воздух поступал в КС через кольцевую щель 9 шириной $\delta = 10.5$ мм и площадью поперечного сечения $S_\delta = \pi(d_{c1} - \delta)\delta = 162.5$ см². Коэффициент расширения канала КС на входе $K_S = S_\Delta/S_\delta = 4.99$.

На входе в КС в поток воздуха подавался метан через коллектор 10 и форсунку 11, имеющую те же количество и площадь поперечного сечения отверстий, что и форсунка водорода 5. Воспламенение метана в воздухе осуществлялось продуктами горения пятой ацетиленокислородной струи 12, которая поджигалась продуктами струи 6. Продукты горения этих струй служили также подсветкой течения в ФК и КС, поскольку горение смесей водород — воздух и метан — воздух сопровождается слабым свечением. В опытах с высокой температурой воздуха в ФК ($T_{*,a0} \approx 1200$ К), а также в холостых пусках, в которых метан за-

менялся воздухом с тем же расходом, горение в ФК и КС инициировалось продуктами горения водорода вместо ацетилена.

Порядок проведения экспериментов был такой. Вначале в двух ресиверах воздуха объемом $V_{r,a0} = 87.7$ л каждый (на рисунке не показаны) устанавливали начальное давление $p_{r,a0} = 40 \cdot 10^5$ Па. Затем через специальное смесительное устройство в ресиверы добавляли кислород с превышением начального давления воздуха на $\Delta p_o = (1.0, 1.5, 2.0, 2.5) \cdot 10^5$ Па, что соответствовало его массовой доле в смеси $m_o = \rho_o \Delta p_o / (\rho_o \Delta p_o + \rho_a p_{r,a0}) = 0.0273, 0.0405, 0.0533, 0.0657$ соответственно. Здесь плотность кислорода $\rho_o = 1.35$ кг/м³ и воздуха $\rho_a = 1.2$ кг/м³ при $T_{*0} = 293$ К. Начальное давление водорода в ресивере объемом $V_{r,H} = 10.2$ л устанавливалось в соответствии с содержанием добавочного кислорода в воздухе — $p_{r,H0} = (35 \div 85) \cdot 10^5$ Па. Начальные расчетные расходы компонентов смесей составляли: обогащенного кислородом воздуха — $G_{ao,0} \approx 24$ кг/с, водорода — $G_{H0} \approx 0.11 \div 0.25$ кг/с (в зависимости от m_o), метана — $G_{f0} \approx 1.5$ кг/с. Их текущие расходы во время опытов (около 0.4 с) уменьшались: G_{ao} и G_H — в 4.5 раза, а G_f — в 4 раза. Коэффициент избытка метана составлял $\phi = 1.15 \pm 0.1$ (большие значения соответствовали меньшим расходам метана). Определялись текущие расходы смеси $G_\Sigma = G_{ao} + G_H + G_f$ и удельные расходы нагретого воздуха через щель на входе в КС $g_\delta = (G_{ao} + G_H) / S_\delta$. Истечение продуктов из КС происходило в воздух с давлением $p_a = 10^5$ Па.

Фотосъемка процесса, измерение давления в системе подачи и в КС проводились аналогично [10]. В ФК на расстоянии 50 мм перед входной щелью в КС регистрировались полное давление ($p_{*,a}$) и температура торможения потока нагретого воздуха ($T_{*,a}$). Малоинерционная хромель-алюмелевая термопара устанавливалась на расстоянии 7 мм от наружной цилиндрической стенки ФК.

В КС регистрировалось статическое давление p_{c1} в 15 мм от входа КС, а также статическое p_{c3} и полное p_{c30} давление на срезе КС. Подробности методики и погрешности измерения температуры описаны в [15]. Обработку кадров фотосъемки, измерений текущих давлений и сигналов с датчиков проводили аналогично [10].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

2.1. Параметры работы ФК при огневом нагреве воздуха и $K_{ex} = 1.74$

Опыты проводили в порядке изменения температуры воздуха в ФК от $T_{*,a0} = 293$ К (холодный воздух) и далее до 600, 800, 1000 и 1200 К (горячий воздух). Результаты измерения в ФК температуры торможения потока $T_{*,a}$ и давления торможения $p_{*,a}$ при увеличении степени подогрева воздуха и горении метана в КС приведены на рис. 2.

При истечении холодного воздуха из ФК температура в ней со временем монотонно понижалась — $T_{*,a} = 293 \rightarrow 230$ К (рис. 2, а, кривая 1). После воспламенения в ФК смеси водорода с воздухом, обогащенным кислородом, температура воздуха резко повышалась и через 0.1 с выходила на плато и сохранялась примерно в течение 0.2 с, а затем плавно уменьшалась. Отметим, что в опыте с $T_{*,a} \approx 600$ К (кривая 2) после воспламенения смеси в ФК температура воздуха $T_{*,a}(t)$ в течение 0.05 с менялась немонотонно.

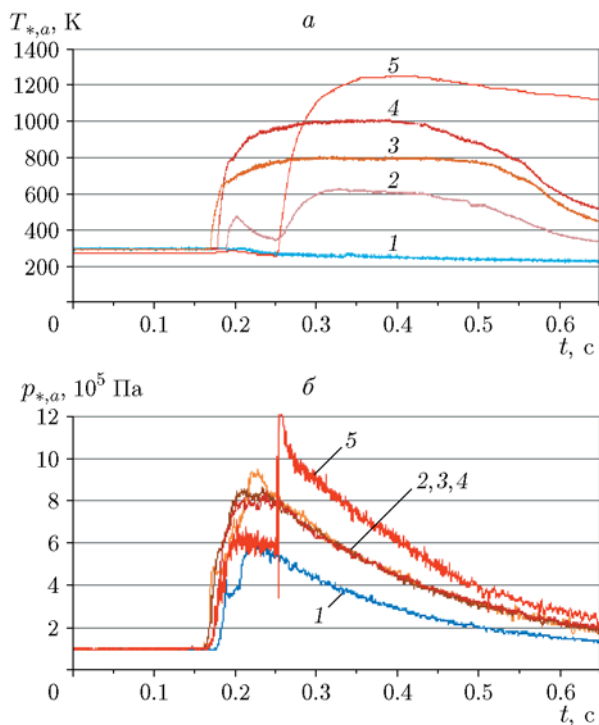


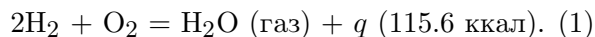
Рис. 2. Зависимости температуры (а) и давления (б) воздуха в ФК от времени:

1 — $T_{*,a} = 293 \rightarrow 230$ К, 2 — 600, 3 — 800, 4 — 1000, 5 — 1200 К

С повышением температуры воздуха в ФК давление в ней также повышалось, причем немонокотно (рис. 2, б). При $T_{*,a} = 600, 800$ и 1000 К после достижения максимума давления торможения в ФК последующий его спад оставался практически одинаковым в течение эксперимента. Аномальное поведение температуры и давления в ФК при $T_{*,a} \approx 1200$ К (рис. 2, кривые 5) вызвано более поздним протеканием процессов иницирования смеси в ФК ($t \approx 0.25$ с) и детонации метановоздушной смеси в КС.

При расчете параметров детонационного горения в КС учитывались температуры, отличающиеся от указанных на ± 50 К слева (начало опыта) и справа (к концу опыта). Детонационные режимы существовали при температурах вне этих ограничений, но не принимались во внимание при анализе экспериментальных результатов, так как в КС поступали водород и кислород, не прореагировавшие в ФК.

Температура горячего воздуха в ФК, зарегистрированного термопарой, достаточно хорошо коррелирует с оценкой, соответствующей полному сгоранию водорода с добавленным в воздух кислородом [16]:



В опытах с $m_o = 5.33$ %, когда в ФК устанавливалась температура $T_{*,a} = 1000$ К, при расходе водорода $G_{\text{H}} = 0.115$ кг/с и его стехиометрическом соотношении с кислородом ($\phi_{\text{H}} = 1.0$) количество тепла, выделяемое в секунду, оценивается величиной $Q_{\text{H}} = q(m_{\text{H}}/m_{\text{H}\mu}) = q(G_{\text{H}}/G_{\text{H}\mu}) = 115.6(0.115/0.004) = 3324$ ккал. Здесь m_{H} и $m_{\text{H}\mu}$ — соответственно масса сгораемого водорода и грамм-молекулярная масса водорода по уравнению (1). Изменение этих масс за единицу времени соответствует расходам G_{H} и $G_{\text{H}\mu}$. Принимая удельную теплоемкость кислородовоздушной смеси равной $c_{ao} \approx 0.25$ ккал/(кг·К) [16], а расход воздуха, обогащенного кислородом, $G_{ao} = 17.27$ кг/с, получаем температуру продуктов в ФК $T_{*,a} = Q_{\text{H}}/(c_{ao}G_{ao}) + T_0 \approx 770 + 293 = 1063$ К, а с учетом потерь в стенки ФК — $T_{*,a} \approx 1000$ К (см. рис. 2, а).

После отладки способа огневого подогрева воздуха в ФК сжиганием водородокислородной смеси и получения в ней в течение $200 \div 300$ мс стабильного плато высоких температур $T_{*,a}$ были исследованы возможности реализации детонационных режимов смеси CH_4 — подогре-

тый воздух в камере ДК-500 при $K_S = 4.99$, $K_{ex} = 2.96$ и $K_{ex} = 1.74$.

2.2. Режимы сжигания в КС при $K_{ex} = 1.74$

При подаче холодного воздуха (рис. 2, кривая 1) пламя после иницирования выносилось за пределы КС. Детонационный процесс в КС удалось получить при повышении температуры воздуха в ФК в пределах $T_{*,a} \approx 600 \div 1200$ К.

При температуре подогретого в ФК воздуха $T_{*,a} \approx 600$ К ($m_o = 2.73$ %), удельном расходе нагретого воздуха через щель на входе в КС $g_{\delta} = 1043 \rightarrow 529$ кг/(с·м²) и коэффициенте избытка горючего $\phi = 1.15 \rightarrow 1.17$ были осуществлены режимы НМД с частотой встречных ПДВ $f \approx 1.15 \rightarrow 1.01$ кГц. Фрагмент типичной фоторегистрограммы режима НМД представлен на рис. 3. Основные параметры процесса, изображенного на этом фрагменте, приведены в табл. 1 (первая строка).

Верхняя часть фоторегистрограммы (первое, второе и 1/3 третьего окна) отображает слабое свечение процесса горения водорода в ФК. Нижняя часть фоторегистрограммы (2/3 третьего окна и четыре полных окна) отображает свечение режима НМД в КС со встречными ПДВ, две из которых (BCD и $B'C'D'$) обозначены на рис. 3, а. Белые и темные диагональные линии — это траектории продуктов сгорания. Черные горизонтальные линии (ширина 24 мм) — непрозрачные участки КС между окнами. В КС наблюдается очень нерегулярная структура поперечных волн, как и в классической многофронтной детонации [2]. Из рис. 3, а за период времени до появления явно выраженных ПДВ против окон определялась средняя частота ПДВ $f \approx 1.14$ кГц с точностью ± 1 %. Фоторегистрограмма на рис. 3, а не позволяет определить направление движения ПДВ — все волны фиксируются вращающимися в одном направлении. Направление вращения волн около окон можно определить, построив дополнительно фоторегистрограммы по крайним пикселям 0 и 15 — начало и конец регистрации по вертикали в кадре (рис. 3, б). Получаем два изображения течения движущихся волн от начала до конца кадра, но со сдвигом во времени $t_{15} - t_0 = 35.7$ мкс. Здесь t_0 и t_{15} — моменты фиксации волны по краям кадра, которые определялись из времени следования кадров высокоскоростной киносъемки. Волна BCD (рис. 3, а) фиксируется

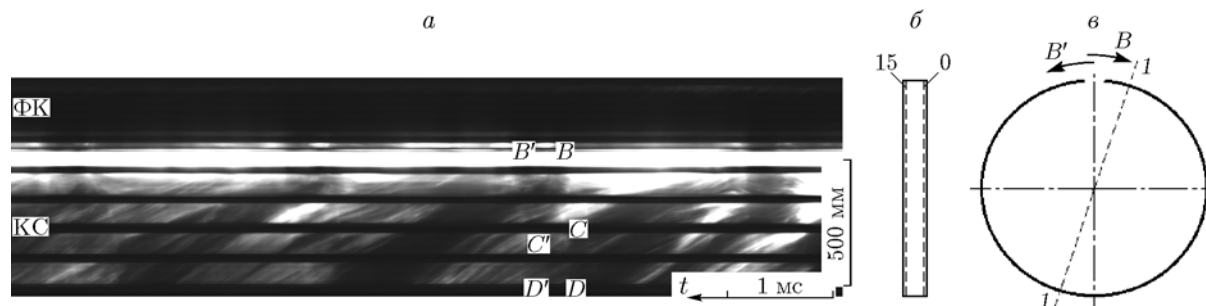


Рис. 3. Фрагмент фоторегиistroграммы режима НМД смеси метан — подогретый воздух при $T_{*,a} = 600$ К (а), рамка видеокadra (б), охватывающая окна камеры, и схема столкновений поперечных волн (в)

Таблица 1

Параметры режимов НМД, приведенных на рис. 3, 5

$T_{*,a}$, К	$p_{*,a}/p_a$	G_{ao} , кг/с	G_H , кг/с	G_f , кг/с	ϕ	p_{c1}/p_a	p_{c3}/p_a	p_{c30}/p_a	$\langle D \rangle$, км/с	n	f , кГц
600	5.4	13.36	0.046	0.87	1.16	3.55	1.57	4.1	0.9	2	1.14
1200	6.64	13.06	0.127	0.78	1.1	2.69	2.26	4.05	1.03	2	1.3

пикселем 15 раньше, чем пикселем 0, поэтому (рис. 3, в) она движется слева направо (при заданном направлении времени справа налево). Волна $B'C'D'$ (рис. 3, а) фиксируется пикселем 15 позже, чем пикселем 0, поэтому (рис. 3, в) она движется справа налево. Поскольку на рис. 3, а волны BCD и $B'C'D'$ расположены недалеко друг от друга, то линия их столкновения $1-1$ располагается близко к окнам (рис. 3, в). В данном случае волна BCD является падающей, а $B'C'D'$ — отраженной. На рис. 3, а видно, что расстояние между волнами непрерывно меняется, значит, линия $1-1$ непрерывно перемещается по окружности камеры. То есть в камере сгорания реализуется режим НМД со встречными ПДВ, число которых может быть только четным. Количество встречных ПДВ n , размещающихся на периметре камеры сгорания ДК-500, определяли методом исключения из соотношения [15]

$$\langle D \rangle n = \pi d_{c1} f. \quad (2)$$

Здесь $\langle D \rangle$ — средняя скорость ПДВ режима НМД.

Предположим, что в камере сгорания ДК-500 распространяются две пары сталкивающихся волн ($n = 4$), тогда из (2) получим $\langle D \rangle = 0.45$ км/с, что меньше скорости звука в продуктах и не соответствует режиму детонационного горения при $\phi = 1.16$. Остается единственная возможность — принять $n = 2$ (одна

пара сталкивающихся волн), тогда из соотношения (2) получим $\langle D \rangle = 0.9$ км/с.

Осциллограммы давления в системе подачи компонентов смеси, а также в ФК и КС для этого опыта приведены на рис. 4. Данные по режиму представлены в табл. 2 (вторая строка).

Вначале ($t \approx 100$ мс) в ФК и КС подавались струйки ацетилена и кислорода. Через 50 мс в ФК начинал поступать водород, а еще через 30 мс — воздух, обогащенный кислородом ($m_o = 2.73$ %). Одновременно с воздухом в КС поступал метан. При $t \approx 200$ мс поджигался водород в ФК с последующим воспламенением смеси метан — воздух в КС. В течение 25 мс в КС существовало обычное горение, а затем сформировались ПДВ. Необходимая температура $T_{*,a0} = 600 \pm 50$ К установилась в ФК при $t \approx 280$ мс и держалась около 200 мс. На рис. 4 границы этой области помечены цифрами I–III. По уровню давлений в КС (рис. 4, б) видно, что истечение из ФК в КС докритическое (кривые 7, 8), а из КС в атмосферу — сверхкритическое (кривые 9, 10). Датчики давления в КС явно фиксируют наличие колебаний в камере, однако ввиду своей инерционности (собственная частота колебаний 10 кГц) сглаживают профили давления волн. По специальной программе проводилось дальнейшее сглаживание зафиксированных колебаний, осредненные значения которых приве-

Таблица 2

Параметры непрерывной многофронтной детонации в ДК-500 при $K_{ex} = 1.74$ смеси метан — подогретый воздух при варьировании температуры подгрева воздуха $T_{*,a}$ в ФК

$T_{*,a}$, К	$p_{*,a}/p_a$	g_{δ} , кг/(с·м ²)	ϕ	f , кГц	n	$\langle D \rangle$, км/с	p_{c3}/p_a	p_{c30}/p_a	Режим
<293	6.31 → 2.37	1 343 → 564	1.36 → 1.28	—	—	—	1.57 → 1.05	2.36 → 1.2	—
600	7.15 → 3.38	1 043 → 529	1.15 → 1.17	1.15 → 1.01	2	0.91 → 0.8	2.05 → 1.05	5.3 → 2.63	НМД
800	8.2 → 3.07	1 244 → 444	1.18 → 1.21	1.24 → 1.16	2	0.98 → 0.91	3.44 → 1.54	6.1 → 2.4	НМД
1 000	7.8 → 3.39	1 288 → 509	1.14 → 1.17	1.34 → 1.30	2	1.06 → 1.03	3.31 → 1.65	5.9 → 2.67	НМД
1 200	9.46 → 2.5	1 218 → 371	1.1 → 1.11	1.31 → 1.29	2	1.03 → 1.02	3.09 → 1.2	5.58 → 1.84	НМД

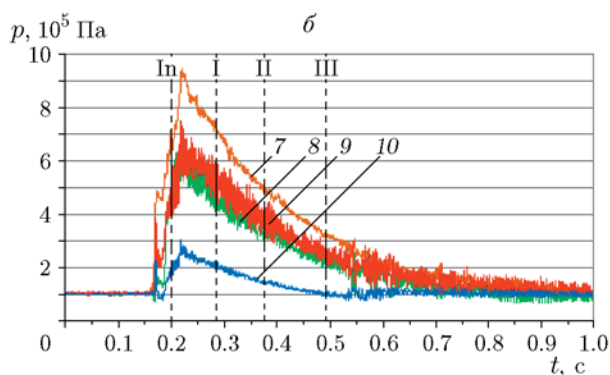
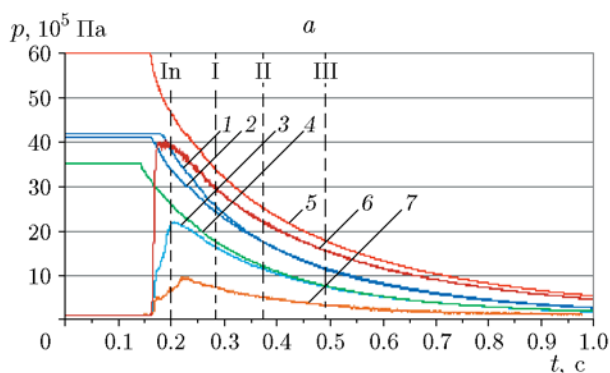


Рис. 4. Осциллограммы давления в системе подачи компонентов смеси (а), в ФК и КС (б):

1 — $p_{r,a1}$, 2 — $p_{r,a2}$, 3 — $p_{m,a}$, 4 — $p_{r,n}$, 5 — $p_{r,f}$, 6 — $p_{m,f}$, 7 — $p_{*,a}$, 8 — p_{c1} , 9 — p_{c30} , 10 — p_{c3} ; In — инициирование горения в ФК и КС, I, II, III — начало и конец истечения нагретого до $T_{*,a} \approx 600$ К воздуха, II — параметры процесса, соответствующие фоторегистрограмме на рис. 3

дены в табл. 1 (первая строка) и табл. 2 (вторая строка). В табл. 1 все значения параметров процесса соответствуют близким расходам обогащенного кислородом воздуха G_{ao} , чтобы более отчетливо выделить их динамику при изменении температуры воздуха в ФК.

Последовательное повышение температу-

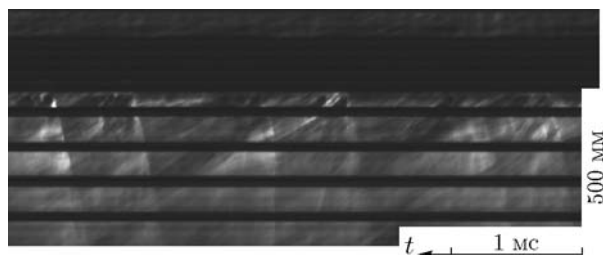


Рис. 5. Фрагмент фоторегистрограммы режима НМД смеси метан — подогретый воздух при $T_{*,a} = 1 200$ К

ры воздуха в ФК до $T_{*,a} \approx 800, 1 000$ и $1 200$ К ($m_o = 4.05 \div 6.57$ %) также приводило к реализации режимов НМД смеси метан — подогретый воздух, основные параметры процессов представлены в табл. 2, а фрагмент фоторегистрограммы НМД при $T_{*,a} \approx 1 200$ К — на рис. 5.

Свечение волн и течение на рис. 5 более слабые, чем на фрагменте рис. 3,а, так как в этом опыте для инициирования и подсветки использовалась струя продуктов горения водорода и кислорода вместо ацетилена и кислорода в предыдущих опытах.

В опытах с уровнями температуры воздуха в ФК $T_{*,a} \approx 800, 1 000$ и $1 200$ К характер осциллограмм давления в системе подачи и в КС отличался незначительно. С увеличением $T_{*,a}$ расширялась область реализации процесса, так как температура в ФК быстро устанавливалась без снижения по сравнению с рассмотренным случаем $T_{*,a} \approx 600$ К. Незначительно отличался и процесс НМД, фрагмент которого приведен на рис. 5.

Итак, при огневом подгреве в ФК воздуха от $T_{*,a} = 600$ К до $1 200$ К в кольцевой камере ДК-500 с заужением ее выходного сечения до $K_{ex} = 1.74$ впервые в смеси метан — по-

догретый воздух реализованы детонационные режимы с двумя встречными ПДВ.

2.3. Режимы сжигания в КС при $K_{ex} = 2.96$

При подаче в КС ($K_{ex} = 2.96$) холодного воздуха, температура которого уменьшалась в течение эксперимента ($T_{*,a0} \approx 293 \rightarrow 230$ К), пламя от инициирующей струи продуктов горения ацетилена с кислородом выносилось за пределы КС, поэтому горение в ДК-500 не наблюдалось. Ранее в КС этой же геометрии был получен режим НСД, но при закрутке холодного воздуха и отсутствии ФК [10]. При подаче в КС воздуха, нагретого в ФК до температуры $T_{*,a} \approx 600$ К, наблюдалось обычное горение с низкочастотными ($f \approx 25$ Гц) продольными колебаниями без заметного их влияния на процесс.

3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

3.1. Влияние температуры подогрева воздуха на детонационный режим и давление торможения p_{c30}

Для режимов НМД смеси CH_4 — нагретый воздух в камере ДК-500 при $K_{ex} = 1.74$ обобщающие зависимости частоты ПДВ от удельного расхода воздуха g_δ для ряда температур нагретого в ФК воздуха $T_{*,a}$ представлены на рис. 6. Видно, что частота сталкивающихся ПДВ находится в диапазоне $f = 1.2 \pm 0.1$ кГц, а при одинаковых значениях g_δ с повышением температуры $T_{*,a}$ частота ПДВ увеличивается. Причем при $T_{*,a} = 1000$ и 1200 К она практически постоянна: $f \approx 1.3$ кГц.

Во всех опытах с режимом НМД истечение нагретого воздуха из ФК в КС через щель

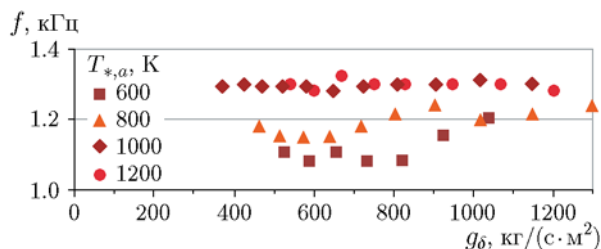


Рис. 6. Зависимость частоты ПДВ от удельного расхода подогретого до разных температур воздуха в камере сгорания ДК-500 при $K_{ex} = 1.74$

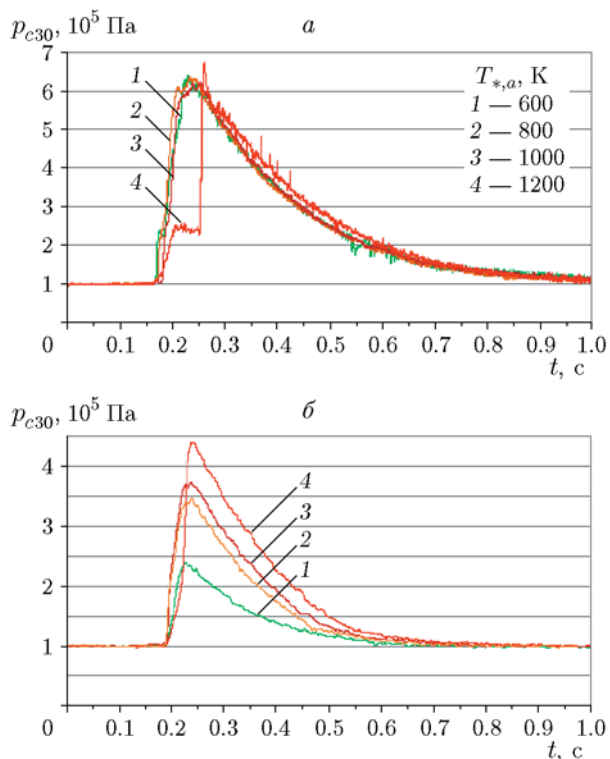


Рис. 7. Оциллограммы полного давления при горении метана в КС (а) и холостых пусках (б)

шириной $\delta = 10.5$ мм является докритическим, а на выходе продуктов из КС — сверхкритическим. С повышением температуры $T_{*,a}$ растет давление в ФК (см. табл. 2), однако полное давление p_{c30} на выходе из КС практически не меняется (рис. 7,а). В опытах с холостыми пусками, когда в КС вместо метана подавался с близким расходом воздух, при увеличении температуры воздуха в ФК полное давление p_{c30} на выходе из КС монотонно растет (рис. 7,б), достигая при $T_{*,a} \approx 1200$ К максимального значения $p_{c30} = 4.4 \cdot 10^5$ Па. Данные этих опытов использовались далее для расчета силы тяги F_c при холостых пусках. Очевидно, что давление торможения на выходе из КС было больше при горении метана (рис. 7,а), чем при замене его воздухом (рис. 7,б).

Интересно поведение отношения давления торможения продуктов на выходе из КС к давлению в ФК $p_{c30}/p_{*,a}$, так как оно определяет одновременно гидравлические потери на щели и в КС. Зависимости $p_{c30}/p_{*,a}$ от удельного расхода нагретого до температур $T_{*,a} = 600, 800, 1000, 1200$ К воздуха при детонационном сжигании смеси метан — нагретый воздух при-

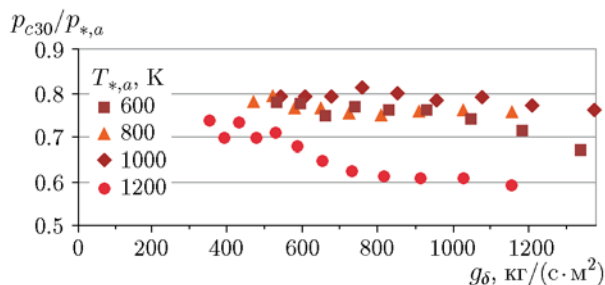


Рис. 8. Зависимость отношения $p_{c30}/p_{*,a}$ от удельного расхода нагретого до разных температур воздуха

ведены на рис. 8. Видно, что вначале ($g_{\delta} \approx 500 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$) отношение $p_{c30}/p_{*,a}$ колеблется в окрестности значений 0.77 ± 0.04 . Затем с ростом g_{δ} при каждом из указанных значений температуры $T_{*,a}$ отношение $p_{c30}/p_{*,a}$ монотонно уменьшается. Причем при $T_{*,a} \approx 1200 \text{ К}$ оно быстро уменьшается до $p_{c30}/p_{*,a} = 0.6$ при $g_{\delta} \approx 1150 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ (резко повышается давление в ФК). Причина — физико-химические процессы, протекающие в КС (диссоциация продуктов детонационного горения), которые влияют на силу тяги и удельный импульс.

3.2. Влияние температуры подогрева воздуха на силу тяги и удельный импульс

По измеренным значениям полного p_{c30} и статического p_{c3} давления на выходе из КС определяли, аналогично [10], силу тяги F_h при истечении продуктов горения смеси метан — нагретый воздух, а также силу тяги F_c при хо-

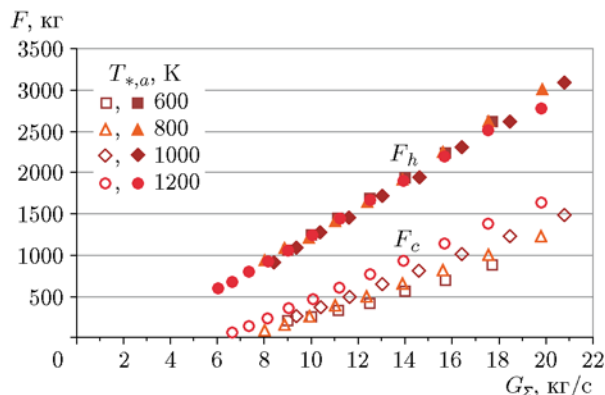


Рис. 9. Зависимости силы тяги при истечении продуктов детонационного горения метана и при холостых пусках от расхода при $K_{ex} = 1.74$ и разных значениях $T_{*,a}$

лостых пусках. Зависимости F_h и F_c от общего расхода компонентов горючей смеси G_{Σ} при $K_{ex} = 1.74$ для ряда температур $T_{*,a}$ приведены на рис. 9. Видно, что в исследованной области температур воздуха в ФК значения F_h практически совпадают, в то время как значения F_c увеличиваются с ростом температуры воздуха в ФК. Объяснение поведения силы тяги F_h может быть только одним — с ростом температуры воздуха растет степень диссоциации продуктов горения метана и химическая энергия топлива всё в меньшей степени преобразуется в кинетическую энергию [17, 18]. Известно, что с увеличением начальной температуры смеси повышается и температура продуктов горения T_p , причем практически линейно (рис. 10) [19]. Зависимость $T_p(T_{*,a})$ соответствует атмосферному давлению. Однако она не отличается заметно от таковой для продуктов в КС, находящихся при статическом давлении в несколько атмосфер.

Далее делением разности сил тяги F_h и F_c на расход метана G_f и ускорение свободного падения g определяли удельный импульс относительно горючего: $I_{sp,f} = (F_h - F_c)/(G_f g)$ (в секундах). На рис. 11 представлены зависимости удельного импульса $I_{sp,f}$ от удельного расхода через щель нагретого воздуха g_{δ} . Видно, что при $T_{*,a} \approx 600 \text{ К}$ (кривая 1) и $\approx 800 \text{ К}$ (кривая 2) удельные импульсы слабо зависят от удельного расхода воздуха. Однако при $T_{*,a} \approx 1000 \text{ К}$ (кривая 3) и $\approx 1200 \text{ К}$ (кривая 4) с ростом удельного расхода нагретого воздуха удельный импульс уменьшается до $I_{sp,f} = 1300$ и 1050 с соответственно. За-

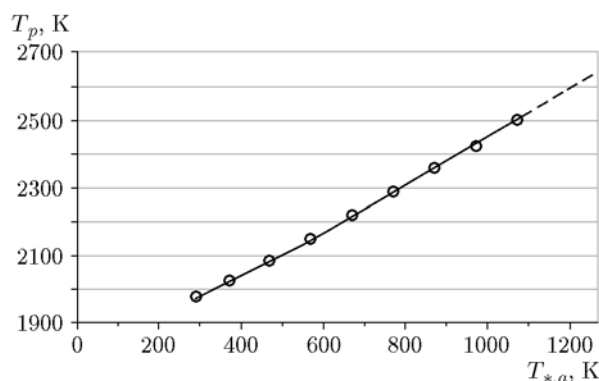


Рис. 10. Зависимость температуры продуктов горения природного газа с воздухом от начальной температуры воздуха при $\phi = 1.1$ и $p = 1.02 \cdot 10^5 \text{ Па}$ [18]

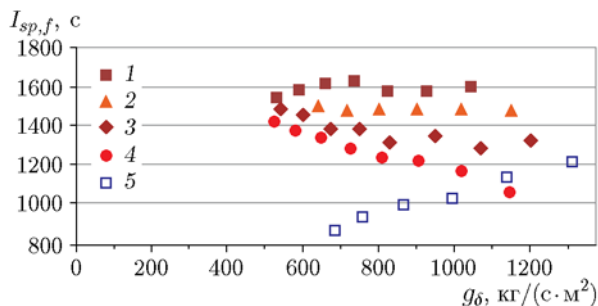


Рис. 11. Зависимость удельных импульсов от удельного расхода воздуха через щель при $K_{ex} = 1.74$:

1 — $T_{*,a} \approx 600$ К, 2 — 800, 3 — 1 000, 4 — 1 200 К, 5 — детонационное горение метана в холодном воздухе при $K_{ex} = 2.96$ [10]

метное снижение удельного импульса с повышением температуры воздуха связано, по нашему мнению, с резким увеличением степени диссоциации продуктов детонации в области температур продуктов $T_p \approx 2 600$ К. Например, при увеличении T_p от 2 500 до 2 750 К константа диссоциации кислорода возрастает на порядок и степень диссоциации переходит от слабой стадии к сильной [17, 18]. Наименьшая величина $I_{sp,f} = 1 050$ с при больших расходах воздуха (см. рис. 11, кривая 4) соответствует температуре воздуха $T_{*,a} \approx 1 260$ К, при которой температура продуктов составляет $T_p \approx 2 650$ К и степень диссоциации продуктов высокая. При снижении температуры воздуха до $T_{*,a} \approx 1 170$ К в том же опыте продукты детонации попадают в область более слабой диссоциации при $T_p \approx 2 560$ К и удельный импульс возрастает до $I_{sp,f} = 1 420$ с. На изменение удельного импульса в меньшей степени влияет снижение давления в камере при меньших расходах воздуха, которое приводит к повышению степени диссоциации продуктов и возрастанию влияния противодавления (окружающей атмосферы).

Итак, величина удельного импульса $I_{sp,f}$ уменьшается с ростом температуры подогрева воздуха в ФК от $T_{*,a} = 600$ К до 1 200 К. Наибольший импульс тяги (см. рис. 11, кривая 1) создает режим НМД метана с нагретым до $T_{*,a} \approx 600$ К воздухом — максимум до $I_{sp,f} = 1 630$ с. При уменьшении удельного расхода нагретого воздуха до $g_d \approx 500$ кг/(с·м²) удельный импульс приближается к $I_{sp,f} \approx 1 500$ с. В опыте с $T_{*,a} \approx 600$ К его снижение указывает на влияние противодавления внешней

среды. На рис. 11 для сравнения также приведена зависимость удельного импульса (кривая 5) при детонационном горении смеси метан — холодный воздух при подаче закрученного воздуха в ДК-500 ($K_{ex} = 2.96$) без ФК [10]. Максимальное значение $I_{sp,f} \approx 1 200$ с при $g_d = 1 300$ кг/(с·м²), а положение кривой 5 на рис. 11 указывает, что в опытах [10] для смеси метан — холодный воздух регистрировалось явное недогорание метана.

ВЫВОДЫ

В проточной кольцевой камере сгорания ДК-500 при сужении выходного сечения КС в 1.74 раза впервые реализованы и исследованы режимы непрерывной многофронтной детонации метана при смешении его с горячим воздухом, предварительно нагретым огневым способом в форкамере от 600 до 1 200 К. Во всех опытах с режимом непрерывной многофронтной детонации наблюдали одну пару сталкующихся поперечных волн с частотой 1.2 ± 0.1 кГц.

По измерениям полного и статического давления на выходе из КС определены удельные импульсы при непрерывной детонации в зависимости от расхода и температуры нагретого воздуха. Установлено, что с повышением температуры воздуха удельный импульс смеси метан — нагретый воздух уменьшается вследствие увеличения степени диссоциации продуктов детонации. Максимальное значение удельного импульса с учетом энергии нагретого воздуха составило 1 630 с при $T_{*,a} = 600$ К, а минимальное — 1 050 с при $T_{*,a} = 1 200$ К.

ЛИТЕРАТУРА

1. Войцеховский Б. В. Стационарная детонация // Докл. АН СССР. — 1959. — Т. 129, № 6. — С. 1254–1256.
2. Войцеховский Б. В., Митрофанов В. В., Топчиян М. Е. Структура фронта детонации в газах. — Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1963.
3. Быковский Ф. А., Митрофанов В. В., Ведерников Е. Ф. Непрерывное детонационное сжигание топливно-воздушных смесей // Физика горения и взрыва. — 1997. — Т. 33, № 3. — С. 120–131.
4. Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф. Спиновая детонация топливно-воздушной смеси в цилиндрической камере // Докл. АН. — 2005. — Т. 400, № 3. — С. 338–340.

5. Bykovskii F. A., Zhdan S. A., Vedernikov E. F. Continuous spin detonations // J. Propul. Power. — 2006. — V. 22, N 6. — P. 1204–1216.
6. Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф. Непрерывная спиновая детонация топливно-воздушных смесей // Физика горения и взрыва. — 2006. — Т. 42, № 4. — С. 107–115.
7. Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф. Непрерывная спиновая детонация смесей синтез-газ — воздух // Физика горения и взрыва. — 2013. — Т. 49, № 4. — С. 60–67.
8. Быковский Ф. А., Ждан С. А. Современное состояние исследований непрерывной детонации топливовоздушных смесей (обзор) // Физика горения и взрыва. — 2015. — Т. 51, № 1. — С. 31–46.
9. Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф. Непрерывная детонация смесей метан/водород — воздух в кольцевой цилиндрической камере сгорания // Физика горения и взрыва. — 2018. — Т. 54, № 4. — С. 96–106. — DOI: 10.15372/FGV20180411.
10. Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф. Непрерывная детонация смесей CH_4/H_2 — воздух при варьировании геометрии кольцевой камеры сгорания // Физика горения и взрыва. — 2020. — Т. 56, № 5. — С. 49–56. — DOI: 10.15372/FGV20200505.
11. Peng H.-Y., Liu W.-D., Liu S.-J., Zhang H.-L., Zhou W.-Y. Realization of methane-air continuous rotating detonation wave // Acta Astronaut. — 2019. — V. 164. — P. 1–8. — DOI: 10.1016/j.actaastro.2019.07.001.
12. Walters I. V., Journell C. L., Lemcherfi A., Gejji R. M., Heister S. D., Slabaugh C. D. Operability of a natural gas-air rotating detonation engine // J. Propul. Power. — 2020. — V. 36, N 3. — P. 453–464. — DOI: 10.2514/1.B37735.
13. Александров В. Ю., Мосеев Д. С. Сравнение способов имитации условий полета на стендах с огневым подогревом // Физика горения и взрыва. — 2014. — Т. 50, № 2. — С. 24–30.
14. Александров В. Ю., Арефьев К. Ю., Ильченко М. А. Расчетно-экспериментальное исследование пульсационных процессов в малогабаритных огневых подогревателях воздуха // Физика горения и взрыва. — 2016. — Т. 52, № 4. — С. 74–81. — DOI: 10.15372/FGV20160407.
15. Быковский Ф. А., Ждан С. А. Непрерывная спиновая детонация. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013.
16. Краткий справочник химика / под ред. В. И. Перельмана. — М.: Изд-во химической литературы, 1963.
17. Николаев Ю. А., Фомин П. А. О расчете равновесных течений химически реагирующих газов // Физика горения и взрыва. — 1982. — Т. 18, № 1. — С. 66–72.
18. Щетинков Е. С. Физика горения газов. — М.: Наука, 1965.
19. Справочник по автономному и резервному газоснабжению / под ред. А. Шнайдера, Д. Г. Азизова, А. П. Кожевникова, Л. А. Жернова. — СПб.: ООО «Газтехника», 2015.

Поступила в редакцию 19.05.2021.

После доработки 02.07.2021.

Принята к публикации 26.08.2021.
