

УДК 534.222.2, 544.454.3

НЕПРЕРЫВНАЯ МНОГОФРОНТОВАЯ ДЕТОНАЦИЯ СМЕСЕЙ КЕРОСИНА С НАГРЕТЫМ В ФОРКАМЕРЕ ВОЗДУХОМ

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

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

Режимы непрерывной многофронтной детонации двухфазных смесей авиационный керосин — горячий воздух впервые реализованы и исследованы в проточной кольцевой камере сгорания диаметром 503 мм и длиной 600 мм. Воздух с расходом $7.8 \div 24$ кг/с предварительно нагревался до $600 \div 1200$ К огнем способом в форкамере при сжигании стехиометрической смеси H_2-O_2 . В системе подачи горючего жидкий керосин барботировался воздухом. Коэффициент избытка горючего составлял $0.66 \div 1.28$. Исследовано влияние температуры воздуха на область реализации непрерывной детонации, на давление в камере сгорания и удельный импульс. В опытах при температуре воздуха $600 \div 1200$ К наблюдали режимы непрерывной многофронтной детонации с одной парой (частота 1.2 ± 0.1 кГц) или двумя парами (частота 2.4 ± 0.2 кГц) сталкивающихся поперечных детонационных волн. По измеренному на выходе из камеры сгорания давлению торможения определены сила тяги и удельный импульс. Показано, что увеличение температуры воздуха способствует детонационному сжиганию двухфазной смеси керосин — воздух, однако при этом возрастает степень диссоциации продуктов сгорания и уменьшается удельный импульс силы тяги. Ободрение смеси горючим повышает удельный импульс, а его максимальное значение с учетом энергии сжатого воздуха в ресиверах составило около 2200 с при температуре воздуха в форкамере 600 К.

Ключевые слова: огневой нагрев воздуха, водород, жидкий керосин, непрерывная спиновая детонация, непрерывная многофронтная детонация.

DOI 10.15372/FGV2022.9218

ВВЕДЕНИЕ

В последние десять лет в мире активно проводятся исследования непрерывной спиновой детонации (НСД) с целью разработки детонационных двигателей. Изучение режимов НСД берет свое начало от работ Войцеховского [1, 2]. Обзоры современного состояния экспериментальных исследований НСД в кольцевых камерах сгорания топливокислородных и топливоздушных смесей представлены в [3–10]. Большая часть работ сосредоточена на двигателях, работающих на газообразном горючем, как правило, водороде. Однако особый научный и практический интерес представляют исследования НСД гетерогенных топливоздушных смесей (ТВС) жидкое углеводородное горючее — воздух. Впервые режимы НСД гетерогенных ТВС (жидкие горючие — керосин и дизельное топливо) были реализованы и исследованы в вихревой плоскорадиальной камере

сгорания диаметром 204 мм [11]. В смеси керосин — воздух были получены одноволновые режимы НСД с частотой вращения поперечных детонационных волн (ПДВ) $f = 2.78 \div 3.12$ кГц и скоростью их вращения $D = 1.78 \div 2$ км/с.

Первые исследования по реализации НСД в кольцевых цилиндрических камерах сгорания диаметром 306 и 168 мм для гетерогенной смеси керосин — воздух основывались на дополнительном введении кислорода, водорода и изопропилнитрата [12, 13]. Далее при увеличении диаметра камеры сгорания до 503 мм (ДК-500) были реализованы режимы НСД, в том числе непрерывной многофронтной детонации (НМД), в гетерогенных смесях керосин/водород — воздух [14], керосин/синтезгаз — воздух [15], жидкий керосин — воздух [16]. Во всех случаях использовался холодный воздух (начальная температура $T_{*0} \approx 293$ К). В работе [16] показано, что в камере сгорания ДК-500 при сужении ее выходного сечения до трех раз реализуются режимы НМД: с четырьмя ($n = 4$) встречными ПДВ ($f = 2.59 \div 3.09$ кГц, $D = 1.02 \div 1.22$ км/с) при ширине щели подачи воздуха в камеру сгора-

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2020-806 от 29.09.2020).

© Быковский Ф. А., Ждан С. А.,
Ведерников Е. Ф., 2023.

ния $\delta = 3.5$ мм; с двумя ($n = 2$) встречными ПДВ ($f = 1.0 \div 1.1$ кГц, $D = 0.79 \div 0.87$ км/с) при $\delta = 10.5$ мм.

В турбореактивных или прямоточных воздушно-реактивных двигателях в камеру сгорания подается нагретый воздух, поэтому исследования детонационного горения в детонационных двигателях необходимо проводить при условиях подачи в камеру сгорания нагретого воздуха.

В работе [17] при исследовании детонационного горения смеси жидкое горючее — воздух в кольцевой камере сгорания диаметром 225 мм, длиной 300 мм с подачей нагретого до 393 К воздуха был применен способ предварительного испарения жидкого топлива. Богатая топливовоздушная смесь готовилась в специальном смесительном трубопроводе, где жидкое топливо (бензин или керосин), предварительно нагретое до 433 К (± 10 К), смешивалось с предварительно нагретым до 393 К воздухом высокого давления. В смеси паров керосина (Jet-A) и воздуха при $\delta = 0.5$ мм были реализованы устойчивые режимы НСД: а) расход нагретого воздуха $G_a = 0.286$ кг/с, коэффициент избытка горючего $\phi = 1.06$, частота вращения ПДВ $f = 1.55$ кГц, средняя скорость детонации $D = 1.096$ км/с; б) $G_a = 0.391$ кг/с, $\phi = 1.17$, $f = 1.655$ кГц, $D = 1.17$ км/с.

В комбинации стандартного турбореактивного двигателя (ТРД) ТТ100S-125 с детонационной форсажной камерой сгорания (ДФКС) диаметром 220 мм реализовано детонационное сжигание керосина с нагретым в двигателе до температуры 200 °С воздухом [18]. Утверждается, что при расходе воздуха $G_a = 1.2$ кг/с наблюдался режим «непрерывно-детонационного спигового горения авиационного керосина с одной детонационной волной».

В работе [19] реализованы детонационные режимы сжигания керосина в нагретом до температуры 500 ÷ 520 К воздухе в камерах кольцевой цилиндрической геометрии диаметром 220 и 500 мм при расходах воздуха $G_a = 1.0$ и 2.56 кг/с. Наблюдали режим сжигания во встречных детонационных волнах, одна из которых сильная, а другая слабая. Удельный импульс, рассчитанный по прямому измерению тяги с учетом холостых пусков (без горения в камере), оказался достаточно низким: максимум $I_{sp,f} = 430$ с в экспериментах с камерой диаметром 220 мм и $I_{sp,f} = 300$ с для камеры диаметром 500 мм.

Цель настоящей работы — в проточной кольцевой камере сгорания ДК-500 для смеси авиационный керосин (ТС-1) — нагретый воздух получить и исследовать режимы детонационного сгорания в области рабочих температур двигателей летательных аппаратов. Предварительный огневой подогрев воздуха осуществлялся в кольцевой форкамере при сжигании водорода в воздухе, обогащенном кислородом в стехиометрическом соотношении с водородом. Подобный способ подогрева воздуха перед подачей в камеру сгорания широко используется в исследовательских центрах [19–21].

1. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Организацию детонационного горения двухфазной смеси керосин — горячий воздух осуществляли в проточной кольцевой камере сгорания ДК-500 с форкамерой на ее входе, схема которой представлена на рис. 1.

Кольцевая камера сгорания 1 длиной $L_c = 600$ мм состояла из наружной цилиндрической стенки 2 диаметром $d_{c1} = 503$ мм и внутренней цилиндрической стенки 3 диаметром $d_{c2} = 387$ мм, которые формировали коаксиальный канал шириной $\Delta = 58$ мм с площадью поперечного сечения $A_\Delta = \pi(d_{c1} - \Delta)\Delta = 810.8$ см². Воздух в камеру сгорания поступал через кольцевой зазор 4 шириной $\delta = 10.5$ мм с площадью проходного сечения $A_\delta = \pi(d_{c1} - \delta)\delta = 162.5$ см². Степень расширения канала камеры сгорания на входе составляла $K_S = A_\Delta/A_\delta \approx 5$. Выход камеры сгорания 11 формировался дисками 12, создающими зазор шириной $\Delta_{ex} = 31.5$ или 18 мм. Площадь проходных сечений кольцевых зазоров на выходе $A_{ex} = \pi(d_{c1} - \Delta_{ex})\Delta_{ex}$ равнялась соответственно 466.6 и 274 см². Коэффициент сужения камеры сгорания на выходе ($K_{ex} = A_\Delta/A_{ex}$)

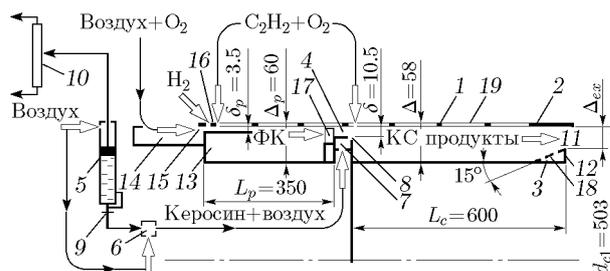


Рис. 1. Схема кольцевой камеры сгорания, форкамеры и системы подачи (размеры указаны в миллиметрах)

составлял соответственно 1.74 и 2.96. Часть опытов была проведена при установке вместо диска 12 конусной поверхности 18 ($K_{ex} = 1.74$) до ее пересечения с цилиндрической стенкой 3.

Жидкое горючее (авиационный керосин ТС-1) подавалось из расходомера поршневого типа 5 и перемешивалось (барботировалось) с воздухом в смесителе 6. Образующаяся двухфазная смесь через коллектор 7 и форсунку 8 подавалась в камеру сгорания [14, 15]. Форсунка 8 состояла из равномерно распределенных и попарно направленных встречно под углом 90° отверстий — $600 \times 0.35 \times 1.43$ мм (здесь первая цифра означает количество, а вторая и третья — ширину и высоту прямоугольных отверстий). По направлению к оси камеры отверстия форсунок ориентировались под углом 45° . Суммарная площадь отверстий форсунки 8 равна $A_f = 3.045$ см². Для удержания керосина в расходомере перед опытом устанавливалась диафрагма (тонкая мембрана) 9, которая прорывалась после подачи воздуха на поршень расходомера 5. Ход поршня расходомера регистрировался реостатным датчиком 10. Продукты горения ТВС керосин — воздух вытекали из камеры сгорания в атмосферу.

Кольцевая цилиндрическая форкамера 13 длиной $L_p = 350$ мм имела наружный диаметр 503 мм, зазор с внутренней стенкой $\Delta_p = 60$ мм. В форкамере проводился огневой подогрев воздуха путем сжигания водорода в обогащенном кислородом воздухе. При этом добавленный в воздух кислород и водород находились в соотношении, близком к стехиометрии ($\phi_H \approx 1$). Воздух, обогащенный кислородом, с закруткой потока, организованной в коллекторе 14, поступал на вход в форкамеру по кольцевому коллектору через кольцевую щель 15 шириной $\delta_p = 3.5$ мм. Водород подавался в форкамеру через форсунку 16, имеющую те же количество и площадь поперечного сечения отверстий, что и форсунка 8. Зажигание водорода в форкамере проводилось следующим образом. Четыре струи ацетиленокислородной смеси, расположенные на расстоянии 20 мм от форсунки водорода и равноотстоящие друг от друга по окружности, вдувались в форкамеру. Одна из струй, расположенная в начале первого из окон 19, поджигалась подрывом электропрокалки полоски алюминиевой фольги (энерговыведение ≈ 5 Дж) и поджигала в форкамере водород. От его возгорания поджигались другие три струи смеси $C_2H_2—O_2$, создающие бо-

лее равномерное горение водорода по окружности форкамеры. Для придания нагретому потоку воздуха движения в осевом направлении на выходе из форкамеры устанавливалась решетка 17, после которой нагретый воздух поступал в камеру сгорания через кольцевой зазор 4. Воспламенение керосина в камере сгорания проводилось продуктами горения пятой ацетиленокислородной струи (на рис. 1 показано стрелкой). Продукты горения струй $C_2H_2—O_2$ служили также подсветкой течения в форкамере и камере сгорания, поскольку горение смесей водород — воздух и керосин — воздух сопровождается слабым свечением.

Порядок проведения экспериментов был следующим. Вначале в двух ресиверах воздуха объемом $V_{r,aox} = 87.7$ л каждый (на рис. 1 не показаны) устанавливали начальное давление $p_{r,a0} \approx 40 \cdot 10^5$ Па. Затем через специальное смесительное устройство в ресиверы добавляли кислород с превышением начального давления воздуха на величину $\Delta p_{ox} = (1.0, 1.5, 2.0, 2.5) \cdot 10^5$ Па, что соответствовало его массовой доле в смеси $m_{ox} = \rho_{ox} \Delta p_{ox} / (\rho_{ox} \Delta p_{ox} + \rho_a p_{r,a0}) = 0.0273, 0.0405, 0.0533, 0.0657$. Здесь плотность кислорода $\rho_{ox} = 1.35$ 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 — $p_{r,H0} = (35 \div 87.5) \cdot 10^5$ Па. Барботирующий воздух подавался из ресивера объемом $V_{r,af} = 8.8$ л с одинаковым начальным давлением $p_{r,f0} = 75 \cdot 10^5$ Па. Начальный расчетный расход компонентов ТВС составлял: смеси воздуха $G_{a,0}$ и кислорода $G_{ox,0}$ из ресиверов $V_{r,aox}$ воздуха — $G_{aox,0} = (G_{a,0} + G_{ox,0}) \approx 24$ кг/с, барботирующего воздуха — $G_{af,0} \approx 0.7$ кг/с ($m_{af} = G_{af,0} / (G_{af,0} + G_{a,0}) \approx 3\%$), водорода — $G_{H0} = 0.12 \div 0.27$ кг/с (в зависимости от m_{ox}), керосина — $G_{f,0} = 0.66 \div 1.33$ кг/с. Следует отметить, что начальный расход барботирующего воздуха $G_{af,0}$ отсчитывался от момента его истечения вместе с керосином из форсунки. Текущие расходы компонентов смеси за время опытов (около 0.2 с) уменьшались: G_{aox} , G_{af} и G_H — в 2 раза, а G_f — в 1.3 раза. Поэтому коэффициент избытка горючего возрастал к концу эксперимента и изменялся в пределах $\phi = 0.66 \div 1.23$ или $\phi = 0.9 \div 1.3$. Большие значения ϕ соответствовали меньшим расходам керосина. Определялись текущие расходы

двухфазной смеси $G_{\Sigma} = G_{aox} + G_{af} + G_H + G_f$ и удельные расходы нагретого воздуха через кольцевую щель на входе в камеру сгорания $g_{\delta} = (G_{aox} + G_H)/A_{\delta}$.

Фотосъемка процесса проводилась высокоскоростной камерой Photron Fastcam SA5 в режиме съемки 420 000 кадр/с через семь продольных окон из оргстекла 19, расположенных друг за другом вдоль наружной стенки камеры (см. рис. 1). Ширина каждого окна 20 мм, длина 93 мм. Расстояние между окнами 24 мм. Эти окна охватывали как форкамеру, так и камеру сгорания. Размеры окон служили масштабом происходящих явлений. На основании полученных кадров по специальной компьютерной программе конструировалось течение в системе волны, а также $(x-t)$ -диаграммы движения волн по окружности и длине камеры сгорания.

В системе подачи регистрировалось статическое давление: в ресиверах основной подачи воздуха, обогащенного кислородом ($p_{r,a1}$, $p_{r,a2}$), и его коллекторе ($p_{m,a}$), в ресивере подачи воздуха, вытесняющего керосин из расходомера поршневого типа ($p_{r,f}$), в ресивере водорода $p_{r,H}$, в коллекторе керосина ($p_{m,f}$). В форкамере на расстоянии 50 мм до входной щели в камеру сгорания 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 форкамеры. Термопара представляла собой тонкую пластинку толщиной 20 мкм, шириной 0.5 мм и длиной 1 мм. Концы пластинки плавно переходили в проволоку диаметром 0.3 мм. По оценкам (см. [22]) разрешающая способность термопары по времени не превышала 1 мс. В камере сгорания регистрировалось статическое давление p_{c1} в 50 мм от входа в камеру сгорания, а также статическое p_{c3} и полное давление p_{c30} на выходе из камеры сгорания. Измерения давления проводились сертифицированными датчиками давления с классом точности 0.5 % производства компании «Trafag» (Швейцария). Собственная частота колебаний тензoeлектрических датчиков составляла 10 кГц. Для более достоверного измерения полного давления на выходе из камеры p_{c30} использовались два датчика, один из которых имел большую чувствительность по частоте. При вычислении силы тяги и отношения давлений в камере и форкамере осцил-

лограммы полного и статического давлений в камере сгорания сглаживались по специальной программе на компьютере. При этом точность измерения давления была на уровне паспортных данных датчика давления — около 1 %. Обработку кадров фотосъемки, измерений текущих давлений и сигналов с датчиков проводили аналогично [15, 23].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

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

Предварительно была проведена отладка способа огневого нагрева воздуха в форкамере. Воздух, обогащенный кислородом, поступал в форкамеру через кольцевую щель, а водород — через форсунку. В результате прямого сжигания водорода воздух нагревался в форкамере. Опыты проводили в порядке изменения температуры воздуха в форкамере от $T_{*,a0} = 293$ К (холодный воздух) и далее до 600, 800, 1000 и 1200 К (горячий воздух) при коэффициенте сужения камеры сгорания на выходе $K_{ex} = 1.74$. Результаты измерений в форкамере температуры торможения потока $T_{*,a}$ и давления торможения $p_{*,a}$ при увеличении степени подогрева воздуха и горении керосина в камере сгорания приведены на рис. 2.

При истечении холодного воздуха из форкамеры температура в ней со временем монотонно понижалась: $T_{*,a} = 293 \rightarrow 230$ К (рис. 2,а, кривая 1). Здесь и в дальнейшем стрелкой показано направление изменения параметра во время эксперимента. После воспламенения в форкамере смеси водорода с воздухом, обогащенным кислородом, температура воздуха резко повышалась (рис. 2,а, кривые 2–5) и через 0.03 с выходила на плато и сохранялась примерно в течение 0.2 с, а затем плавно уменьшалась. С повышением температуры воздуха в форкамере давление в ней также повышалось, причем немонотонно (рис. 2,б). Максимум давления достигался при $T_{*,a} = 1200$ К и при последующем спаде оставался выше, чем при $T_{*,a} = 1000, 800$ и 600 К.

При расчете параметров детонационного горения в камере сгорания учитывались температуры, отличающиеся от указанных на ± 70 К в начале опыта (слева) и к концу опыта (справа). Детонационные режимы существовали при температурах вне этих ограничений, но не при-

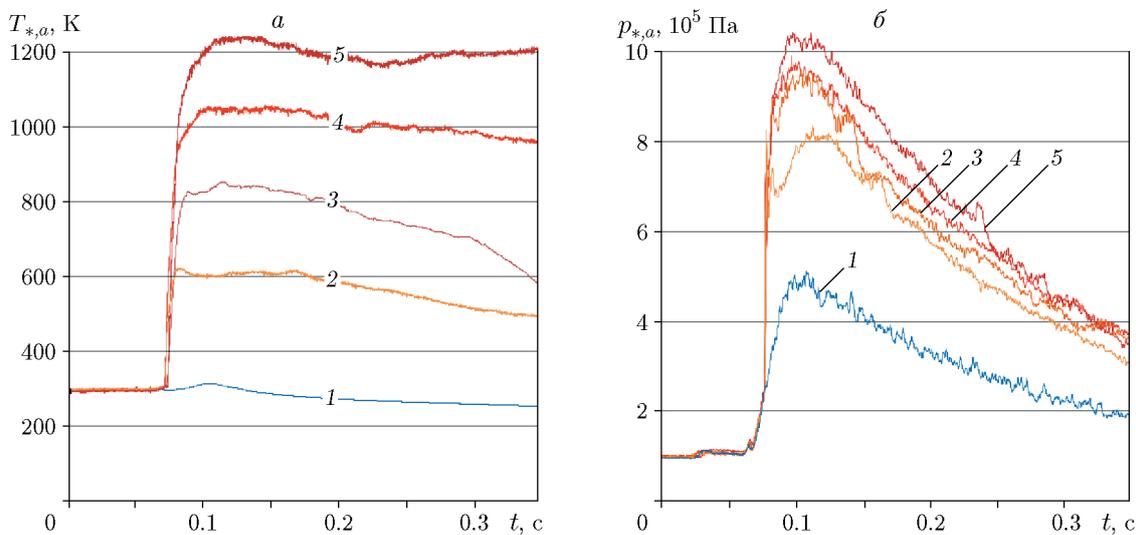
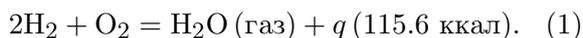


Рис. 2. Зависимости температуры (а) и давления (б) воздуха в форкамере от времени: 1 — $T_{*,a} = 293 \rightarrow 230$ К, 2 — 600, 3 — 800, 4 — 1000, 5 — 1200 К

нимались во внимание при анализе экспериментальных результатов, так как в камеру сгорания поступали водород и кислород, не прореагировавшие в форкамере.

Температура горячего воздуха в форкамере, зарегистрированная термопарой, достаточно хорошо коррелирует с оценкой, соответствующей полному сгоранию водорода с добавленным в воздух кислородом [24]:



В опытах с массой кислорода $m_{ox} = 5.33$ %, когда в форкамере 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, выделяемого в секунду, оценивается величиной $Q_{\text{H}} = q(m_{\text{H}}/m_{\text{H}\mu}) = q(G_{\text{H}}/G_{\text{H}\mu}) = 115.6 \cdot (0.115/0.004) = 3324$ ккал. Здесь m_{H} и $m_{\text{H}\mu}$ — соответственно масса сгораемого водорода и грамм-молекулярная масса водорода по уравнению (1). Изменение этих масс в единицу времени соответствует расходам G_{H} и $G_{\text{H}\mu}$. Принимая удельную теплоемкость кислородовоздушной смеси равной $c_{aox} \approx 0.25$ ккал/(кг·К) [24], а расход воздуха, обогащенного кислородом, — $G_{aox} = 17.27$ кг/с, получаем температуру продуктов в форкамере $T_{*,a} = Q_{\text{H}}/(c_{aox}G_{aox}) + T_0 \approx 770 + 293 = 1063$ К, а с учетом потерь в стенки форкамеры — $T_{*,a} \approx 1000$ К (см. рис. 2, а).

После отладки способа огневого подогрева воздуха в форкамере сжиганием водородокислородной смеси и получения в ней в течение

200 мс плато высоких температур $T_{*,a}$ в камере ДК-500 были исследованы возможности реализации детонационных режимов двухфазной смеси керосин — подогретый воздух при $K_{ex} = 1.74$ и 2.96. При этих же повышенных температурах воздуха $T_{*,a}$ в форкамере проводились опыты (холостые пуски), когда в камеру сгорания вместо керосина подавался воздух с близким расходом.

2.2. Режимы сжигания керосина в камере сгорания при $K_{ex} = 1.74$

В первой серии опытов осуществлялась подача холодного воздуха $T_{*,a} = 293 \rightarrow 230$ К (см. рис. 2, кривая 1) из форкамеры в камеру сгорания с диском на выходе. Опыты показали, что в двухфазной смеси керосин — холодный воздух в диапазоне удельных расходов воздуха $g_{\delta} = 1.989 \rightarrow 0.878$ кг/(с·м²) и коэффициентов избытка горючего $\phi = 0.96 \rightarrow 1.74$ в камере сгорания ДК-500 наблюдается только режим дозвукового горения. Типичный фрагмент фоторегистрограммы процесса дозвукового горения этой двухфазной смеси представлен на рис. 3, а параметры — в табл. 1 (строка 1). По величине полного давления p_{e30} в камере сгорания можно утверждать (ср. с другими экспериментами) частичное выгорание керосина в обычном пламени.

Фоторегистрограмма представляет собой $(x-t)$ -диаграмму движения светящихся продуктов вдоль оси (окон) камеры. Яркое свечение в верхней части камеры сгорания обеспечива-

Таблица 1

Параметры непрерывной многофронтной детонации в ДК-500 ($K_{ex} = 1.74$) смеси керосин — воздух в опытах серии А ($\phi \geq 0.9$) при варьировании температуры подогрева воздуха в форкамере

$T_{*,a}$, 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	8.65 → 3.9	1989 → 878	0.96 → 1.74	—	—	—	1.94 → 1.18	3.3 → 2	Горение
600	8.09 → 5.46	1310 → 914	0.95 → 1.14	2.08 → 2.24	4	0.82 → 1.23	3.48 → 2.05	6.49 → 4.43	НМД
	5.46 → 4.22	914 → 729	1.14 → 1.23	1.2 → 1.14	2	0.9	2.05 → 1.27	4.43 → 3.46	НМД
800	9.38 → 7.0	1416 → 1110	0.9 → 1.04	2.5 → 2.31	4	0.99 → 0.92	3.64 → 2.8	7.05 → 5.68	НМД
	7.0 → 4.74	1110 → 783	1.04 → 1.19	1.25 → 1.18	2	1.23 → 0.93	2.8 → 2	5.68 → 3.82	НМД
800 конус	9.2 → 6.58	1310 → 1041	0.99 → 1.06	2.66 → 2.19	4	1.05 → 0.87	3.6 → 2.7	6.92 → 5.34	НМД
	6.58 → 3.96	1041 → 735	1.06 → 1.2	1.16 → 0.96	2	0.91 → 0.76	2.7 → 1.8	5.34 → 3.21	НМД
1000	9.2 → 7.88	1319 → 1168	0.95 → 1.02	2.5 → 2.4	4	1.03 → 0.95	3.5 → 3.2	6.84 → 6.12	НМД
	7.88 → 4.23	1168 → 657	1.02 → 1.28	1.28 → 1.14	2	1.01 → 0.9	3.2 → 1.8	6.12 → 3.41	НМД
1200	9.96 → 4.98	1372 → 761	0.92 → 1.24	2.56 → 2.53	4	1.01 → 1	3.6 → 2	7.17 → 3.87	НМД

Примечание. p_a — атмосферное давление.

ет струя продуктов горения $C_2H_2-O_2$, свечение ослабляется при смешении с продуктами горения керосина в воздухе. По наклонам траекторий продуктов можно оценить их скорость вдоль камеры — около 40 м/с. В нижней части камеры сгорания в зазоре шириной $\Delta_{ex} = 31.5$ мм скорость продуктов увеличивается до критической (см. табл. 1, строка 1, $p_{c30}/p_{c3} \approx 1.7$), поэтому свечение продуктов настолько ослабляется, что фактически не фиксируется видеокамерой.

Детонационный процесс в камере сгорания удалось получить при повышении температуры воздуха в форкамере в пределах $T_{*,a} \approx 600 \div 1200$ К. При этом в одной серии опытов коэффициент избытка горючего изменялся в течение опыта в диапазоне $\phi = 0.9 \rightarrow 1.28$, а в другой — $\phi = 0.66 \rightarrow 1.23$.

При температуре подогретого в форкамере воздуха $T_{*,a} \approx 600$ К ($m_{ox} = 2.73$ %), удельном

расходе нагретого воздуха через щель на входе в камеру сгорания $g_\delta = 1310 \rightarrow 729$ кг/(с·м²) и коэффициенте избытка горючего $\phi = 0.95 \rightarrow 1.23$ были осуществлены режимы НМД с частотой встречных ПДВ $f \approx 2.08 \rightarrow 2.24 \rightarrow 1.14$ кГц. Фрагменты типичных фоторегистрограмм режима НМД, снятых через продольные окна и поперек второго окна камеры сгорания (($x-t$)-диаграммы движения ПДВ), представлены на рис. 4. Основные параметры детонационного процесса, фрагмент которого изображен на рис. 4, в исследованном диапазоне расходов двухфазной смеси приведены в табл. 1 (вторая строка).

Верхняя часть фоторегистрограммы (первое, второе, третье окно и 1/3 четвертого окна) отображает слабое свечение процесса горения водорода в форкамере. Нижняя часть фоторегистрограммы (2/3 четвертого окна и три полных окна) отображает свечение режима НМД в камере сгорания со встречными ПДВ, две из которых (A и A_1) обозначены на рис. 4, а. Белые и темные диагональные линии — это траектории продуктов сгорания. Черные горизонтальные линии (ширина 24 мм) — непрозрачные участки камеры сгорания между окнами. В камере сгорания наблюдается очень нерегулярная структура поперечных волн, как и в классической многофронтной детонации [2]. Из рис. 4, а за период времени до появления явно выраженных ПДВ против окон определялась средняя частота ПДВ $f \approx 1.14$ кГц с точностью ± 1 %. Измерение частоты дублировалось дат-



Рис. 3. Фрагмент фоторегистрограммы процесса дозвукового горения двухфазной смеси керосин — холодный воздух:

$K_{ex} = 1.74$, $g_\delta = 1325$ кг/(с·м²), $\phi = 1.3$; верхний срез фоторегистрограммы — вход в камеру сгорания

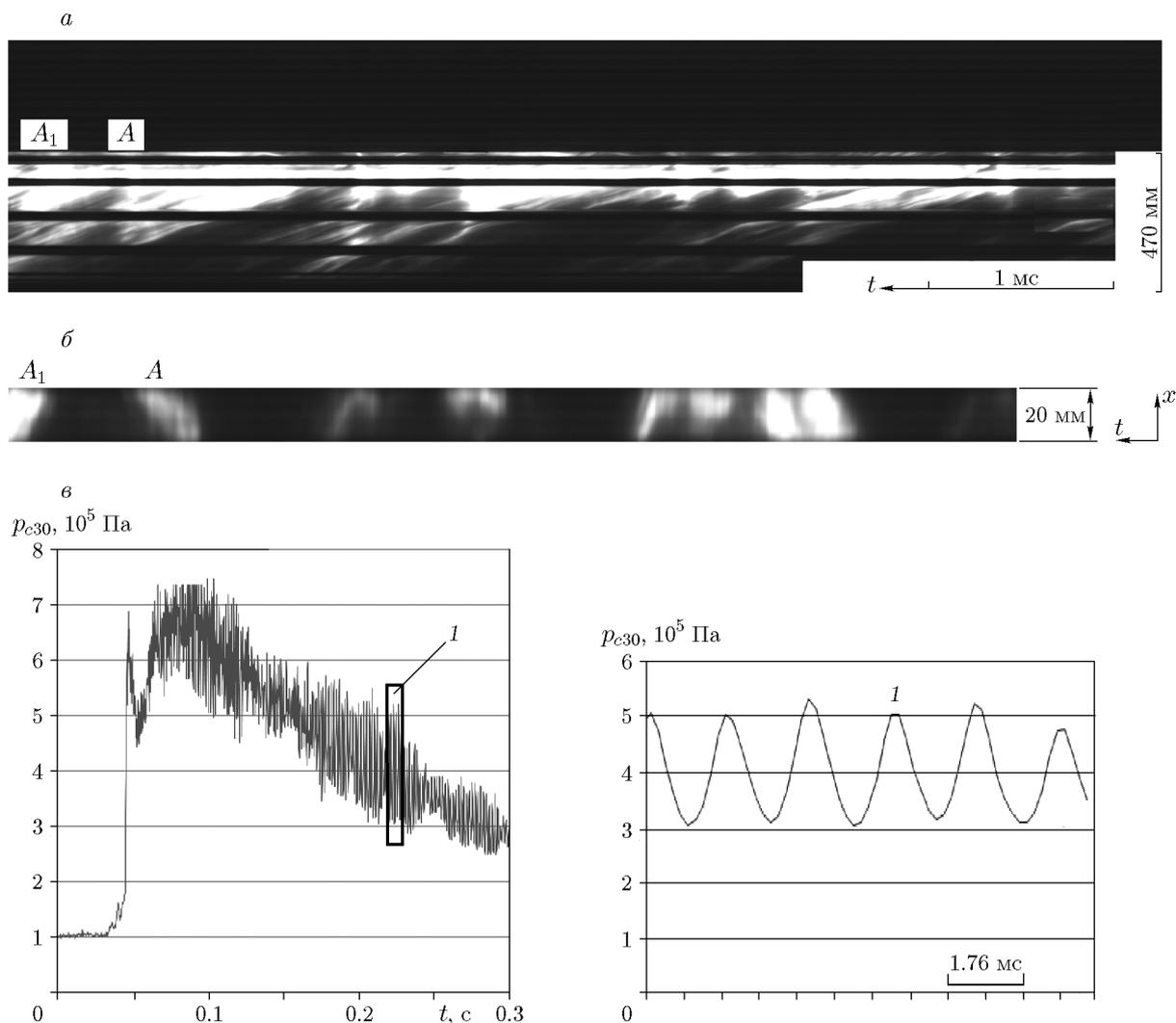


Рис. 4. Фрагмент фоторегистрограммы режима НМД керосин — подогретый ($T_{*,a} = 600$ К) воздух (а), $(x-t)$ -диаграмма движения поперечных волн (б), осциллограмма полного давления p_{c30} на выходе из камеры сгорания и ее фрагмент 1 (в):

$$K_{ex} = 1.74, g_{\delta} = 816 \text{ кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2), \phi = 1.2, n = 2, \langle D \rangle = 0.9 \text{ км}/\text{с}, f = 1.14 \text{ кГц}$$

чиком полного давления p_{c30} на выходе из камеры сгорания (рис. 4, в). Этот датчик, имеющий собственную частоту колебаний около 10 кГц, не измерял профиль давления, но фиксировал частоту детонационных волн. Выборкой из пяти — десяти периодов движения волн около датчика (рис. 4, в, фрагмент 1) их средние частота и скорость определялись примерно с той же точностью — ± 1 %.

Фоторегистрограмма (см. рис. 4, а) не позволяет определить направление движения ПДВ — все волны фиксируются вращающимися в одном направлении. Направление вращения волн по окружности определялось построением $(x-t)$ -диаграммы, снятой поперек второго

окна камеры сгорания (рис. 4, б). Видно, что сталкивающиеся волны движутся во встречных направлениях. В данном случае волна А движется справа налево, а волна А₁ — слева направо. 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 [23]

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

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

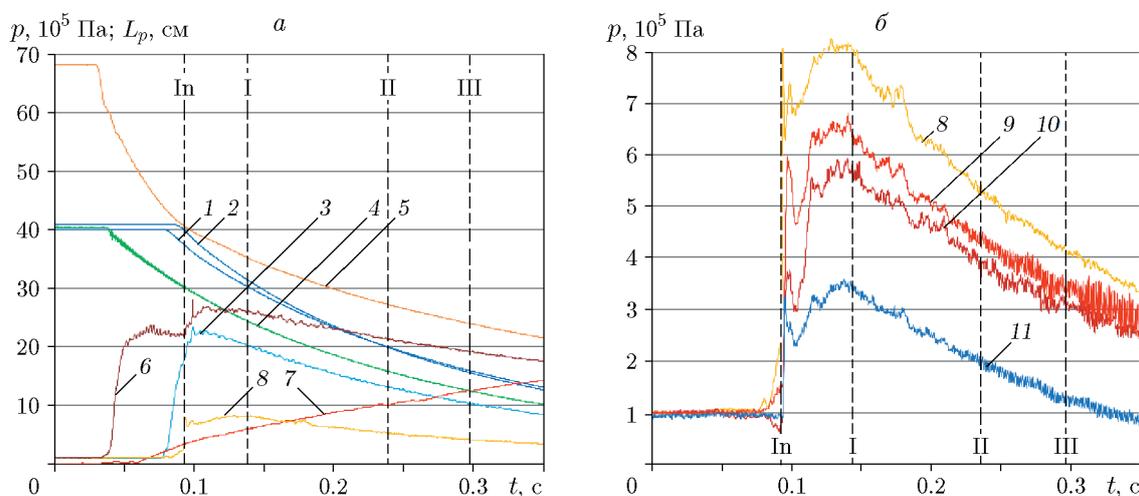


Рис. 5. Временные истории давления в системе подачи компонентов смеси (а), в форкамере и камере сгорания (б):

1 — $p_{r,a1}$, 2 — $p_{r,a2}$, 3 — $p_{m,a}$, 4 — $p_{r,H}$, 5 — $p_{r,f}$, 6 — $p_{m,f}$, 8 — $p_{*,a}$, 9 — p_{c30} , 10 — p_{c1} , 11 — p_{c3} ; 7 — ход поршня L_p , In — инициирование горения в форкамере и камере сгорания, I, III — начало и конец истечения нагретого до $T_{*,a} \approx 600$ К воздуха, II — параметры процесса, соответствующие фоторегистрограмме на рис. 4

Предположим, что при $f = 1.14$ кГц, 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 $\phi = 1.2$ [25]. Остается единственная возможность — принять $n = 2$ (одна пара сталкивающихся волн), тогда из соотношения (2) получим значение средней скорости режима НМД $\langle D \rangle = 0.9$ км/с.

На рис. 5 представлены измеренные временные истории давления в системе подачи, в форкамере и камере сгорания, соответствующие фоторегистрограмме на рис. 4.

Отсчет времени соотносится с запуском системы регистрации и программного устройства. Вначале ($t \approx 40$ мс) в форкамеру подается водород, а в камеру сгорания — двухфазная смесь керосина с барботирующим воздухом (кривые 4, 5 и 6 соответственно). Одновременно в форкамеру и камеру сгорания впрыскиваются струи ацетилена с кислородом. Через 50 мс в форкамеру поступает воздух, обогащенный кислородом ($m_{ox} = 2.73$ %). С повышением давления воздуха в форкамере срабатывала система инициирования и поджигался водород с последующим воспламенением смеси керосин — нагретый воздух в камере сгорания. В течение 40 мс в камере сгорания существовало обычное горение, а затем сформировались ПДВ. Необходимая температура $T_{*,a0} = 600 \pm$

70 К установилась в форкамере при $t \approx 140$ мс от начала отсчета и держалась около 160 мс. На рис. 5 границы этой области помечены цифрами I–III. По уровню давлений в камере сгорания (рис. 5, б) видно, что истечение из форкамеры в камеру сгорания докритическое (кривые 8, 10), а из камеры сгорания в атмосферу — сверхкритическое (кривые 9, 11). Датчики давления в камере сгорания явно фиксируют наличие колебаний в камере. По специальной программе проводилось сглаживание зафиксированных колебаний, осредненные значения которых приведены в табл. 1.

Последовательное повышение температуры воздуха в форкамере до $T_{*,a} \approx 800, 1000$ и 1200 К ($m_{ox} = 4.05 \div 6.57$ %) также привело к реализации режимов НМД двухфазной смеси керосин — подогретый воздух, основные параметры процессов представлены в табл. 1 (строки 3–6), а фрагмент фоторегистрограммы НМД при $T_{*,a} \approx 1200$ К — на рис. 6.

В опытах с уровнем температуры воздуха в форкамере $T_{*,a} \approx 800, 1000$ и 1200 К характер временных историй давления в системе подачи и в камере сгорания отличался незначительно. С увеличением $T_{*,a}$ расширялась область реализации процесса по сравнению с рассмотренным случаем $T_{*,a} \approx 600$ К (см. рис. 2, а).

При $T_{*,a} = 800$ К также проводилось сжигание керосина в камере сгорания с конусной

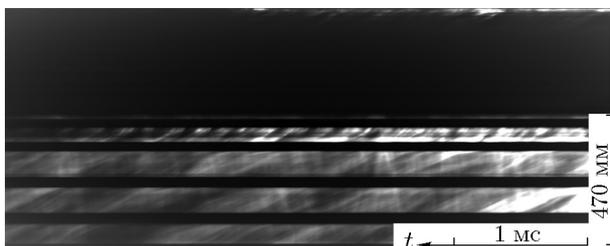


Рис. 6. Фрагмент фоторегистрограммы режима НМД керосин — подогретый ($T_{*,a} = 1200$ К) воздух:

$$K_{ex} = 1.74, g_{\delta} = 852 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2), \phi = 1.19, n = 4, \langle D \rangle = 0.97 \text{ км}/\text{с}, f = 2.46 \text{ кГц}$$

вставкой на выходе (см. рис. 1, поз. 18). Опыты показали, что для данной геометрии камеры сгорания установка диска или конуса не имеет принципиального значения. В исследованном диапазоне удельных расходов воздуха при близких коэффициентах избытка топлива наблюдали четырех- и двухволновые режимы НМД с переходом от $n = 4$ к $n = 2$ при $g_{\delta} \approx 1070 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$. При этом полное давление на выходе из камеры сгорания p_{c30} , определяющее тяговые характеристики, практически не изменилось (см. табл. 1, строки 3 и 4). Поэтому при проведении дальнейших опытов ограничились установкой диска на выходе из камеры.

Рассмотренные выше режимы НМД были реализованы при соотношениях керосина и воздуха, близких к стехиометрии $\phi_0 = 0.95 \pm 0.05$ в начале опытов серии А. Обычно реальные авиационные двигатели работают при меньших коэффициентах избытка горючего [26]. Поэтому была проведена вторая серия опытов (серия Б) при огневом подогреве воздуха в форкамере в пределах $T_{*,a} \approx 600 \div 1200$ К с уменьшением примерно на 25 % начального расхода керосина, что приводило к обедненным по горючему керосиновоздушным смесям: $\phi_0 =$

0.7 ± 0.05 в начале опытов. Расходы воздуха поддерживались близкими к расходам серии опытов А. Поскольку в течение эксперимента расход воздуха уменьшался быстрее, чем расход керосина, коэффициент избытка горючего возрастал со временем. В этих опытах также были реализованы режимы НМД. Параметры процессов приведены в табл. 2.

Итак, при огневом подогреве в форкамере воздуха от $T_{*,a} = 600$ до 1200 К в кольцевой камере ДК-500 с сужением ее выходного сечения до $K_{ex} = 1.74$ в смеси керосин — подогретый воздух реализованы детонационные режимы с двумя и четырьмя встречными ПДВ в диапазоне коэффициента избытка горючего $\phi = 0.66 \div 1.23$.

2.3. Режимы сжигания керосина в камере сгорания при $K_{ex} = 2.96$

Попытки реализации детонационного режима сжигания керосина в нагретом воздухе (до $T_{*,a} = 600$ К) в камере сгорания при сужении диском ее выходного сечения до $K_{ex} = 2.96$ к успеху не привели. В камере сгорания развивалось дозвуковое горение с множеством тангенциальных акустических волн. При более высоких температурах воздуха опыты не проводились, поскольку при повышении $T_{*,a}$ обычное горение развивается более интенсивно и возможность реализации детонационных режимов при данных условиях подачи ТВС и конструкции камеры сгорания уменьшается.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

3.1. Влияние температуры подогрева воздуха на детонационный режим

Для режимов НМД гетерогенной смеси керосин — нагретый воздух в камере ДК-500

Таблица 2

Параметры непрерывной многофронтной детонации в ДК-500 с диском ($K_{ex} = 1.74$) смеси керосин — воздух в опытах серии Б ($\phi \geq 0.66$) при варьировании температуры подогрева воздуха в форкамере

$T_{*,a}$, 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
600	7.32 → 3.24	906 → 482	0.79 → 1.23	1.24 → 1.01	2	0.98 → 0.79	2.5 → 1.3	4.89 → 2.55	НМД
800	8.92 → 4.3	1343 → 666	0.68 → 1.0	1.29 → 1.23	2	1.02 → 0.97	3.3 → 2.4	6.19 → 4.62	НМД
1000	10.1 → 3.89	1449 → 571	0.66 → 1.12	2.36 → 2.55	4	0.93 → 1.01	3.3 → 1.6	6.21 → 3.06	НМД
1200	8.6 → 3.64	1357 → 548	0.75 → 1.12	2.56 → 2.45	4	1.0 → 0.97	3.6 → 2	6.78 → 2.91	НМД

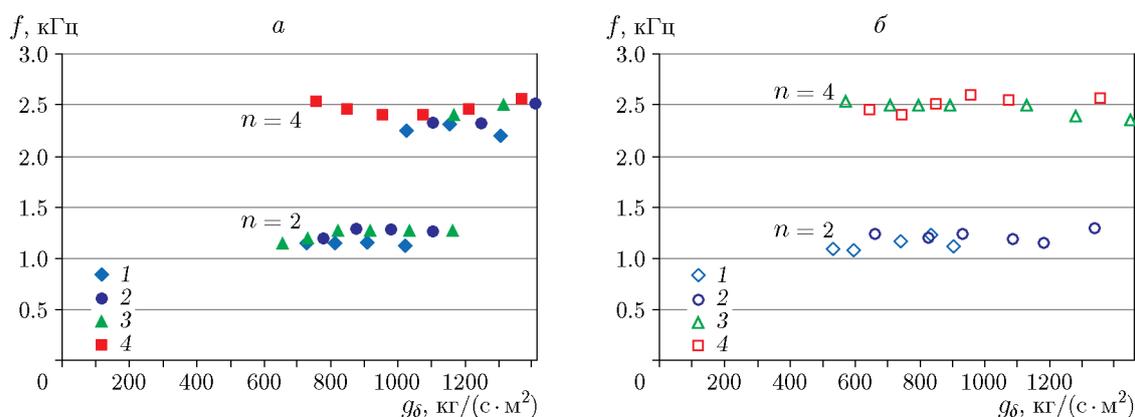


Рис. 7. Зависимости частоты ПДВ от удельного расхода подогретого до разных температур воздуха в опытах серий А (а) и Б (б):

1 — $T_{*,a} = 600$ К, 2 — 800, 3 — 1 000, 4 — 1 200 К

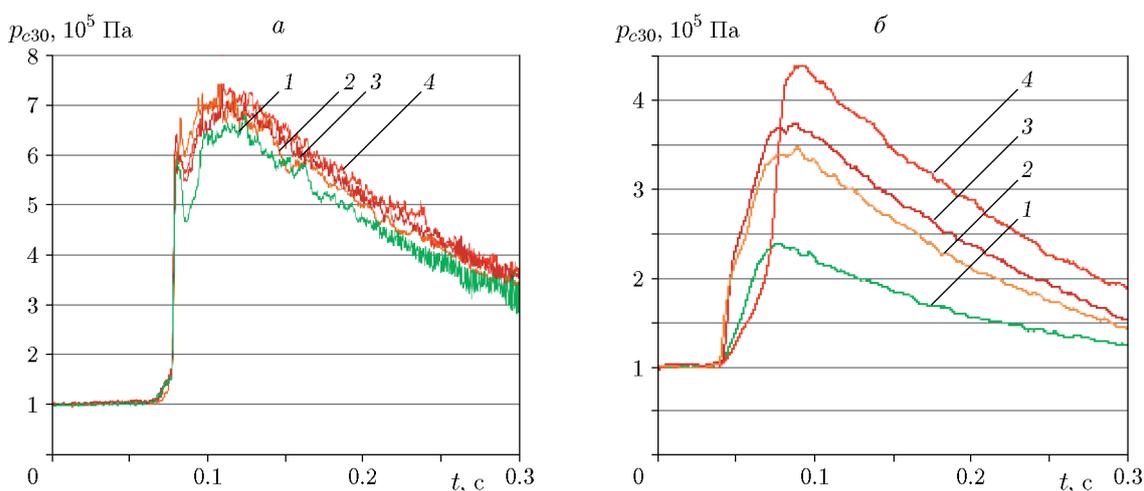


Рис. 8. Полное давление на выходе из камеры сгорания в режиме НМД в опытах серии А (а) и при холостых пусках (б):

1 — $T_{*,a} = 600$ К, 2 — 800, 3 — 1 000, 4 — 1 200 К

с диском при $K_{ex} = 1.74$ зависимости частоты ПДВ от удельного расхода воздуха g_δ при различных значениях температуры нагретого в форкамере воздуха $T_{*,a}$ в опытах А ($\phi_0 \approx 0.95$) и опытах Б ($\phi_0 \approx 0.7$) представлены на рис. 7. Видно, что частота сталкивающихся ПДВ при $n = 4$ находится в диапазоне $f = 2.4 \pm 0.2$ кГц, а при $n = 2$ — $f = 1.2 \pm 0.1$ кГц. При одинаковых значениях g_δ с повышением температуры $T_{*,a}$ частота ПДВ возрастает. Причем для смесей с $\phi_0 \approx 0.7$ при $T_{*,a} = 600$ и 800 К зарегистрированы режимы только с двумя ПДВ ($n = 2$), а при $T_{*,a} = 1000$ и 1200 К — с четырьмя ($n = 4$) ПДВ. Для смесей с $\phi_0 \approx 0.95$ режим с четырьмя ПДВ наблюдался только при $T_{*,a} = 1200$ К, а при $T_{*,a} = 600, 800$ и 1000 К с уменьшением удельного расхода воздуха про-

исходил переход $n = 4 \rightarrow 2$. Это значит, что смесь керосина с воздухом при $T_{*,a} = 1200$ К более химически активна, поэтому детонировала с большим числом ПДВ в обоих случаях.

Во всех опытах с режимом НМД истечение нагретого воздуха из форкамеры в камеру ДК-500 через щель шириной $\delta = 10.5$ мм является докритическим, а на выходе продуктов из камеры сгорания — сверхкритическим. С повышением температуры $T_{*,a}$ растет давление в форкамере (см. рис. 2, б), а полное давление p_{e30} на выходе из камеры сгорания в режиме НМД практически не меняется.

Рис. 8, а иллюстрирует изменение полного давления для смесей с $\phi_0 \approx 0.95$. В режимах с $\phi_0 \approx 0.7$ полное давление уменьшалось примерно на 6 %. В опытах с холостыми пусками,

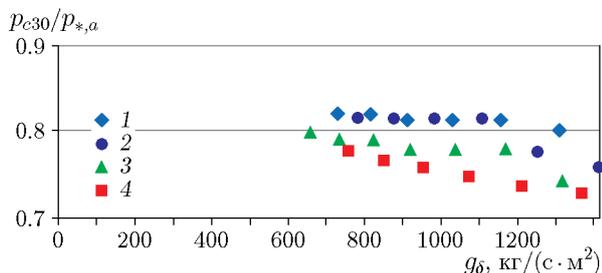


Рис. 9. Зависимость отношения $p_{c30}/p_{*,a}$ от удельного расхода нагретого до разных температур воздуха:

1 — $T_{*,a} = 600$ К, 2 — 800, 3 — 1000, 4 — 1200 К

когда в камеру сгорания вместо керосина подавался с близким расходом воздух, при увеличении температуры воздуха в форкамере полное давление p_{c30} на выходе из камеры монотонно растет (рис. 8,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 камеры было больше при горении керосина (рис. 8,а), чем при замене его воздухом (рис. 8,б).

Интересно поведение отношения давления торможения продуктов на выходе из камеры к давлению в форкамере $p_{c30}/p_{*,a}$, так как оно определяет одновременно гидравлические потери на щели и в камере сгорания. Зависимости отношения $p_{c30}/p_{*,a}$ от удельного расхода нагретого воздуха через щель g_δ при детонационном сжигании двухфазной смеси керосин — нагретый воздух ($\phi_0 \approx 0.95$) при

$T_{*,a} = 600, 800, 1000$ и 1200 К приведены на рис. 9. Для смеси с $\phi_0 \approx 0.7$ эти зависимости практически не отличаются.

Видно, что наибольшее отношение $p_{c30}/p_{*,a}$ соответствует температуре $T_{*,a} = 600$ К (0.8 ± 0.02), а наименьшее (0.75 ± 0.04) — температуре $T_{*,a} = 1200$ К. Это значит, что с увеличением температуры воздуха растут потери полного давления в направлении к выходу из камеры сгорания.

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 камеры сгорания определяли, аналогично [27], силу тяги F_h при истечении продуктов горения смеси керосин — нагретый воздух, а также силу тяги F_c при холостых пусках. Зависимости F_h и F_c от общего расхода компонентов двухфазной смеси G_Σ при $K_{ex} = 1.74$ для ряда температур $T_{*,a}$ приведены на рис. 10,а. Видно, что в исследованной области температур воздуха в форкамере значения F_h практически совпадают, в то время как значения F_c увеличиваются с ростом температуры.

Делением разности сил тяги F_h и F_c на расход керосина G_f и ускорение свободного падения g определяли удельный импульс относительно горючего: $I_{sp,f} = (F_h - F_c)/(G_f \cdot g)$ (в секундах). На рис. 10,б представлены зависимости удельного импульса $I_{sp,f}$ от удельного расхода через щель нагретого воздуха g_δ . Чтобы не загромождать рисунок, приведены

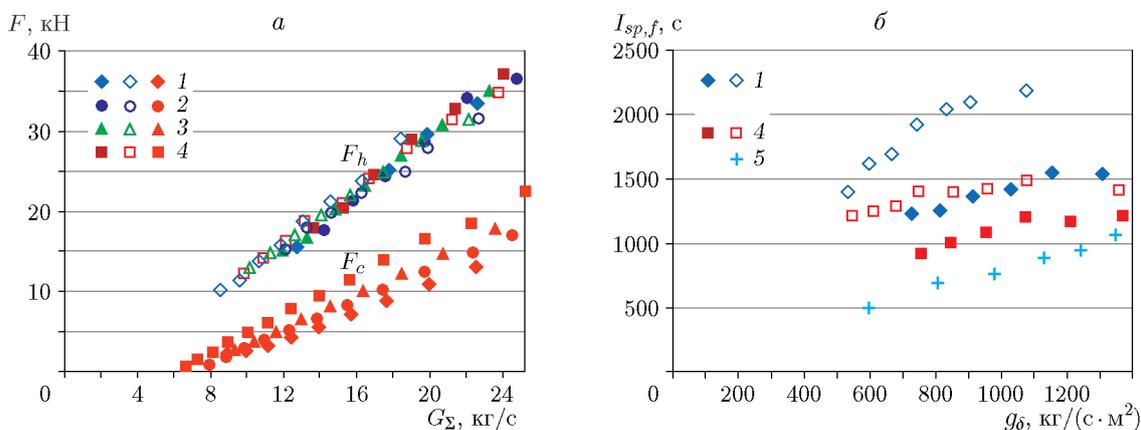


Рис. 10. Зависимости сил тяги F_h и F_c от общего расхода компонентов двухфазной смеси G_Σ (а) и удельного импульса $I_{sp,f}$ от удельного расхода воздуха через щель g_δ (б) при $K_{ex} = 1.74$: 1 — $T_{*,a} = 600$ К, 2 — 800, 3 — 1000, 4 — 1200, 5 — 293 → 230 К ($K_{ex} = 2.96$ [16])

значения $I_{sp,f}$ только для крайних температур воздуха $T_{*,a} = 600$ и $1\,200$ К, для промежуточных температур значения $I_{sp,f}$ располагаются между ними. Символы со сплошной заливкой соответствуют опытам А, а полые — опытам Б.

Видно, что с увеличением температуры воздуха и коэффициента избытка горючего удельный импульс уменьшается. При фиксированных температурах воздуха уменьшение их максимальных значений составляет: при $T_{*,a} \approx 600$ К — от $I_{sp,f} = 2\,200$ до $1\,550$ с, при $T_{*,a} \approx 1\,200$ К — от $I_{sp,f} = 1\,500$ до $1\,200$ с.

На поведение силы тяги F_h (постоянство при всех значениях $T_{*,a}$) и уменьшение $I_{sp,f}$ с ростом $T_{*,a}$ определяющее влияние, по нашему мнению, оказывает рост степени диссоциации продуктов горения керосина в воздухе, когда химическая энергия топлива всё в меньшей степени преобразуется в кинетическую энергию. Известно, что с увеличением начальной температуры смеси $T_{*,a}$ растет и температура продуктов горения T_p , причем практически линейно [28]. При $T_p < 1\,600$ К диссоциацию продуктов можно не учитывать, при $T_p = 1\,600 \div 2\,400$ К проявляется слабая диссоциация, однако при $T_p > 2\,400$ К она становится сильной и константа диссоциации кислорода возрастает на порядок. В нашем случае при $T_{*,a} = 600, 800, 1\,000$ и $1\,200$ К и $\phi \approx 1$ температура продуктов составит $T_p \approx 2\,300, 2\,400, 2\,500$ и $2\,600$ К соответственно. На повышение удельного импульса влияет также присоединенная масса воздуха [27]. Во всех случаях противодействие внешней среды приводит к его снижению.

На рис. 10,б для сравнения приведена зависимость удельного импульса (кривая 5) при детонационном горении смеси керосин — холодный воздух при подаче холодного воздуха в камеру сгорания и изменении ϕ в диапазоне $0.96 \rightarrow 1.74$ [16]. Меньшие значения $I_{sp,f}$ указывают на явное недогорание керосина.

ВЫВОДЫ

В проточной кольцевой камере сгорания ДК-500 при сужении выходного сечения в 1.74 раза впервые реализованы и исследованы режимы непрерывной многофронтной детонации керосина при смешении его с горячим воздухом, предварительно нагретым огнем способом в форкамере в диапазоне $600 \div 1\,200$ К.

Показано, что нагрев воздуха способствует реализации детонационного сжигания керосина. Наблюдали одну или две пары сталкивающихся поперечных волн с частотой 1.2 ± 0.1 или 2.4 ± 0.2 кГц соответственно. Наибольшая частота соответствовала более нагретому воздуху. По измерениям полного и статического давления на выходе из камеры сгорания определены удельные импульсы при непрерывной многофронтной детонации в зависимости от расхода и температуры нагретого воздуха, а также от коэффициента избытка горючего. Установлено, что при одном и том же удельном расходе воздуха на входе в камеру сгорания с повышением температуры воздуха удельный импульс тяги уменьшается вследствие увеличения степени диссоциации продуктов детонации. При удельном расходе воздуха на входе в камеру около $1\,200$ кг/(с·м²) максимальное значение удельного импульса с учетом энергии нагретого до 600 К воздуха составило $2\,200$ с, а минимальное — $1\,200$ с при температуре $1\,200$ К. Показано, что в режиме непрерывной многофронтной детонации удельный импульс возрастает с обеднением смеси горючим.

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. **Vykovskii F. A., Zhdan S. A., Verdernikov E. F.** Continuous spin detonations // J. Propul. Power. — 2006. — V. 22, N. 6. — P. 1204–1216. — DOI: 10.2514/1.17656.
4. **Wolanski P.** Detonative propulsion // Proc. Combust. Inst. — 2013. — V. 34. — P. 125–158. — DOI: 10.1016/j.proci.2012.10.005.
5. **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.
6. **Zhou R., Wu D., Wang J.** Progress of continuously rotating detonation engines // Chin. J. Aeronaut. — 2016. — V. 29, N 1. — P. 15–29. — DOI: 10.1016/j.cja.2015.12.006.
7. **Rankin B. A., Fotia M. L., Naples A. G., Stevens C. A., Hoke J. L., Kaemming T. A., Theuerkauf S. W., Schauer F. R.** Overview of performance, application, and analysis of rotating detonation engine technologies // J. Propul. Power. — 2017. — V. 33, N 1. — P. 131–143. — DOI: 10.2514/1.B36303.

8. **Anand V., Gutmark E.** Rotating detonation combustors and their similarities to rocket instabilities // *Prog. Energy Combust. Sci.* — 2019. — V. 73. — P. 182–234. — DOI: 10.1016/j.pecs.2019.04.001.
9. **Wolański P.** RDE research and development in Poland // *Shock Waves.* — 2021. — V. 31, N 7. — P. 623–636. — DOI: 10.1007/s00193-021-01038-2.
10. **Фролов С. М., Звегинцев В. И., Иванов В. С. и др.** Макет-демонстратор непрерывно-детонационного прямоточного воздушно-реактивного двигателя. Результаты испытаний в аэродинамической трубе // *Докл. АН.* — 2017. — Т. 474, № 1. — С. 51–55.
11. **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.
12. **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.
13. **Kindracki J.** Experimental research on rotating detonation in liquid fuel-gaseous air mixtures // *Aerosp. Sci. Technol.* — 2015. — V. 43. — P. 445–453. — DOI: 10.1016/j.ast.2015.04.006.
14. **Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф.** Непрерывная спиновая детонация гетерогенной смеси керосин — воздух с добавкой водорода // *Физика горения и взрыва.* — 2016. — Т. 52, № 3. — С. 128–130. — DOI: 10.15372/FGV20160318.
15. **Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф.** Непрерывная детонация смеси жидкий керосин — воздух с добавкой водорода или синтез-газа // *Физика горения и взрыва.* — 2019. — Т. 55, № 5. — С. 83–92. — DOI: 10.15372/FGV20190510.
16. **Vykovskii F. A., Zhdan S. A., Vedernikov E. F.** Continuous multifront detonation of kerosene-air mixture in an annular combustor with variations of its geometry // *Shock Waves.* — 2021. — V. 31, N 8. — P. 829–839. — DOI: 10.1007/s00193-021-01044-4.
17. **Wolański P., Balicki W., Perkowski W., Bilar A.** Experimental research of liquid-fueled continuously rotating detonation chamber // *Shock Waves.* — 2021. — V. 31, N 7. — P. 807–812. — DOI: 10.1007/s00193-021-01014-w.
18. **Фролов С. М., Иванов В. С., Шамшин И. О. и др.** Форсажная камера с детонационным горением керосина // *Горение и взрыв.* — 2022. — Т. 15, № 1. — С. 67–71. — DOI: 10.30826/CE22150108.
19. **Xu S., Song F., Zhou J., Yang X., Cheng P.** Experimental study on propagation characteristics of kerosene/air RDE with different diameters // *Energies.* — 2022. — V. 15, N 12. — 4442. — DOI: 10.3390/en15124442.
20. **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.
21. **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.
22. **Быковский Ф. А., Ведерников Е. Ф.** Течение в вихревой плоскорадиальной камере. 1. Экспериментальное исследование поля скоростей в переходном и стационарном режимах // *ПМТФ.* — 1999. — Т. 40, № 6. — С. 112–121.
23. **Быковский Ф. А., Ждан С. А.** Непрерывная спиновая детонация. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013.
24. **Краткий справочник химика** / под ред. В. И. Перельмана. — М.: Изд-во хим. лит., 1963.
25. **Austin J. M., Shepherd J. E.** Detonation in hydrocarbon fuel blends // *Combust. Flame.* — 2003. — V. 132, N 1-2. — P. 73–90. — DOI: 10.1016/S0010-2180(02)00422-4.
26. **Иноземцев А. А., Нихамкин М. А., Сандрацкий В. Л.** Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. — М.: Машиностроение, 2008. — Т. 2.
27. **Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф.** Параметры непрерывной детонации смесей метан/водород — воздух при добавлении воздуха в продукты сгорания // *Физика горения и взрыва.* — 2020. — Т. 56, № 2. — С. 83–94. — DOI: 10.15372/FGV20200211.
28. **Щетинков Е. С.** *Физика горения газов.* — М.: Наука, 1965.

*Поступила в редакцию 22.08.2022.
После доработки 23.09.2022.
Принята к публикации 09.11.2022.*