

УДК 534.222.2, 544.454.3

НЕПРЕРЫВНАЯ МНОГОФРОНТОВАЯ ДЕТОНАЦИЯ ВОДОТОПЛИВНОЙ ЭМУЛЬСИИ С ГОРЯЧИМ ВОЗДУХОМ В КОЛЬЦЕВОЙ КАМЕРЕ ДИАМЕТРОМ 503 ММ

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 диаметром 503 мм реализованы и исследованы режимы непрерывной многофронтной детонации водотопливной эмульсии (вода — керосин ТС-1) при смешении ее с горячим воздухом, предварительно нагретым огневым способом в форкамере от 600 до 1200 К. Наблюдали режимы с одной и двумя парами сталкивающихся волн в диапазоне удельных расходов воздуха через щель $600 \div 1400 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ при коэффициенте избытка горючего $0.53 \div 1.0$. Частота вращения поперечных детонационных волн составляла $1.0 \pm 0.1 \text{ кГц}$ для одной пары детонационных волн и $2.4 \pm 0.2 \text{ кГц}$ для двух пар детонационных волн. При температуре воздуха до 800 К определен предел режимов непрерывной многофронтной детонации по массовой доле воды в керосине — в диапазоне $0.38 \div 0.53$. Показано, что увеличение содержания воды в водотопливной эмульсии снижает степень диссоциации продуктов детонации, а при высоких температурах воздуха (1200 К) удельный импульс тяги возрастает и приближается к 2150 с при учете импульса тяги холодных компонентов (без горения).

Ключевые слова: непрерывная многофронтная детонация, водотопливные эмульсии, керосин, горячий воздух, поперечные детонационные волны, кольцевая камера сгорания.

DOI 10.15372/FGV2023.9295

EDN KVNDPZ

ВВЕДЕНИЕ

Водотопливные эмульсии (ВТЭ) на основе углеводородных жидких и твердых горючих в режимах обычного горения (дефлаграции) давно используются в технике с целью снижения расхода горючего, более полного его сгорания и снижения вредных выбросов в атмосферу: сажи, оксидов углерода и азота [1–4]. Детонационное сжигание влажного угля (до 30 % воды) в холодном воздухе в поперечных детонационных волнах (ПДВ) реализовано в вихревой плоско-радиальной камере сгорания (КС) диаметром 500 мм [5].

Для разработки детонационных двигателей особый научный и практический интерес представляют исследования режимов непрерывной спиновой детонации (НСД) гетерогенных топливовоздушных смесей (ТВС) жидкое углеводородное горючее — воздух. Впервые режимы НСД гетерогенных ТВС (жидкие горючие — керосин и дизельное топливо) были реализованы и исследованы в вихревой плоско-радиальной КС диаметром 204 мм [6]. В смеси жидкий керосин — холодный воздух были по-

лучены одноволновые режимы НСД с частотой вращения ПДВ $f = 2.78 \div 3.12 \text{ кГц}$ и скоростью ПДВ $D = 1.78 \div 2 \text{ км/с}$. В кольцевой цилиндрической КС диаметром 503 мм (ДК-500) при сужении ее выходного сечения до трех раз в двухфазной смеси жидкий керосин — холодный воздух реализованы режимы непрерывной многофронтной детонации (НМД) при расходах воздуха до 33 кг/с [7]. Установлено, что при подаче воздуха в КС через щель шириной $\delta = 3.5 \text{ мм}$ реализуются режимы НМД с четырьмя ($n = 4$) встречными ПДВ (частотой $f = 2.59 \div 3.09 \text{ кГц}$, скоростью $D = 1.02 \div 1.22 \text{ км/с}$), а при $\delta = 10.5 \text{ мм}$ — с двумя ($n = 2$) встречными ПДВ ($f = 1.0 \div 1.1 \text{ кГц}$, $D = 0.79 \div 0.87 \text{ км/с}$).

Для того чтобы условия детонационного горения в КС соответствовали условиям на выходе из компрессора турбореактивного двигателя или наземной газотурбинной установки, а также прямого воздушного реактивного двигателя, необходимо подавать в КС нагретый воздух. Поэтому в последнее время активно исследуются в кольцевых КС детонационные режимы смесей углеводородное горючее — нагретый воздух [8–12]. Так, в работе [8] при температурах нагретого до 393 К воздуха и

предварительном испарении жидкого топлива (бензин, керосин) реализованы устойчивые детонационные режимы сжигания в КС диаметром 225 мм, длиной 300 мм. В стандартном турбореактивном двигателе (ТРД) TJ100S-125 с детонационной форсажной КС диаметром 220 мм при расходе воздуха 1.2 кг/с и температуре 473 К реализовано детонационное сжигание керосина [9]. В камерах кольцевой цилиндрической геометрии диаметром 220 и 500 мм при расходе воздуха 1.0 и 2.56 кг/с, нагретого до температуры $500 \div 520$ К, наблюдался режим сжигания керосина во встречных детонационных волнах [10]. В кольцевой КС диаметром 170 мм с резонатором (выемкой во внутренней стенке в начале КС) при расходе воздуха 1.0 кг/с и температуре 860 К исследованы детонационные режимы сжигания керосина [11]. Непрерывная многофронтная детонация гетерогенной смеси авиационного керосина (ТС-1) с горячим воздухом, предварительно нагретым огневым способом в форкамере от 600 до 1200 К, при расходах воздуха до 25 кг/с исследовалась в проточной кольцевой камере диаметром 503 мм и длиной 600 мм (ДК-500) [12]. Получены режимы непрерывной многофронтной детонации с одной парой (частота 1.2 ± 0.1 кГц) или двумя парами (частота 2.4 ± 0.2 кГц) сталкивающихся ПДВ. По измеренным на выходе из КС давлениям торможения определены сила тяги и удельные импульсы. 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. Обеднение смеси за счет снижения расхода горючего повышает удельный импульс, а его максимальное значение с учетом энергии сжатого воздуха в ресиверах составило около 2 200 с при температуре воздуха в форкамере 600 К.

Цель настоящей работы — в проточной кольцевой камере ДК-500 получить и исследовать режимы детонационного сгорания ВТЭ (дистиллированная вода/керосин) — нагретый воздух в области рабочих температур двигателей летательных аппаратов и газотурбинных установок. Предварительный огневой подогрев воздуха осуществлялся в кольцевой форкамере (ФК) сжиганием водорода в воздухе, обогащенном кислородом, в стехиометрическом соотношении с водородом. Этот способ подогрева воз-

духа перед подачей в КС использовался в работе [12].

1. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Экспериментальная проточная КС диаметром $d_{c1} = 503$ мм и длиной $L_c = 600$ мм (ДК-500) с ФК, системой подачи воздуха и ВТЭ полностью соответствует [12], только вместо чистого керосина в КС подается барботированный воздухом ВТЭ. Воздух через кольцевой зазор шириной $\delta = 10.5$ мм и площадью проходного сечения $S_\delta = 162.5$ см² поступал в коаксиальный канал КС шириной $\Delta = 58$ мм и площадью поперечного сечения $S_\Delta = \pi(d_{c1} - \Delta) \cdot \Delta = 810.8$ см². Выхлоп продуктов детонации производился через кольцевую щель шириной $\Delta_{ex} = 31.5$ мм, образованную диском, перекрывающим КС на выходе. Площадь выходного сечения КС $S_{ex} = 466.6$ см². Коэффициент сужения потока на выходе из КС составлял $K_{ex} = S_\Delta / S_{ex} = 1.74$.

ВТЭ приготавливалась следующим способом. В стеклянный стакан объемом 1 л заливались дистиллированная вода и авиационный керосин ТС-1 в определенной пропорции, а затем — эмульгатор «Умос» (примерно 30 мл). Эмульсия создавалась ультразвуковой стиральной машинкой Retona в течение 20 мин. Состав ВТЭ изменялся от опыта к опыту с ростом содержания H₂O (по объему): 0.15, 0.3, 0.45 и 0.6. С учетом воды в составе эмульгатора (примерно 30 мл) массовое содержание воды в ВТЭ $m_w = 0.21, 0.38, 0.53$ и 0.67 соответственно. Отметим, что полученные эмульсии сохранялись до трех месяцев. Барботирующий воздух подавался из ресивера $V_{r,af} = 8.8$ л с одинаковым начальным давлением $p_{r,f,0} = 75 \cdot 10^5$ Па. Начальные расчетные расходы компонентов ТВС составляли: смеси воздуха $G_{a,0}$ и кислорода $G_{ox,0}$ из ресиверов $V_{r,a,ox}$ воздуха — $G_{a,ox,0} = G_{a,0} + G_{ox,0} \approx 24$ кг/с, барботирующего воздуха — $G_{af,0} \approx 0.7$ кг/с ($m_{af} = G_{af,0} / (G_{af,0} + G_{a,0}) \approx 2.8\%$), водорода — $G_{H_2} \approx 0.12 \div 0.27$ кг/с (в зависимости от массовой доли кислорода m_{ox}), керосина — $G_{f,0} = G_{w,0}(1 - m_w) \approx 0.66 \div 1.39$ кг/с, где $G_{w,0}$ — начальный расход ВТЭ. Следует отметить, что начальный расход барботирующего воздуха $G_{af,0}$ отсчитывался от момента его истечения вместе с ВТЭ из форсунки. Текущие расходы компонентов смеси за время опытов (около 0.2 с) уменьшались: $G_{a,ox}$, G_{af} и

G_H — в 2 раза, а ВТЭ G_w — в $1.3 \div 1.5$ раза. Поэтому коэффициент избытка горючего возрастал к концу эксперимента и изменялся в пределах $\phi = 0.53 \div 1.36$. Стехиометрический коэффициент для смеси керосин — воздух принимался равным $\chi_{f,st} = G_{a\Sigma}/G_{f,st} = (G_a + G_{af})/G_{f,st} = 15.24$. Определялись текущие расходы двухфазной смеси $G_\Sigma = G_{a,ox} + G_{af} + G_H + G_{w,0}$ и удельные расходы нагретого в ФК воздуха с продуктами горения кислорода с водородом через щель на входе в КС $g_\delta = (G_{a,ox} + G_H)/S_\delta$.

Фотосъемка процесса через продольные окна, расположенные друг за другом вдоль наружной стенки КС, обработка кадров, а также построение $(x-t)$ -диаграмм движения волн по окружности и длине КС проводились аналогично [12]. В системе подачи регистрировалось статическое давление: в ресиверах основной подачи воздуха, обогащенного кислородом ($p_{r,a1}$, $p_{r,a2}$), в его коллекторе ($p_{m,a}$), в ресивере подачи воздуха, вытесняющего ВТЭ из расходомера поршневого типа ($p_{r,f}$), в ресивере водорода ($p_{r,H}$), в коллекторе ВТЭ ($p_{m,w}$). В ФК на расстоянии 50 мм перед входной щелью в КС регистрировались полное давление (p_p) и температура торможения потока нагретого воздуха (T_p) малоинерционной хромель-алюмелевой термопарой, установленной на расстоянии 7 мм от наружной цилиндрической стенки ФК. В КС регистрировалось статическое давление p_{c1} в 15 мм от входа в КС, а также статическое p_{c3} и полное давление p_{c30} на выходе из КС. Измерения текущих давлений и обработку сигналов с датчиков проводили аналогично [13].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

2.1. Параметры работы ФК при огневом нагреве воздуха

Сначала была проведена отладка способа огневого нагрева воздуха в ФК. Воздух, обогащенный кислородом, поступал в ФК через кольцевую щель, а водород — через форсунку аналогично [12]. В результате прямого сжигания водорода воздух нагревался в ФК от $T_p = 293$ К (холодный воздух) до 600, 800, 1000 и 1200 К (горячий воздух) при $K_{ex} = 1.74$. Результаты измерений в ФК температуры торможения потока T_p и давления торможения p_p при увеличении степени подогрева воздуха и горении ВТЭ в КС приведены на рис. 1.

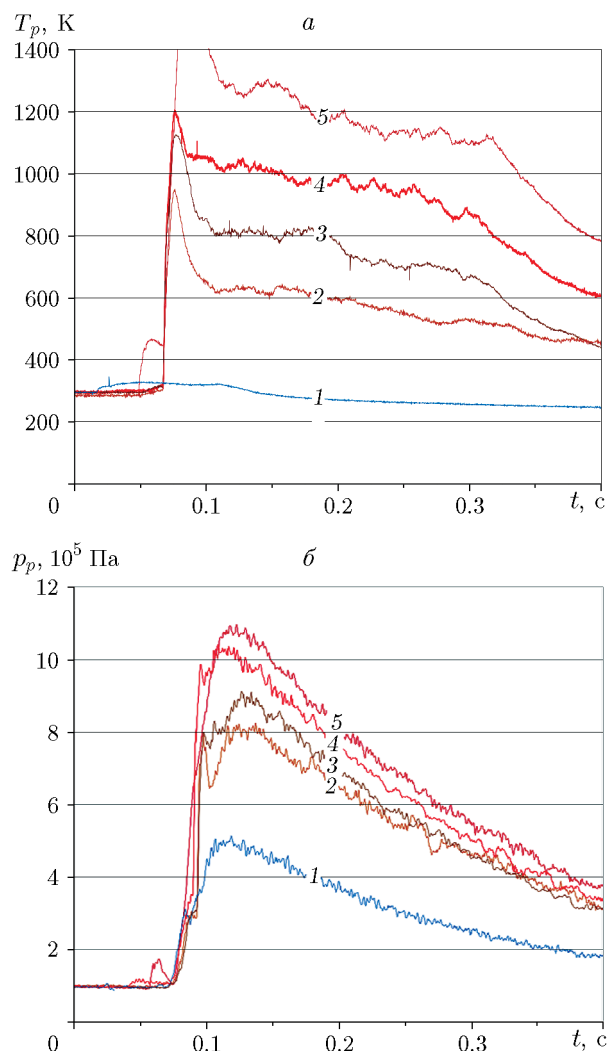


Рис. 1. Зависимости температуры (а) и давления (б) воздуха в ФК от времени:

1 — $T_p = 293 \rightarrow 230$ К, 2 — 600, 3 — 800, 4 — 1000, 5 — 1200 К

При истечении холодного воздуха из ФК температура в ней со временем монотонно понижалась — $T_p = 293 \rightarrow 230$ К (рис. 1, а, кривая 1). Здесь и в дальнейшем стрелкой показано изменение параметров со временем эксперимента. После воспламенения в ФК смеси водорода с воздухом, обогащенным кислородом, температура воздуха резко повышалась (рис. 1, а, кривые 2–5), затем достигала заданной величины и уменьшалась к концу опыта. С повышением температуры воздуха в ФК давление в ней также повышалось (рис. 1, б).

При расчете параметров детонационного горения в КС учитывались температуры, отличающиеся от указанных на ± 100 К слева (начало опыта) и справа (к концу опыта). Детонаци-

онные 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 [12].

После отладки способа огневого подогрева в ФК воздуха сжиганием смеси водород — кислород и получения в ней в течение 200 мс высоких температур T_p были исследованы возможности реализации в камере ДК-500 детонационных режимов смеси ВТЭ — подогретый воздух при $K_{ex} = 1.74$. При этих же повышенных температурах воздуха T_p в ФК проводились опыты (холостые пуски), когда в КС вместо ВТЭ подавался холодный воздух с близким расходом.

2.2. Режимы сжигания ВТЭ в КС при $m_w = 0.38$

В первой серии опытов исследовалось влияние температуры торможения потока воздуха T_p в ФК на горение ВТЭ в КС при концентрации воды $m_w = 0.38$. При подаче холодного воздуха ($T_p = 293 \rightarrow 230$ К, см. рис. 1, кривая 1) из ФК в двухфазной смеси ВТЭ — холодный воздух в диапазоне удельных расходов воздуха $g_\delta = 1365 \rightarrow 594$ кг/(с · м²) и коэффициента избытка горючего $\phi = 0.7 \rightarrow 1.05$ в КС наблюдали только дозвуковое горение. Типичный фрагмент фоторегистрограммы процесса дозвукового горения представлен на рис. 2, а параметры приведены в табл. 1 (первая строка).

Фоторегистрограмма представляет собой $(x-t)$ -диаграмму движения светящихся продуктов вдоль оси (окон) камеры. Свечение в узкой области верхней части КС обеспечивает струя продуктов горения $C_2H_2-O_2$; свечение ослабляется при смешении с продуктами горения ВТЭ в воздухе. Фронт горения отстоит от струи поджигающих продуктов на расстояние около 25 см. По наклону траекторий продуктов горения смеси ВТЭ — воздух можно оценить их скорость вдоль КС — около 60 м/с. По величине полного давления p_{c30} в КС (см. табл. 1) можно утверждать, что в КС существовало частичное выгорание керосина.

Детонационный процесс в КС удалось получить при повышении температуры воздуха в ФК в пределах $T_p = 600 \div 1200$ К. При температуре подогретого в ФК воздуха $T_p \approx 600$ К, удельном расходе нагретого воздуха через щель на входе в КС $g_\delta = 1120 \rightarrow 597$ кг/(с · м²) и коэффициенте избытка горючего $\phi = 0.75 \rightarrow 0.88$ были осуществлены режимы НМД с частотой встречных ПДВ $f \approx 0.99 \rightarrow 0.96$ кГц. Фрагмент типичной фоторегистрограммы режима НМД, снятого через продольные окна, и $(x-t)$ -диаграмма движения ПДВ, вращающихся в противоположные стороны, со средней скоростью $\langle D \rangle \approx 0.78$ км/с, снятых поперек второго окна КС, представлены на рис. 3. Основные параметры детонационного процесса, фрагмент которого изображен на рис. 3, приведены в табл. 1 (вторая строка).

Верхняя часть фоторегистрограммы (первое, второе, третье окна и 1/3 четвертого окна), охватывающая ФК, отображает слабое свечение горения водорода. Нижняя часть фоторегистрограммы (2/3 четвертого окна и три полных окна) отображает свечение режима

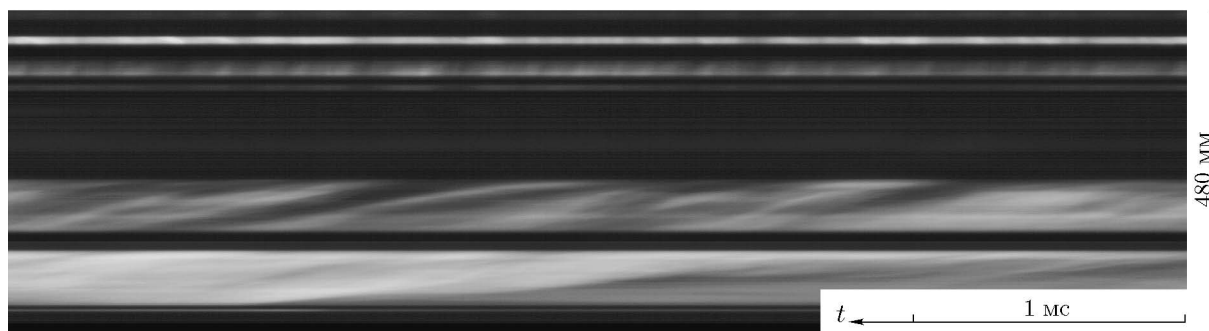


Рис. 2. Фрагмент фоторегистрограммы процесса дозвукового горения смеси ВТЭ — холодный воздух в КС ($g_\delta = 1063$ кг/(с · м²), $\phi = 0.75$, $m_w = 0.38$)

Таблица 1

Параметры НМД в ДК-500 смеси ВТЭ — подогретый воздух ($m_w = 0.38$) при варьировании T_p

T_p , К	p_p/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	4.86 → 2.1	1365 → 594	0.7 → 1.05	—	—	—	1.2 → 0.9	2.4 → 1.21	ДГ
600	7.97 → 7.03	1371 → 1120	0.7 → 0.74	—	—	—	2.6 → 2.62	5 → 4.5	ДГ
	7.03 → 3.75	1120 → 597	0.75 → 0.88	0.99 → 0.96	2	0.78 → 0.76	2.6 → 1.3	4.5 → 2.46	НМД
	7.57 → 3.83	1337 → 735	1.0 → 1.36	—	—	—	1.84 → 1.19	4 → 2.62	ДГ
800	9.25 → 3.81	1381 → 612	0.64 → 0.8	1.11 → 1.0	2	0.88 → 0.79	3.04 → 1.24	6.35 → 2.47	НМД
1000	9.67 → 5.64	1438 → 890	0.63 → 0.72	2.23 → 2.19	4	0.88 → 0.79	3.53 → 2.11	6.74 → 4.27	НМД
	5.64 → 3.69	890 → 636	0.72 → 0.77	1.09 → 1.18	2	0.86 → 0.93	2.11 → 1.33	4.27 → 2.99	НМД
1200	11.07 → 5.84	1367 → 755	0.53 → 0.74	2.46 → 2.05	4	0.97 → 0.81	3.33 → 2.52	6.7 → 5.12	НМД
	5.84 → 5.25	755 → 710	0.74 → 0.83	1.18	2	0.93	2.52 → 1.67	5.12 → 3.61	НМД
	9.93 → 4.82	1254 → 695	1.01 → 1.12	—	—	—	3.16 → 1.52	6.13 → 3.15	ДГ

Примечание. p_a — атмосферное давление.

НМД в КС смеси ВТЭ с нагретым воздухом со встречными ПДВ, две из которых, A и A_1 , обозначены на рис. 3, *a*. 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 [14]. Фоторегистрограмма (рис. 3, *a*) не позволяет определить направление движения ПДВ — все волны фиксируются вращающимися в одном направлении. Направление вращения волн по окружности определялось по $(x-t)$ -диаграмме, снятой поперек второго окна КС (рис. 3, *б*). Видно, что сталкивающиеся волны движутся во встречных направлениях. В данном случае волна A движется справа налево, а волна A_1 — слева направо. То есть в КС реализуется режим НМД со встречными ПДВ, число которых может быть только четным. Из рис. 3, *a* за период времени до появления явно выраженных ПДВ против окон находили их среднюю частоту $f = 0.98 \pm 0.01$ кГц. Количество встречных ПДВ n , размещающихся на периметре КС, и их среднюю скорость $\langle D \rangle$ определяли методом исключения из соотношения [13]

$$\langle D \rangle n = \pi d_{c1} f. \quad (1)$$

Предположим, что при $f = 0.98$ кГц в КС распространяются две пары сталкивающихся волн ($n = 4$), тогда из (1) получим $\langle D \rangle = 0.39$ км/с, что меньше скорости звука в продуктах и не соответствует режиму детонации

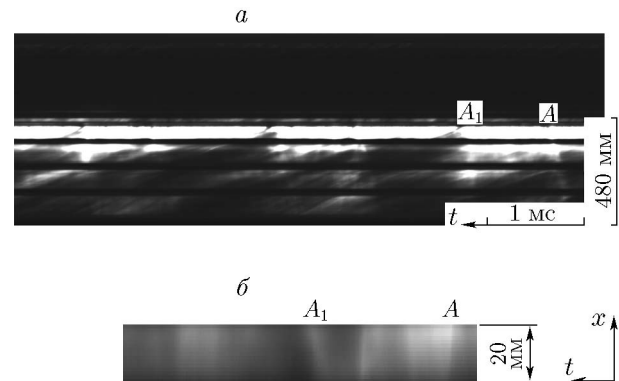


Рис. 3. Фрагмент фоторегистрограммы режима НМД смеси ВТЭ — подогретый воздух при $T_p = 600$ К (*a*), $(x-t)$ -диаграмма движения ПДВ (*б*) ($g_\delta = 946$ кг/(с·м²), $\phi = 0.78$, $n = 2$, $\langle D \rangle = 0.78$ км/с, $f = 0.98$ кГц)

онного горения смеси при $\phi = 0.78$. Остается единственная возможность принять $n = 2$ (одна пара сталкивающихся волн), тогда из соотношения (1) получим значение средней скорости режима НМД $\langle D \rangle = 0.78$ км/с.

На рис. 4 представлены измеренные зависимости давления от времени эксперимента в системе подачи компонентов смеси, в ФК и КС, фрагмент фоторегистрограммы которого приведен на рис. 3. Отсчет времени относится к запуску системы регистрации и программного устройства. На рис. 4, *a* изображена также развертка движения поршня расходомера $L_p(t)$.

Вначале ($t \approx 80$ мс) в ФК подается водород, а в КС — смесь ВТЭ с воздухом (кривые 4–8 на рис. 4, *a*). Одновременно в ФК и КС

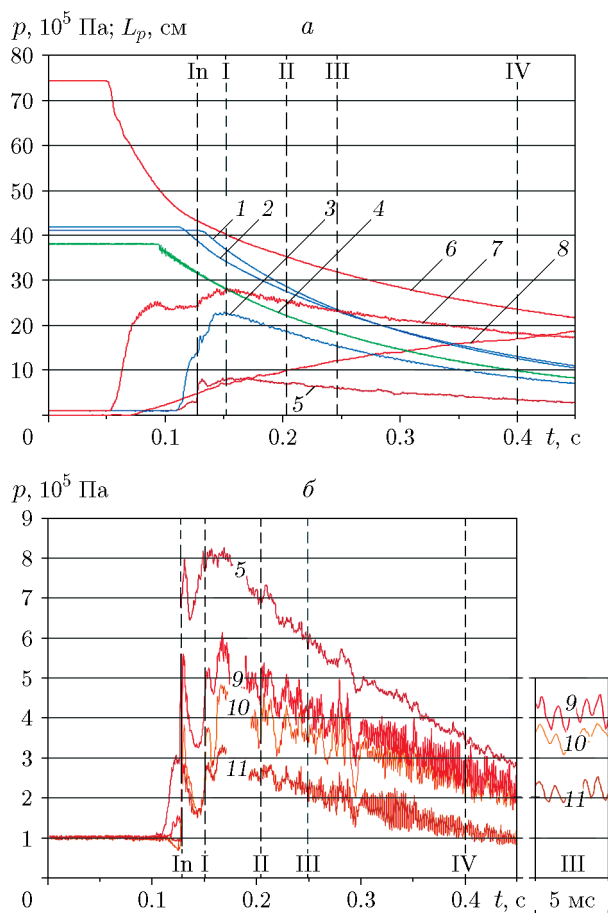


Рис. 4. Зависимость давления от времени в системе подачи компонентов смеси (а), в ФК и КС (б):

1 — $p_{r,a1}$, 2 — $p_{r,a2}$, 3 — $p_{m,a}$, 4 — $p_{r,n}$, 5 — p_p , 6 — $p_{r,f}$, 7 — $p_{m,f}$, 8 — L_p , 9 — p_{c30} , 10 — p_{c1} , 11 — p_{c3} ; In — иницирование горения в ФК и КС, I и IV — начало и конец истечения нагретого до $T_p \approx 600$ К воздуха, I–II — горение, II–IV — НМД, III — параметры процесса, соответствующие фоторегистрограмме на рис. 3

впрыскиваются струи ацетилена с кислородом. Через 30 мс ($t \approx 110$ мс) в ФК поступает воздух, обогащенный кислородом ($m_{ox} = 2.73\%$). С повышением давления воздуха в ФК (кривая 5) срабатывает система иницирования, подробно описанная в [12]. В течение 50 мс в КС существовало обычное горение, а затем сформировались ПДВ. Необходимая температура $T_p = 600 \pm 70$ К установилась в ФК при $t \approx 150$ мс и держалась около 250 мс. На рис. 4 границы этой области помечены римскими цифрами I–IV. По уровню давления в КС (рис. 4, б) видно, что истечение из ФК в КС докритическое (кривые 5 и 10), а из КС в атмосферу — сверхкритическое (кривые 9 и 11).

Датчики давления в КС явно фиксируют наличие в ней колебаний. Сопоставление их частоты с частотой ПДВ, измеренной по фоторегистрограммам, показывает их идентичность. Ввиду своей инерционности датчики (собственная частота колебаний 10 кГц) не измеряют истинный профиль давления, но хорошо отслеживают частоту следования ПДВ. Для примера на рис. 4, б справа приведен фрагмент осциллограммы колебаний давления в области III, зафиксированных в начале (p_{c1} , кривая 10) и в конце КС (p_{c3} и p_{c30} , кривые 11 и 9 соответственно). Видно, что колебания давления происходят в фазе и их частота соответствует частоте следования ПДВ, приведенных на рис. 3, а. Датчики давления фиксируют также и продольные колебания (см. рис. 4, б справа — отклонение средней линии указанных колебаний от горизонтали), частота которых составляет $f \approx 0.1$ кГц. По специальной программе проводилось сглаживание зафиксированных колебаний, осредненные значения которых приведены в табл. 1.

В опытах при температурах воздуха в ФК $T_p \approx 800, 1000$ и 1200 К также наблюдали режимы НМД в смеси ВТЭ — подогретый воздух, характер осциллограмм давлений в системе подачи и в КС, а также структура ПДВ и течение в их окрестности отличались незначительно от рассмотренных выше. Фрагмент фоторегистрограммы НМД при $T_p \approx 1200$ К приведен на рис. 5. Здесь, по сравнению с рис. 3, а, фиксируется более яркое и равномерное свечение продуктов в начале КС и ослабление яркости к выходу из нее. Число пар ПДВ удваивается ($n = 4$), частота их следования увеличивается более чем вдвое, а средняя скорость ПДВ возрастает на 15 %. Резкое снижение частоты происходит в конце процесса при уменьшении количества ПДВ ($n = 4 \rightarrow 2$). При $n = 4$ дат-

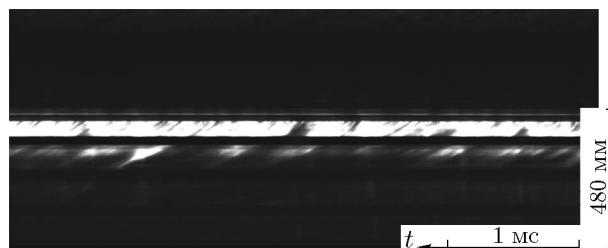


Рис. 5. Фрагмент фоторегистрограммы режима НМД смеси ВТЭ — подогретый воздух при $T_p = 1200$ К, $m_w = 0.38$ ($g_s = 1033$ кг/(с·м²), $\phi = 0.71$, $n = 4$, $\langle D \rangle = 0.9$ км/с, $f = 2.28$ кГц)

чики давления в КС в меньшей степени реагируют на ПДВ, ослабляются также продольные колебания давления, поэтому их осциллограммы выравниваются.

С увеличением коэффициента избытка горючего до $\phi \geq 1$ в КС развивалось обычное горение. Влияние ϕ проверялось при $T_p = 600$ К ($\phi = 1 \rightarrow 1.36$) и $T_p = 1200$ К ($\phi = 1.01 \rightarrow 1.12$). Фоторегистрограмма процессов при этих условиях аналогична приведенной на рис. 2, а осциллограммы — приведенным на рис. 4. Параметры процессов дозвукового горения даны в табл. 1.

2.3. Режимы сжигания ВТЭ в КС при $T_p = 800$ К и варьировании m_w

Опыты проводились при заданной температуре нагретого в ФК воздуха $T_p = 800$ К с целью определения верхнего предела реализации режима НМД по содержанию воды в топливной эмульсии (вода/керосин). Для бедных по

горючему смесей ($\phi \leq 1$) массовая доля воды в ВТЭ варьировалась в диапазоне $m_w = 0 \div 0.67$. Результаты опытов приведены в табл. 2. При $m_w = 0, 0.21$ и 0.38 в КС реализованы режимы НМД. При $m_w = 0.53$ наблюдали дозвуковое горение с пульсирующим давлением в КС и ФК с частотой $f = 0.14$ кГц. При $m_w = 0.67$ возбудить горение в КС не удалось.

Ряд опытов при $m_w = 0.21$ проводили для богатых по горючему смесей ($\phi > 1$). Удельные расходы воздуха через щель в течение эксперимента были близки к приведенным в табл. 2 при $m_w = 0.21$, а расходы ВТЭ изменялись пропорционально коэффициенту избытка горючего ϕ . Режимы НМД наблюдали в ограниченном диапазоне значений $\phi = 1.36 \rightarrow 1.4$. Вне этого диапазона, $\phi = 1.24 \rightarrow 1.36$ и $\phi = 1.4 \rightarrow 1.42$, развивалось дозвуковое горение. При больших значениях $\phi = 1.42 \rightarrow 1.72$ двухфазная смесь в КС не воспламенялась. Параметры этих режимов приведены в табл. 3. Здесь же для сравнения указаны данные для

Таблица 2

Параметры НМД и дозвукового горения в ДК-500 смеси ВТЭ — подогретый воздух ($T_p \approx 800$ К) при варьировании m_w и ϕ

m_w	p_p/p_a	$g\delta, \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$	ϕ	$f, \text{ кГц}$	n	$\langle D \rangle, \text{ км/с}$	p_{c3}/p_a	p_{c30}/p_a	Режим
0	8.92 \rightarrow 4.3	1343 \rightarrow 666	0.68 \rightarrow 1.0	1.29 \rightarrow 1.23	2	1.02 \rightarrow 0.97	3.3 \rightarrow 2.4	6.19 \rightarrow 4.62	НМД [12]
0.21	8.41 \rightarrow 6.23	1287 \rightarrow 1017	0.78 \rightarrow 0.87	2.36 \rightarrow 1.98	4	0.91 \rightarrow 0.78	3.74 \rightarrow 2.71	6.48 \rightarrow 4.91	НМД
	6.23 \rightarrow 3.65	1017 \rightarrow 642	0.87 \rightarrow 1.0	1.17 \rightarrow 1.04	2	0.92 \rightarrow 0.82	2.71 \rightarrow 1.44	4.91 \rightarrow 3.0	НМД
0.38	9.25 \rightarrow 3.81	1381 \rightarrow 612	0.64 \rightarrow 0.8	1.11 \rightarrow 1.0	2	0.88 \rightarrow 0.79	3.04 \rightarrow 1.24	6.35 \rightarrow 2.47	НМД
0.53	7.5 \rightarrow 6.3	1482 \rightarrow 1156	0.66 \rightarrow 0.71	—	—	—	1.63 \rightarrow 1.6	3.32 \rightarrow 3.49	—
	6.3 \rightarrow 3.65	1156 \rightarrow 725	0.71 \rightarrow 0.98	0.14	—	—	2.4 \rightarrow 1.51	4.74 \rightarrow 3.1	ДГ
0.67	8.6 \rightarrow 3.64	1357 \rightarrow 548	0.69 \rightarrow 0.88	—	—	—	1.8 \rightarrow 1.0	3.5 \rightarrow 1.3	—

Таблица 3

Параметры процесса НМД и дозвукового горения в ДК-500 смеси ВТЭ — подогретый воздух ($T_p \approx 800$ К) при $m_w = 0.21$ и $\phi > 1$

m_w	p_p/p_a	$g\delta, \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$	ϕ	$f, \text{ кГц}$	n	$\langle D \rangle, \text{ км/с}$	p_{c3}/p_a	p_{c30}/p_a	Режим
0	9.38 \rightarrow 7.0	1416 \rightarrow 1110	0.9 \rightarrow 1.04	2.5 \rightarrow 2.31	4	0.99 \rightarrow 0.92	3.64 \rightarrow 2.8	7.05 \rightarrow 5.68	НМД
	[12] 7.0 \rightarrow 4.74	1110 \rightarrow 783	1.04 \rightarrow 1.19	1.25 \rightarrow 1.18	2	1.23 \rightarrow 0.93	2.8 \rightarrow 2	5.68 \rightarrow 3.82	НМД
0.21	7.8 \rightarrow 5	1319 \rightarrow 919	1.24 \rightarrow 1.36	0	0	0	2.6 \rightarrow 1.7	5 \rightarrow 3.3	ДГ
	5 \rightarrow 5.3	919	1.36	0 \rightarrow 1.19	0	0 \rightarrow 0.75	1.7 \rightarrow 1.98	3.3 \rightarrow 3.94	ДГ
	5.3 \rightarrow 4	919 \rightarrow 654	1.36 \rightarrow 1.4	1.19 \rightarrow 1.01	2	0.75 \rightarrow 0.64	1.98 \rightarrow 1.5	3.94 \rightarrow 3	\rightarrow НМД
	4 \rightarrow 3.5	654	1.4	1.24 \rightarrow 0	0	0	1.5 \rightarrow 1	3 \rightarrow 2.5	НМД \rightarrow
	3.5 \rightarrow 3	654 \rightarrow 585	1.4 \rightarrow 1.42	0	0	0	1	2.5 \rightarrow 2.2	ДГ
0.21	9.3 \rightarrow 4	1437 \rightarrow 884	1.42 \rightarrow 1.72	—	—	—	1.9 \rightarrow 13	3.8 \rightarrow 2	—

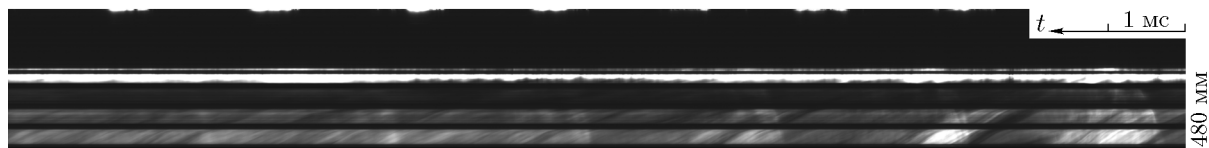


Рис. 6. Фрагмент фоторегистрограммы переходного режима НМД в дозвуковое горение смеси ВТЭ — подогретый воздух при $T_p = 800$ К, $m_w = 0.21$ ($g_\delta = 654$ кг/(с·м²), $\phi = 1.4$, $n = 2 \rightarrow 0$, $\langle D \rangle = 0.64 \rightarrow 0$ км/с, $f = 1.01 \rightarrow 0$ кГц)

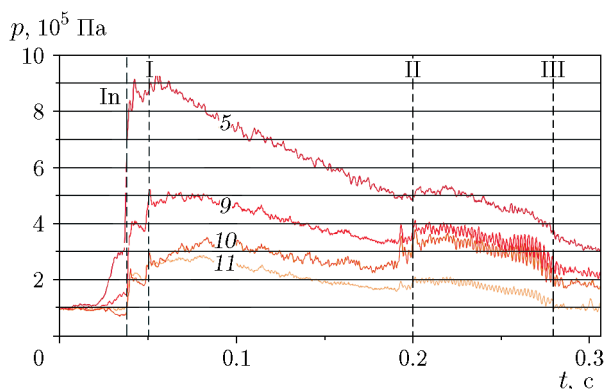


Рис. 7. Изменение давления на входе (ФК) и на выходе из КС во время эксперимента при $m_w = 0.21$ и $\phi > 1$:

режим НМД: $\phi = 1.36 \rightarrow 1.4$, $g_\delta = 919 \rightarrow 654$ кг/(с·м²), $n = 2$, $f = 1.19 \rightarrow 1.01$ кГц; 5 — p_p , 9 — p_{c30} , 10 — p_{c1} , 11 — p_{c3} ; In — иницирование горения в ФК и КС, I–II — дозвуковое горение, II–III — НМД, правее III — дозвуковое горение

$m_w = 0$ и $\phi > 1$, когда устойчиво существовал режим НМД [12].

Затухание НМД при $\phi \approx 1.4$ показано на рис. 6. Через пять столкновений ПДВ режим НМД перешел в дозвуковое горение.

Осциллограмма давлений в КС приведена на рис. 7. Видно, что при переходе горения в режим детонации полное давление на выходе из КС возрастает на 15 %. Детонационный режим влияет и на систему подачи: давление в коллекторе воздуха повышается примерно на 10 %, а в коллекторе горючего на 5 %.

Итак, при огневом подогреве в форкамере воздуха от $T_p = 600$ К до 1 200 К в кольцевой камере сгорания ДК-500 при сужении ее выходного сечения до $K_{ex} = 1.74$ в двухфазной смеси ВТЭ — подогретый воздух впервые реализованы детонационные режимы с двумя и четырьмя встречными ПДВ в диапазоне $\phi = 0.64 \div 1.0$. При $T_p = 800$ К предел существования режимов НМД по массовой доле воды в эмульсии находится в диапазоне $0.38 < m_w < 0.53$. При $m_w = 0 \div 0.38$ реализуются режимы НМД, при

$m_w = 0.53$ — горение.

При $T_p = 800$ К и $m_w = 0.21$ для богатых смесей ($\phi > 1$) возможны режимы НМД в области $\phi \approx 1.4$. По-видимому, при $m_w = 0.21$ с увеличением температуры воздуха выше $T_p = 800$ К пределы по ϕ могут быть увеличены.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

3.1. Влияние температуры подогрева воздуха на детонационный режим

Рассмотрим детонационное сжигание ВТЭ с одинаковой концентрацией воды ($m_w = 0.38$) в бедных по горючему смесях при варьировании температуры нагрева воздуха (см. табл. 1). Во всех опытах с режимами НМД в камере ДК-500 ($K_{ex} = 1.74$) истечение нагретого воздуха из ФК в КС через щель $\delta = 10.5$ мм является докритическим, а на выходе продуктов из КС — сверхкритическим.

Зависимости частоты ПДВ от удельного расхода воздуха g_δ для ряда температур нагретого в ФК воздуха T_p представлены на рис. 8. Видно, что частота сталкивающихся ПДВ при

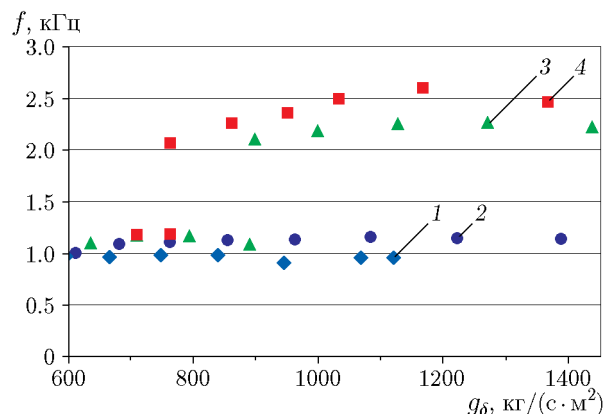


Рис. 8. Частота ПДВ в зависимости от удельного расхода подогретого до разных температур воздуха ($m_w = 0.38$):

1 — $T_p = 600$ К, 2 — 800, 3 — 1 000, 4 — 1 200 К

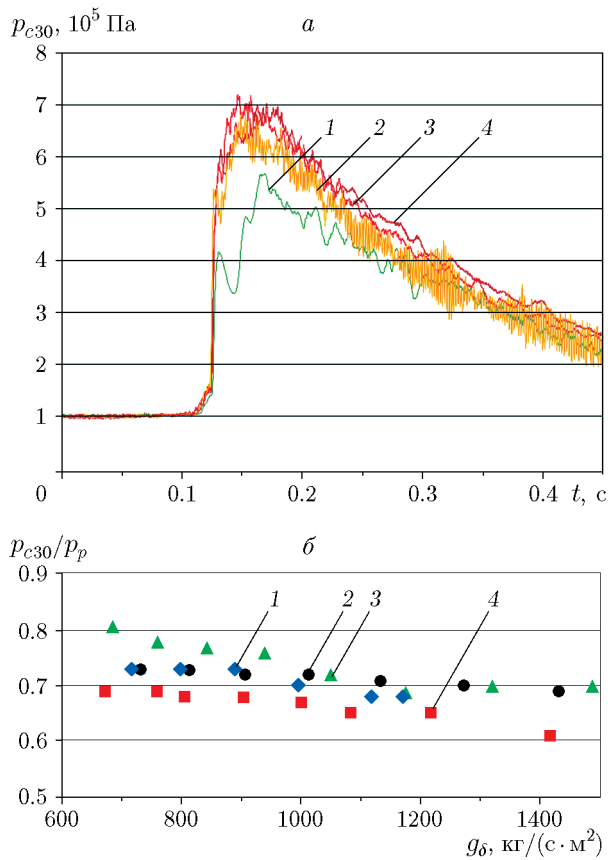


Рис. 9. Полное давление на выходе из КС при НМД (а) и отношение полных давлений на выходе из КС и в ФК при НМД (б):

1 — $T_p = 600$ К, 2 — 800, 3 — 1 000, 4 — 1 200 К

их числе $n = 4$ находится в диапазоне $f = 2.4 \pm 0.2$ кГц, а при $n = 2$ — $f = 1.0 \pm 0.1$ кГц. При одинаковых значениях g_{δ} с повышением температуры T_p частота ПДВ возрастает. Причем при $T_p = 600$ и 800 К зарегистрированы режимы только с двумя ПДВ ($n = 2$), а при $T_p = 1000$ и 1 200 К — с четырьмя ($n = 4$) и двумя ($n = 2$) ПДВ. Пределы по g_{δ} в режимах с четырьмя ПДВ расширяются с увеличением температуры нагрева воздуха. Это значит, что смесь ВТЭ с воздухом при $T_p = 1200$ К более химически активна, поэтому детонировала с большим числом ПДВ. Однако при этой температуре, наряду с ПДВ, в КС интенсифицируется дозвуковое горение.

С повышением температуры T_p растет давление в ФК (см. рис. 1, б) и полное давление p_{c30} на выходе из КС (рис. 9, а), а их отношение изменяется незначительно в пределах $p_{c30}/p_p = 0.7 \pm 0.1$ (рис. 9, б). Причем меньшие значения соответствуют большим расходам горячего воздуха и более высокой его температу-

ре — $T_p = 1200$ К, при которой растут потери полного давления к выходу из КС. При $T_p = 600, 800$ и 1 000 К в области больших расходов отношение указанных давлений стремится к $p_{c30}/p_p \approx 0.7$.

При этих же повышенных температурах воздуха T_p в ФК проводились опыты (холостые пуски), когда в КС вместо ВТЭ с близким расходом подавался воздух [12]. Данные этих опытов использовались далее для расчета силы тяги (F_c) при холостых пусках.

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

Силу тяги при истечении продуктов горения смеси ВТЭ — нагретый воздух (F_h), а также силу тяги (F_c) при холостых пусках определяли, аналогично [15], по измеренным значениям полного p_{c30} и статического p_{c3} давления на выходе из КС.

Зависимости сил тяги F_h и F_c от общего расхода гетерогенной топливно-воздушной смеси G_{Σ} для ряда температур T_p приведены на рис. 10. Видно, что при $T_p = 600, 800$ и 1 000 К силы тяги F_h и F_c с увеличением расхода G_{Σ} возрастают линейно и практически одинаково. Заметное увеличение этих сил происходит при $T_p = 1200$ К.

Делением разности сил тяги F_h и F_c на расход керосина G_f (его массовую составляющую в ВТЭ) и ускорение свободного падения g определяли удельный импульс относительно горючего: $I_{sp,f} = (F_h - F_c)/G_f/g$ (в секундах) (рис. 11). Затемненные символы соответству-

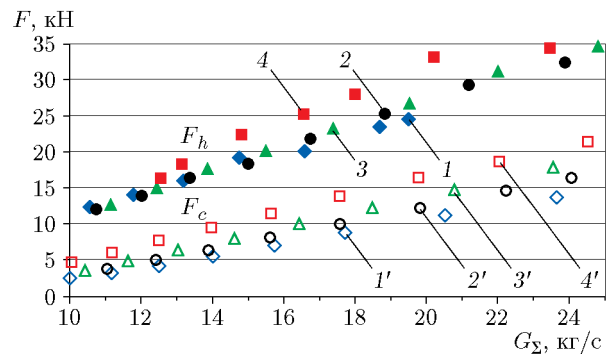


Рис. 10. Зависимости сил тяги F_h и F_c при $m_w = 0.38$ от общего расхода смеси ВТЭ — воздух:

1 — $T_p = 600$ К, 2 — 800, 3 — 1 000, 4 — 1 200 К; холостые пуски [12]: 1' — $T_p = 600$ К, 2' — 800, 3' — 1 000, 4' — 1 200 К

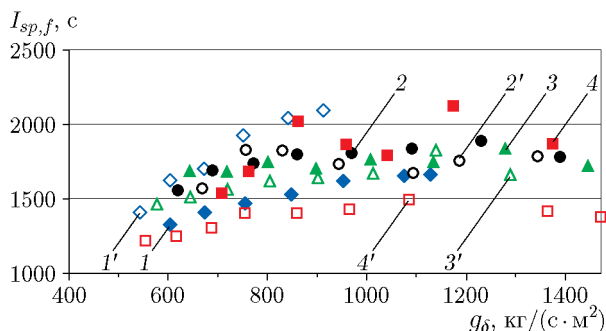


Рис. 11. Зависимость удельного импульса от удельного расхода нагретого до разных температур воздуха через щель:

ВТЭ ($m_w = 0.38$): 1 — $T_p = 600$ К, 2 — 800, 3 — 1000, 4 — 1200 К; керосин ($m_w = 0$) [12]: 1' — $T_p = 600$ К, 2' — 800, 3' — 1000, 4' — 1200 К

ют опытам с детонационным горением ВТЭ, а светлые — детонационному горению чистого керосина ($m_w = 0$) [12].

Видно, что при $m_w = 0.38$ значения удельных импульсов при $T_p = 800$ и 1000 К практически совпадают и находятся в узком диапазоне $I_{sp,f} = 1700 \pm 50$ с (кривые 2 и 3 соответственно). Они расположены внутри области, ограниченной значениями удельных импульсов при $T_p = 600$ и 1200 К. При этом наибольшие удельные импульсы соответствуют $T_p = 1200$ К (кривая 4), а наименьшие — $T_p = 600$ К (кривая 1). Максимальные значения удельного импульса при этих температурах — $I_{sp,f} = 2150$ и 1650 с соответственно. Заметим, что в области $g_{\delta} \leq 900$ кг/(с·м²) происходит местное увеличение удельного импульса при $T_p = 1000$ и 1200 К. Причина — понижение расходов ВТЭ, связанных, как обсуждалось выше, с уменьшением числа ПДВ — $n = 4 \rightarrow 2$ (см. рис. 8).

Все значения удельных импульсов при $m_w = 0.38$ лежат в области между их значениями при температурах $T_p = 600$ и 1200 К для чистого керосина ($m_w = 0$, полые символы, поз. 1'–4'). При этом наблюдается обратная картина: удельные импульсы для чистого керосина больше при более низкой температуре ($T_p = 600$ К), чем при высокой ($T_p = 1200$ К), с максимальными значениями $I_{sp,f} = 2200$ и 1500 с соответственно.

Известно, что с увеличением начальной температуры воздуха T_p растет и температура продуктов горения T_{pr} чистого керосина ($m_w = 0$), причем практически линейно [16]. При $T_{pr} > 2400$ К заметно усиливается

диссоциация продуктов, а при $T_{pr} \approx 2600$ К константа диссоциации кислорода возрастает на порядок. В нашем случае при $T_p = 600$ и 1200 К и $\phi \approx 0.9$ температура продуктов составит $T_{pr} \approx 2300$ и 2600 К соответственно. Поэтому уменьшение $I_{sp,f}$ с ростом T_p связано с увеличением степени диссоциации продуктов горения керосина в воздухе, когда химическая энергия топлива всё в меньшей степени преобразуется в кинетическую энергию. Данных по температуре продуктов горения ВТЭ в горячем воздухе нет. Очевидно, что добавка воды в керосин снижает температуру продуктов детонации и, следовательно, их степень диссоциации. Этот эффект наглядно проявляется при сравнении удельных импульсов для ВТЭ и чистого керосина при температуре нагретого воздуха $T_p = 1200$ К: значения $I_{sp,f}$ для ВТЭ увеличиваются до 1.5 раза в области $g_{\delta} \approx 1200$ кг/(с·м²). Добавка воды в керосин при нагреве воздуха до $T_p = 600$ К снижает температуру горения керосина и диссоциацию его продуктов. Однако при этом уменьшается и степень выгорания керосина, что приводит к уменьшению удельного импульса продуктов. При температурах нагретого воздуха до $T_p = 800$ и 1000 К эффект снижения степени диссоциации продуктов горения ВТЭ остается преобладающим и их удельный импульс возрастает. Таким образом, граничная температура воздуха при $m_w = 0.38$ между положительным влиянием добавки воды к керосину и «гашением» его горения находится между $T_p = 600$ и 800 К. Для других составов ВТЭ она может быть другой, и в данной работе она не определялась.

3.3. Влияние массовой доли воды в ВТЭ на удельный импульс

Зависимости удельного импульса $I_{sp,f}$ от удельного расхода воздуха при разных степенях насыщения ВТЭ водой m_w представлены на рис. 12. Видно, что с увеличением степени от $m_w = 0$ до $m_w = 0.38$ (кривые 1–3) удельный импульс возрастает незначительно — не более чем на 10 %. Указанных шагов по m_w недостаточно, чтобы определить граничное значение m_w для реализации максимального удельного импульса. Оно находится в пределах $m_w = 0.38 \div 0.53$, ближе к значению $m_w = 0.38$ (кривая 3), так как при $m_w = 0.53$ (кривая 4) концентрацию воды в керосине можно считать предельной для существования да-

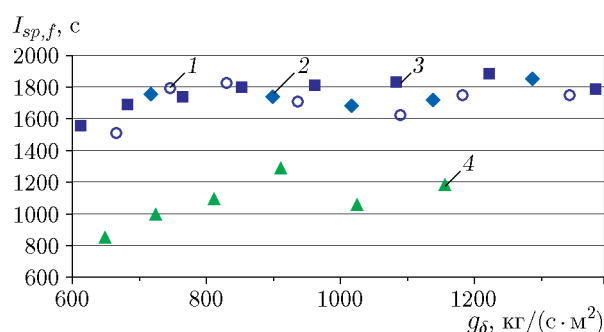


Рис. 12. Зависимость удельного импульса от удельного расхода нагретого воздуха при варьировании степени насыщения ВТЭ водой при $T_p = 800$ К:

1 — $m_w = 0$ [12], 2 — 0.21 (НМД), 3 — 0.38 (НМД), 4 — 0.53 (дозвуковое горение)

же дозвукового горения при температуре воздуха $T_p = 800$ К. Для других значений T_p предел существования НМД по m_w не определялся, однако на основании рассмотренных экспериментов можно предположить, что с увеличением T_p этот предел увеличится, а со снижением T_p — уменьшится относительно $m_w = 0.53$.

Пока нет объяснения отсутствию детонационного горения ВТЭ с $m_w = 0.38$ при $\phi > 1$ и существованию дозвукового горения со слабыми акустическими волнами и резким снижением удельного импульса почти в два раза по сравнению с режимами при $\phi < 1$. При уменьшении содержания воды в ВТЭ возможности существования НМД по верхней границе ϕ увеличиваются и приближаются к значениям при детонации чистого керосина [12] — $\phi < 1.4$. Вблизи предела по детонации ($\phi = 1.36 \div 1.4$) полное давление на выходе из КС повышается на 15 %. Подобный рост давления в КС наблюдался и ранее, в частности в работе [17]. Соответственно, примерно на эту же величину возрастает и удельный импульс. Однако из данного исследования нельзя сделать однозначного вывода о том, что увеличение удельного импульса обусловлено термодинамикой [18]. Возможно, что увеличение полного давления в камере связано с повышением степени выгорания ВТЭ.

На основании проведенных экспериментов можно утверждать, что для увеличения удельного импульса продуктов использование ВТЭ с $m_w = 0.38$ целесообразно при высоких температурах воздуха $T_p \geq 800$ К. Это наглядно показано для двигателей внутреннего сгорания (дизелях) [1–4], в которых при сжатии воздуха

в цилиндре до $p_p = 40 \cdot 10^5$ Па развивается температура $T_p \approx 1100$ К. При этом мощность двигателя, работающего на ВТЭ, становится больше, чем при сгорании чистого керосина. При меньших температурах, например $T_p \approx 600$ К, вода становится ингибитором и снижает степень выгорания керосина. Поэтому использование ВТЭ в детонационных двигателях при этих и более низких температурах нецелесообразно. Существует еще одно преимущество сжигания ВТЭ — снижение вредных продуктов выброса (сажи, оксидов углерода и азота) за счет реакции водяного пара и уменьшения температуры в зоне реакции. Определение химического состава продуктов на выходе из КС — задача дальнейших исследований.

ВЫВОДЫ

В проточной кольцевой камере сгорания ДК-500 при сужении выходного сечения в 1.74 раза впервые реализованы и исследованы режимы непрерывной многофронтной детонации ВТЭ при смешении ее с горячим воздухом, предварительно нагретым огневым способом в форкамере от 600 до 1200 К. Детонационное горение происходит в одной или двух парах сталкивающихся поперечных волн с частотой 1.0 ± 0.1 или 2.4 ± 0.2 кГц соответственно. Повышенная частота соответствует более нагретому воздуху. Нагрев воздуха способствует реализации детонационного сжигания ВТЭ. 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. Установлено, что при одном и том же удельном расходе воздуха на входе в камеру сгорания с повышением температуры воздуха от 600 до 1200 К удельный импульс тяги увеличивается в 1.5 раза вследствие уменьшения степени диссоциации продуктов детонационного горения ВТЭ. Существует нижний предел по температуре воздуха, ниже которого вода в керосине действует как ингибитор и уменьшает степень его выгорания. Для ВТЭ с содержанием воды 38 % этот предел находится в диапазоне $600 \div 800$ К. Поэтому использование ВТЭ ниже этого предела по температуре воздуха нецелесообразно. При удельном расходе воздуха на входе в камеру около $1200 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ максимальное значение удельного импульса с учетом энергии нагретого воздуха до температу-

ры 1 200 К составило 2 150 с, а минимальное — 1 600 с при температуре 600 К. При сжигании чистого керосина обратная ситуация — максимальные значения при низкой температуре 600 К. Использование ВТЭ уменьшает пределы существования непрерывной многофронтной детонации по сравнению с чистым керосином по коэффициенту избытка горючего — они сужаются при насыщении водой керосина. При развитии детонации полное давление на выходе из камеры сгорания повышается на 15 %, что примерно на эту же величину увеличивает и удельный импульс.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

- Иванов В. М. Топливные эмульсии. — М.: Изд-во АН СССР, 1962.
- Khan M. Y., Karim A. Z. A., Hagos Y. F., Aziz A. R. A., Tan I. M. Current trends in water-in-diesel emulsion as a fuel // *Sci. World J.* — 2014. — V. 2014, N 17. — 527472. — DOI: 10.1155/2014/527472.
- Горелик Б. Г. Водотопливная эмульсия — альтернативное топливо XXI века. — Хабаровск: Изд-во ТОГУ, 2019.
- Лебедев О. Н. Некоторые особенности горения капель водотопливных эмульсий в дизелях // *Физика горения и взрыва.* — 1978. — Т. 14, № 2. — С. 142–145.
- Быковский Ф. А., Ведерников Е. Ф., Жолобов Ю. А. Детонационное сжигание в воздухе бурого угля с добавками диоксида титана и воды // *Физика горения и взрыва.* — 2017. — Т. 53, № 4. — С. 94–102. — DOI: 10.15372/FGV20170409. — EDN: ZBNFFF.
- 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. — EDN: VXWGGK.
- Bykovskii 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.
- 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.
- 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. — EDN: VCWKPI.
- 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.
- Meng H., Xiao Q., Feng W., Wu M., Han X., Wang F., Weng C., Zheng Q. Air-breathing rotating detonation fueled by liquid kerosene in cavity-based annular combustor // *Aerospace Sci. Technol.* — 2022. — V. 122. — 107407. — DOI: 10.1016/j.ast.2022.107407.
- Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф. Непрерывная многофронтная детонация смесей керосина с нагретым в форкамере воздухом // *Физика горения и взрыва.* — 2023. — Т. 59, № 5. — С. 103–115. — DOI: 10.15372/FGV2022.9218. — EDN: CIUSJH.
- Быковский Ф. А., Ждан С. А. Непрерывная спиновая детонация. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013.
- Войцеховский Б. В., Митрофанов В. В., Топчийн М. Е. Структура фронта детонации в газах. — Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1963.
- 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. — EDN: FGBMKL.
- Щетинков Е. С. Физика горения газов. — М.: Наука, 1965.
- Фролов С. М., Аксенов В. С., Дубровский А. В., Иванов В. С., Шамшин И. О. Энергоэффективность непрерывно-детонационных камер сгорания // *Физика горения и взрыва.* — 2015. — Т. 51, № 2. — С. 102–117. — EDN: TQUWNT.
- Зельдович Я. Б. К вопросу об энергетическом использовании детонационного горения // *Журн. техн. физики.* — 1940. — Т. 10, № 17. — С. 1453–1461.

Поступила в редакцию 16.01.2023.

После доработки 21.03.2023.

Принята к публикации 05.04.2023.