УДК 536.46

ТЯГОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИДЕАЛЬНОГО ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ДЕТОНАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

В. В. Митрофанов, С. А. Ждан

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

Сформулированы квазистационарная и двумерная нестационарная постановки задачи о рабочем цикле пульсирующего детонационного двигателя. Получена формула для удельного импульса и выполнен расчет тяговых характеристик двигателя. Установлено, что при полетных числах Маха $\mathrm{M} \in [0; 3{,}6]$ и степенях сжатия $p_2/p_1 \in [1; 80]$ тяговые характеристики этого двигателя всегда оказываются выше, чем у прямоточного воздушно-реактивного двигателя и одноконтурного турбореактивного. При повышении степени сжатия преимущество пульсирующего детонационного двигателя постепенно уменьшается.

Ключевые слова: детонация, пульсирующий детонационный двигатель, тяговые характеристики.

ВВЕДЕНИЕ

Для движения в воздушной атмосфере при полетных числах Маха $\mathrm{M} = 0 \div 3$ перспективными являются пульсирующие детонационные двигатели (ПДД). Предлагались различные схемы таких двигателей [1–6]. В наиболее простом варианте ПДД представляется состоящим из следующих блоков: воздухозаборное устройство, которое производит непрерывный забор и сжатие воздуха от внешнего атмосферного давления p_1 до некоторого давления p_2 заторможенного потока; ресивер, в котором воздух, поступающий из воздухозаборного устройства, находится в заторможенном состоянии при давлении p_2; клапанно-распределительная система, которая в заданной временно́й последовательности пропускает воздух из ресивера в детонационные камеры; блок детонационных камер, представляющий собой систему одинаковых цилиндрических труб со сверхзвуковыми соплами на выходе; емкость с горючим и система ввода горючего в детонационные камеры по программе, согласованной с вводом воздуха; система инициирования детонации.

Во всех детонационных камерах циклически повторяется одинаковая последовательность процессов: заполнение сжатым воздухом с добавками горючего и формирование взрывчатой топливовоздушной смеси, детонационный взрыв этой смеси при закрытом впускном клапане, сопровождающийся резким подъемом давления, истечение продуктов взрыва через сопло, дающее реактивный импульс. Фазовый сдвиг процессов в разных детонационных камерах позволяет снижать пульсации реактивной тяги и шумовые эффекты. Сжатие воздуха в воздухозаборнике осуществляется за счет скоростного напора и/или компрессора. С некоторыми уточнениями рассматриваемый ПДД соответствует схемам, описанным в работах [4–6]. Предварительный анализ функционирования ПДД выполнен в [7]. В настоящей работе представлены результаты аналитического и численного исследования тяговых характеристик ПДД в двух постановках задачи о рабочем цикле ПДД.

ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ

Для определения тяговых характеристик ПДД рассмотрим две математические модели рабочего цикла при следующих предположениях. Воздух и продукты детонации считаются идеальным газом с постоянными удельными теплоемкостями и показателем политропы $\gamma = c_p/c_v$. Сжатие воздуха в воздухозаборнике и его перемещение в детонационных камерах, а также истечение (движение) продуктов взрыва осуществляются изоэнтропически, без трения и теплообмена со стенками. КПД компрессора (когда он присутствует в воздухозаборном устройстве) 100 %, компрессор приводится в действие отдельным двигателем, не производящим собственную тягу и потребляющим то же топливо с КПД 100 %. Взрыв топливовоздушной смеси моделируется мгновенным выделени-

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (номер проекта 02-01-00551).

ем энергии Q на единицу массы воздуха в начальном участке камеры длиной $L_0 \leqslant L$, где L — полная длина детонационной камеры.

Квазистационарная модель (модель 1). Рассмотрим квазистационарную постановку задачи при значении безразмерного параметра $\xi = L_0/L = 1$. В воздухозаборном устройстве осуществляется изоэнтропическое сжатие воздуха от начальных значений давления p_1, плотности ρ_1 и скорости звука c_1 до параметров торможения p_2, ρ_2 и c_2:

$$\frac{p_2}{p_1} = \pi, \quad \frac{\rho_2}{\rho_1} = \pi^{1/\gamma}, \quad \frac{c_2^2}{c_1^2} = \pi^{1-1/\gamma}. \qquad (1)$$

Дополнительно предполагалось, что течение в камере и сопле одномерное и делится на три стадии. В начальной стадии $t = 0$ после мгновенного энерговыделения с тепловым эффектом на единицу массы смеси Q давление в детонационной камере также мгновенно выравнивается и принимает значение p_3, соответствующее сохранению энтропии продуктов взрыва и полной внутренней энергии газов в камере:

$$\rho_3 = \rho_2, \quad \frac{p_3}{p_2} = \frac{c_3^2}{c_2^2} = 1 + \gamma(\gamma - 1)\frac{Q}{c_2^2}. \qquad (2)$$

В стадии I $(0 < t \leqslant t_1)$ происходит квазистационарное истечение газов через сопло при скорости звука $c(t)$, плотности $\rho(t)$ и давлении в камере $p(t)$, постепенно снижающемся от p_3 до p_2. При истечении изменение во времени массы газа в камере m будет удовлетворять обыкновенному дифференциальному уравнению:

$$\frac{dm}{dt} = S_c L \frac{d\rho(t)}{dt} = -B\rho(t)c(t)S_{\min}.$$

Здесь S_c — площадь поперечного сечения детонационной камеры, $S_{\min}$ — площадь горла сопла, $B = \left(\dfrac{2}{\gamma + 1}\right)^{0,5(\gamma+1)/(\gamma-1)}$. Интегрируя это уравнение, находим в явном виде зависимости для искомых функций на стадии I:

$$\frac{c(t)}{c_3} = (1 + at)^{-1}, \ \frac{\rho(t)}{\rho_3} = \Big[\frac{c(t)}{c_3}\Big]^{2/(\gamma-1)},$$

$$\frac{p(t)}{p_3} = \Big[\frac{c(t)}{c_3}\Big]^{2\gamma/(\gamma-1)}, \qquad (3)$$

$$\frac{p(t)}{p_4(t)} = \frac{p(t_1)}{p_4(t_1)} = \frac{p_2}{p_1} = \pi,$$

$$t \leqslant t_1 = \frac{1}{a}\Big[\Big(\frac{p_3}{p_2}\Big)^{0,5(1-1/\gamma)} - 1\Big],$$

$$a = \frac{\gamma - 1}{2} B \frac{c_3 S_{\min}}{L S_c},$$

где $p_4(t)$ — давление на выходе из сопла, t_1 — длительность стадии I.

Затем истечение переходит в стационарную стадию II $(t_1 < t \leqslant t_1 + t_2)$, в течение которой оставшиеся продукты выталкиваются из камеры следующей порцией воздуха и топливовоздушной смеси при постоянном давлении p_2 и постоянной скорости движения газов внутри камеры $u_c \ll c_c$:

$$p(t) = p_2, \quad \rho(t) = \rho_3(p_2/p_3)^{1/\gamma}, \qquad (4)$$

$$0 < t - t_1 \leqslant t_2 = \frac{\gamma - 1}{2a}\Big(\frac{p_3}{p_2}\Big)^{0,5(1-1/\gamma)}.$$

Площади горла $S_{\min}$ и выходного сечения сопла S_4 выбираются такими, чтобы давление p_4 на выходе из сопла в стадии II равнялось внешнему атмосферному давлению p_1 и выполнялось неравенство $u_c \ll c_c$:

$$\frac{S_{\min}}{S_c} = \Big(\frac{c_2}{c_3}\Big)^{1/\gamma} \frac{u_c}{B\,c_1} \Big/ \pi^{(\gamma-1)/2\gamma},$$

$$\frac{S_4}{S_{\min}} = B\Big[\frac{(\gamma - 1)\pi^{1+1/\gamma}}{2(\pi^{1-1/\gamma} - 1)}\Big]^{1/2}.$$

В соответствии с законом сохранения количества движения текущий импульс I в каждый момент времени t равен

$$I(t) = S_4[\rho_4(t)u_4^2(t) + p_4(t) - p_1] - Gu_1.$$

Здесь $G = \rho_1 u_1 S_1$ — массовый расход воздуха, u_1 — скорость течения газа на входе, S_1 — площадь входного сечения двигателя. Тогда средний за период $t = t_1 + t_2$ импульс I_s находится из соотношения

$$I_s = \frac{1}{t}\int_0^t I(t)dt, \quad J = \frac{I_s}{G}. \qquad (5)$$

Подставляя зависимости (1)–(4) в соотношение (5) и интегрируя его, определяем тяговые характеристики ПДД из следующей системы алгебраических уравнений:

$$\frac{J}{c_1} = \frac{2}{\gamma+1}\Big(\mathrm{M}_4 + \frac{1}{\gamma \mathrm{M}_4}\Big)\Big[\frac{c_3}{c_2} - \Big(\frac{c_2}{c_3}\Big)^{1/\gamma}\Big] + \\ + \Big(\frac{c_2}{c_3}\Big)^{1/\gamma}\Big(\mathrm{M}_4 - \frac{t_1}{\gamma \mathrm{M}_4\, t_2}\Big) - M_1,$$

$$\mathrm{M}_4^2 = \frac{2}{\gamma-1}(\pi^{1-1/\gamma} - 1) + \frac{u_c^2}{c_4^2},\ c_4^2 = c_3^2\Big(\frac{p_1}{p_3}\Big)^{1-1/\gamma},$$

$$\nu = (t_1+t_2)^{-1}, \quad \frac{F}{S_c p_1} = \frac{\nu J \rho_2 L}{p_1}, \qquad (6)$$

$$\frac{c_1^2 \mathrm{M}_1^2}{2} + \frac{c_1^2}{\gamma-1} + \frac{N}{G} = \frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}\, c_2^2.$$

Здесь $\mathrm{M} = u/c$ — число Маха, N — мощность компрессора, ν — частота циклов работы камеры, J — средний удельный импульс, $F/S_c p_1$ — безразмерная реактивная тяга, отнесенная к единице площади поперечного сечения детонационной камеры. Индекс 1 относится к внешним параметрам воздуха, 2 — к параметрам заторможенного воздуха в ресивере, 3 — к параметрам в камере в начале стадии I, 4 — к параметрам потока на выходе из сопла, c — к параметрам в камере на стадии II.

Двумерная нестационарная модель (модель 2). Для проверки предположений, заложенных в модель 1, задача о тяговых характеристиках идеального ПДД была сформулирована и численно решена в двумерной нестационарной постановке. Рассматривалась детонационная камера, представляющая собой цилиндрическую трубу длиной L и радиусом r_c, со сверхзвуковым соплом на выходе (радиус критического сечения $r_{\min}$). Окружающая среда — воздух с давлением p_1 и температурой T_1. В начальный момент времени $t = 0$ вся труба (или ее часть $0 < x < L_0$) заполнена топливовоздушной смесью с давлением p_2 и температурой T_2. Клапан на входе в трубу ($x = 0$) закрыт. Далее происходит мгновенный взрыв смеси с тепловым эффектом на единицу массы смеси Q и последующим истечением газов через сопло. В момент времени $t = t_1$, когда давление у левого края трубы становится равным давлению в ресивере p_2, клапан открывается и начинается процесс выталкивания оставшихся продуктов взрыва из камеры следующей порцией воздуха и топливовоздушной смеси. В момент времени $t = t_1 + t_2$ граница раздела свежей смеси и продуктов взрыва достигает координаты $x = L$, клапан закрывается и в цилиндрической трубе (или ее части $0 < x < L_0$) снова происходит мгновенный взрыв смеси. Далее циклограмма процесса повторяется. Требовалось определить динамику процесса истечения и реактивный импульс ПДД за период $\Delta t = t_1 + t_2$. Поведение газа в камере описывалось нестационарными уравнениями газовой динамики:

$$(\rho r)_t + (\rho u r)_x + (\rho v r)_r = 0,$$

$$(\rho u r)_t + [(\rho u^2 + p)r]_x + (\rho u v r)_r = 0,$$

$$(\rho v r)_t + (\rho u v r)_x + [(\rho v^2 + p)r]_r = p,$$

$$(E r)_t + [(E + p)u r]_x + [(E + p)v r]_r = 0,$$

где ρ — плотность, p — давление, u и v — компоненты вектора скорости, $E = \rho[e + (u^2 + v^2)/2]$, $e = p/(\gamma - 1)\rho$. Поведение газа вне камеры рассчитывалось в ограниченной области, объем которой приблизительно равен 10^3 объема камеры. Причем на внешней боковой границе расчетной области, т. е. для $r = R$ ($R \approx 10 \div 15 r_c$), параметры газа принимались равными параметрам невозмущенной атмосферы. Все переменные обезразмеривались делением на начальные параметры соответствующей размерности: p_1, ρ_1, L, $\sqrt{p_1/\rho_1}$, $L/\sqrt{p_1/\rho_1}$. Сформулированная задача о функционировании ПДД характеризуется семью безразмерными критериями подобия:

$$\pi = p_2/p_1, \quad \theta = T_2/T_1, \quad \xi = L_0/L,$$

$$q = Q/c_1^2, \quad \gamma, \quad \delta = r_{\min}/r_c, \quad r_c/L,$$

определяемыми по исходным параметрам торможения, характеристикам топливовоздушной смеси и геометрии камеры. Для корректности сравнения решения нестационарной задачи с квазистационарным приближением числовые значения первых шести критериев брали такими же, как в расчетах по модели 1. Значение параметра $r_c/L = 1/12$ фиксировали.

Безразмерные удельный импульс и тяга идеальных реактивных двигателей

p_2/p_1	p_3/p_1	M_4	ν, Гц	J/c_1 при $\mathrm{M}_1 \ll 1$		J/c_1 при $\mathrm{M}_1 = \mathrm{M}_4$		$F/S_c p_1$ (ПДД)	
				ПДД	ТРД	ПДД	ПВРД	$\mathrm{M}_1 \ll 1$	$\mathrm{M}_1 = \mathrm{M}_4$
2	19,2	1,05	42 (40)	3,87 (3,68)	2,80	2,82	1,76	1,24 (0,74)	0,905
3	26	1,36	43 (43,5)	4,20 (4,03)	3,46	2,84	2,10	1,85 (1,17)	1,25
4	32,2	1,56	43,6 (44)	4,44 (4,29)	3,83	2,88	2,27	2,43 (1,56)	1,58
6	43,8	1,83	44,4 (46)	4,75 (4,61)	4,29	2,92	2,46	3,54 (2,33)	2,18
10	64,4	2,16	46 (48)	5,11 (4,98)	4,77	2,95	2,61	5,72 (3,80)	3,30
20	109	2,60	48 (52)	5,55 (5,48)	5,32	2,95	2,72	10,66 (7,33)	5,66
40	186	3,06	50 (55)	5,97 (6,03)	5,81	2,91	2,75	19,5 (14,1)	9,50
80	320	3,54	52 (59)	6,38 (6,67)	6,27	2,84	2,73	35,9 (27,6)	16,0

Примечание. Цифры в скобках — расчет по модели 2.

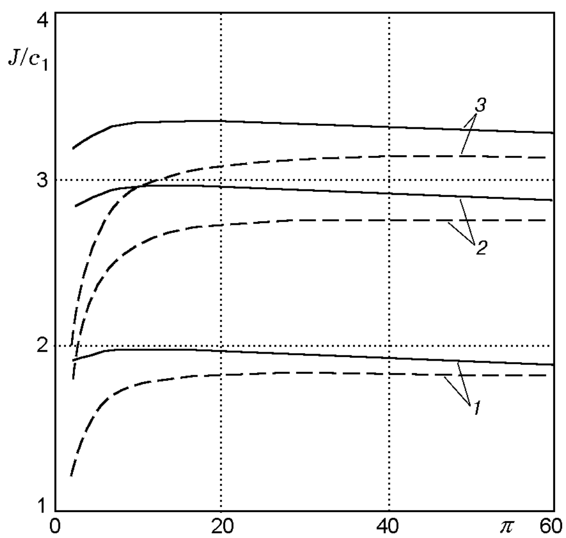

Рис. 1. Зависимости безразмерного удельного импульса ПДД (сплошные линии) и ПВРД (штриховые) от степени сжатия:

Q, МДж/кг: *1* — 1, *2* — 1,6875, *3* — 2

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Модель 1. В расчетах принимали $\gamma = 1{,}4$, $c_1 = 300$ м/с, $Q/c_1^2 = 18{,}75$, $u_c = c_1/3$. Степень сжатия π задавалась и варьировалась. Полетное число Маха менялось от нуля до значения $\mathrm{M}_1 = \mathrm{M}_4$, соответствующего сжатию воздуха до давления p_2 в идеальном воздухозаборнике прямоточного воздушно-реактивного двигателя (ПВРД) без компрессора. Некоторые результаты расчетов по формулам (6) представлены в таблице. Из анализа зависимостей удельного импульса J/c_1 ПДД ($\mathrm{M}_1 = \mathrm{M}_4$) от степени сжатия π при фиксированных значениях энергии Q (рис. 1) следует, что значения J/c_1 изменяются немонотонно с ростом π. В диапазоне $10 < \pi < 20$ удельный импульс ПДД достигает максимума. Полученные тяговые характеристики ПДД сравниваются с характеристиками ПВРД [8]

$$J/c_1 = \mathrm{M}_4\sqrt{1 + (\gamma - 1)Q/c_1^2/\pi^{1-1/\gamma}} - \mathrm{M}_1,$$

которые рассчитаны при аналогичных предположениях и тех же значениях π. Принималось, что горение в ПВРД происходит без потери полного давления. Как показали результаты расчетов при $\mathrm{M}_1 \in [0; 3{,}6]$ и $\pi \in [1; 80]$, тяговые характеристики ПДД всегда оказываются выше, чем у ПВРД и одноконтурного турбореактивного двигателя (ТРД). По удельному импульсу идеальный ПДД уступает лишь идеальному двухконтурному ТРД при высоких степенях двухконтурности, однако он превосходит последний по лобовой тяге (последний столбец таблицы). Вместе с тем, при повышении степени сжатия преимущество ПДД постепенно уменьшается.

Модель 2. При численном решении двумерной нестационарной задачи получены распределения газодинамических параметров в камере в различные моменты времени t, а также расчетные зависимости от времени давления $p(t)$ на входе в трубу ($x = 0$), потока массы $G(t) = \int\limits_S \rho u ds$ и импульса $I(t) = \int\limits_S (p + \rho u^2 - p_1) ds$ в выходном сечении сопла.

Некоторые результаты представлены в таблице. Типичные зависимости давления за

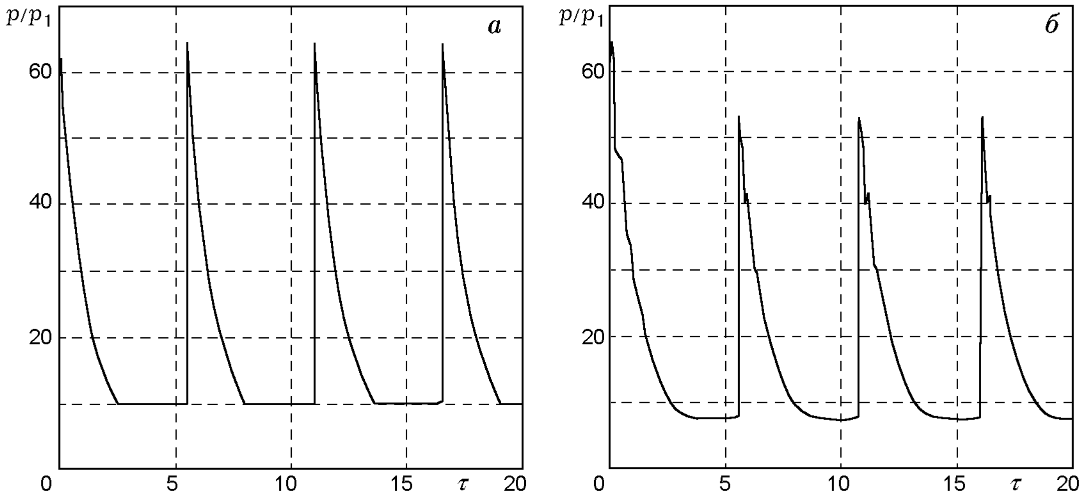

Рис. 2. Зависимость безразмерного давления на входе в детонационную камеру от безразмерного времени:

$\pi = 10$, $\xi = 1$, $\delta = 0{,}46$; *а* — модель 1, *б* — модель 2

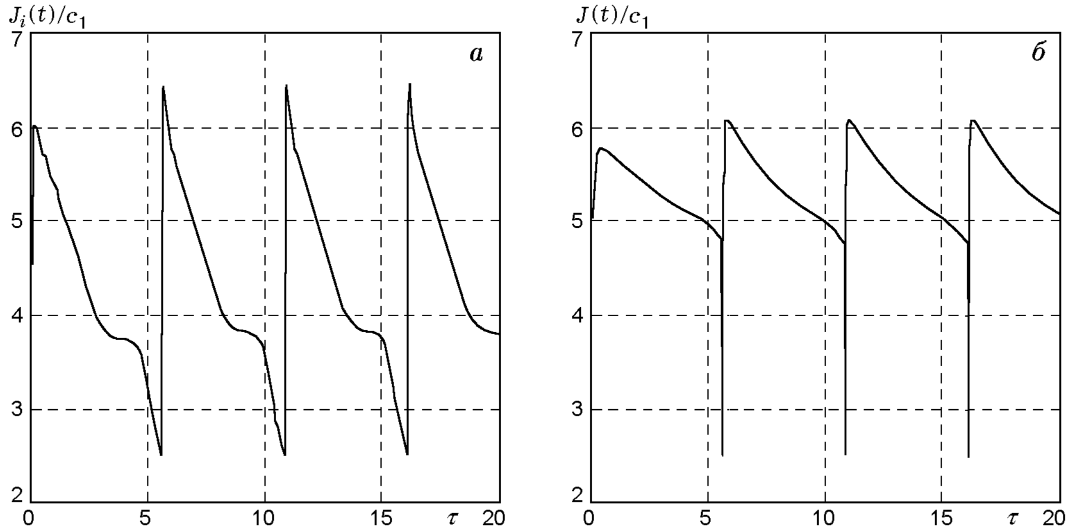

Рис. 3. Зависимости мгновенного удельного импульса (*а*) и среднего удельного импульса (*б*) в выходном сечении сопла от безразмерного времени ($\pi = 10$, $\xi = 1$, $\delta = 0{,}46$)

первые три периода пульсаций $P = p/p_1$ на входе в детонационную камеру от безразмерного времени $\tau = t\sqrt{p_1/\rho_1}/L$ приведены на рис. 2,*б*, а динамика мгновенного удельного импульса $J_i(t) = I(t)/G(t)$ и среднего удельного импульса $J(t) = \int\limits_0^t I(t)dt/\int\limits_0^t G(t)dt$ в выходном сечении сопла ПДД приведена на рис. 3. Установлено, что после первой «нестандартной» пульсации с периодом Δt_1 решение двумерной нестационарной задачи выходит на периодический режим с постоянным периодом $\Delta t < \Delta t_1$ и удельным импульсом $J < J_1$. Причем решение задачи для первого периода соответствует режиму одиночных выстрелов в неподвижную окружающую среду с давлением p_1 и температурой T_1 [9, 10]. Заметим, что нестационарность процесса функционирования ПДД приводит к существенным различиям мгновенных и средних тяговых характеристик ПДД в течение каждого периода пульсаций. Согласно расчетным данным, представленным на рис. 3, за один период мгновенный

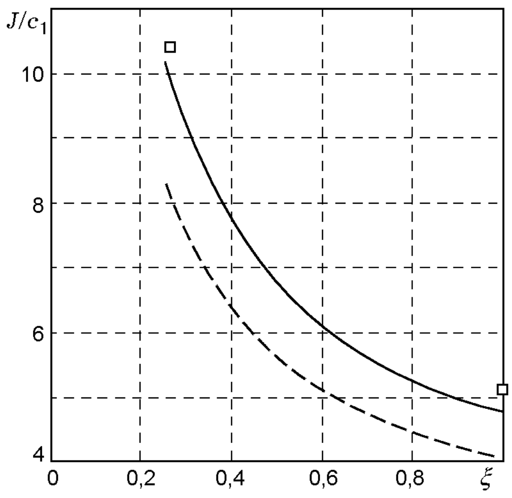

Рис. 4. Зависимость безразмерного удельного импульса для ПДД от степени заполнения камеры топливовоздушной смесью при $\pi = 10$:

значки — модель 1, сплошная линия — модель 2, $\delta = 0{,}46$, штриховая — модель 2, $\delta = 1$

удельный импульс $J_i(t)$ меняется в 2,6 раза, а средний удельный импульс $J(t)$ только на 30 %. Расчеты по модели 2 дают (см. таблицу) снижение удельного импульса (на единицу массы топливовоздушной смеси) по сравнению с моделью 1 не более чем на 5 % за счет нестационарности и неоднородности течения. По-видимому, эти потери можно уменьшить за счет оптимизации сопла. Снижение тяги более значительно, до 40 %. Оно вызвано уменьшением давления, плотности и, следовательно, массы газов, заполняющих камеру в каждом цикле, при сохранении расчетной частоты взрывов. Уменьшение среднего давления в заполненной камере подтверждается сравнением зависимостей $p(t)$ (см. рис. 2), полученных в двух описанных постановках задачи для одинаковых исходных данных.

Расчеты функционирования ПДД показали, что, аналогично режиму одиночных выстрелов [9], при уменьшении степени заполнения камеры топливовоздушной смесью (уменьшение параметра ξ) удельный импульс ПДД растет (рис. 4), а тяга и частота циклов падают. При $\xi \in (1/4, 1/3)$, $\pi \in (4, 40)$ и $\mathrm{M}_1 \ll 1$ получены значения среднего за период удельного импульса $J \approx 3\,000$ м/с, что соответствует значениям удельного расхода углеводородного топлива (пропан) — $\approx 0{,}12$ (кг/ч)/Н. Заметим, что в отсутствие сопла ($S_{\min} = S_c$) нестационарный расчет, проведенный при степени сжатия $\pi = 10$, дает снижение удельного импульса J/c_1 (штриховая кривая на рис. 4) на 18 %. Это означает, что непрофилированная детонационная камера в виде цилиндрической трубы не оптимальна с точки зрения получения наибольшего удельного импульса в ПДД.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расчетным путем по двум моделям установлено, что тяговые характеристики идеализированного ПДД при $\mathrm{M} \in [0; 3{,}6]$ и $p_2/p_1 \in [1; 80]$ всегда выше, чем у идеализированных ПВРД и одноконтурного ТРД. Применение непрофилированных детонационных камер сгорания в ПДД приводит к уменьшению удельного импульса. Сравнение результатов расчетов по модели 1 и 2 позволяет утверждать, что алгебраические формулы квазистационарной модели дают хорошую оценку (в пределах 5 %) значений удельного импульса для ПДД. Поэтому для инженерных расчетов тяговых характеристик идеального ПДД можно пользоваться формулами (6), обходясь без трудоемких двумерных нестационарных расчетов. Привлечение модели 2 целесообразно на завершающей стадии анализа эффективности функционирования ПДД для уточнения его тяговых характеристик в окрестности области оптимальных параметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Frolov S. M., Basevich V. Ya., Belyaev A. A., and Neuhaus M. G.** Application of fuel blends for controlling detonability in pulsed detonation engines // Gaseous and Heterogenous Detonations / G. Roy, S. Frolov, K. Kailasanath, N. Smirnov (Eds). Moscow: ENAS Publishers, 1999. P. 313–330.
2. **Desbordes D.** Pulsed detonation propulsion: key issues // Control of Detonation Processes / G. Roy, S. Frolov, D. Netzer, A. Borisov (Eds). Moscow: Elex-KM Publishers, 2000. P. 166–171.
3. **Furlong E. R., Leyva I. A., and Sanderson S. R.** MEMS-based pulse detonation engine for small scale propulsion applications // Ibid. P. 219–221.
4. **Schauer F., Stutrud J., and Bradley R.** Detonation initiation studies and performance results for pulsed detonation engine applications // AIAA Paper N 2001–1129. 2001.
5. **Теория** и проектирование газотурбинных и комбинированных установок. / Ю. С. Елисеев, Э. А. Манушин, В. Е. Михальцев и др. 2-е

изд. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. Раздел 2.

6. **Ремеев Н. Х., Власенко В. В., Хакимов Р. А., Иванов В. В.** Состояние и проблемы разработки технологии детонационного пульсирующего воздушно-реактивного двигателя // Хим. физика. 2001. Т. 20, № 7. С. 119–129.
7. **Mitrofanov V. V., Zhdan S. A.** Calculation of thrust performance of an ideal pulse detonation engine // Advances in Confined Detonations / G. D. Roy, S. M. Frolov, R. J. Santoro, S. A. Tsyganov (Eds). Moscow: TORUS PRESS Ltd, 2002. P. 199–206.
8. **Зуев В. С., Макарон В. С.** Теория прямоточных и ракетно-прямоточных двигателей. М.: Машиностроение, 1971.
9. **Ждан С. А., Митрофанов В. В., Сычев А. И.** Величина реактивного импульса от взрыва газовой смеси в полуограниченном пространстве // Физика горения и взрыва. 1994. Т. 30, № 5. С. 90–97.
10. **Zitoun R., Gamezo V., Guerroud C., Desbordes D.** Experimental study of propulsive efficiency of pulsed detonation // Proc. of the 21st Intern. Symp. on Shock Waves / A. Howling (Ed.). Great Keppel, Australia, 1997. P. 421–425.

Поступила в редакцию 31/X 2003 г.