



GLOBAL JOURNAL OF SCIENCE FRONTIER RESEARCH: A
PHYSICS AND SPACE SCIENCE
Volume 14 Issue 4 Version 1.0 Year 2014
Type : Double Blind Peer Reviewed International Research Journal
Publisher: Global Journals Inc. (USA)
Online ISSN: 2249-4626 & Print ISSN: 0975-5896

Increase of Pulse at Interaction of Gas Masses in the Pulsejet Engine Exhaust unit

By V.I. Bogdanov & O.S. Borovkova

Abstract- On the basis of the experimental studies of a pulsejet engine and performance analysis of other engines of the same type, the increase of the pulse at interaction of the spent gas masses within the exhaust unit is shown. This effect has been substantiated by the experiments in vacuum. Correlations have been obtained to determine propulsion characteristics of a pulsejet engine in flight conditions; the said correlations take into account gas mass addition. Fields of this effect application are defined.

Keywords: *pulsejet engine, added mass, pulse, exhaust unit, thrust efficiency, shock wave, thrust augmenting ejector, vacuum.*

GJSFR-A Classification : FOR Code: 029999



Strictly as per the compliance and regulations of :



RESEARCH | DIVERSITY | ETHICS

Increase of Pulse at Interaction of Gas Masses in the Pulsejet Engine Exhaust unit

V.I. Bogdanov^α & O.S. Borovkova^σ

Abstract- On the basis of the experimental studies of a pulsejet engine and performance analysis of other engines of the same type, the increase of the pulse at interaction of the spent gas masses within the exhaust unit is shown. This effect has been substantiated by the experiments in vacuum. Correlations have been obtained to determine propulsion characteristics of a pulsejet engine in flight conditions; the said correlations take into account gas mass addition. Fields of this effect application are defined.

Keywords: pulsejet engine, added mass, pulse, exhaust unit, thrust efficiency, shock wave, thrust augmenting ejector, vacuum.

В настоящее время к использованию пульсирующего, с детонационным сгоранием рабочего процесса в энергодвигательных установках проявляется повышенный интерес, в основном из-за возможности повысить их термодинамическую эффективность и упростить конструкцию. Однако пульсирующий рабочий процесс интересен не только высокой термодинамической эффективностью, но и, как показывают последние исследования, открывает новые возможности для повышения тягового импульса за счет взаимодействия масс.

В ОАО «НПО «Сатурн» были проведены испытания экспериментального пульсирующего воздушно-реактивного двигателя (ПуВРД), выполненного на базе высокочастотной золотниковой камеры сгорания постоянного объема (КС $V = \text{const}$) нового типа (рис.1) с эжекторным усилителем тяги (ЭУТ) и без него [1,2,3]. Результаты измерений тяги экспериментального ПуВРД без ЭУТ и расчетов её (по внутривдвигательным параметрам) при допущении квазистационарности процесса истечения показали, что измеренная тяга R в ~ 2 раза (в зависимости от частоты вращения золотника n) превысила ее расчетное значение (рис.2). Это можно объяснить тем, что ПуВРД с золотниковой КС $V = \text{const}$ имеет скважность рабочих пульсаций $\approx 75\%$ и в перерывах между подачами струй газа пространство за соплом

заполняется воздухом из окружающей среды (атмосферы), который при истечении газа становится присоединенной массой, повышающей тягу двигателя. Это подтверждает известное расчетно-теоретическое исследование единичного цикла (одномерного разлета продуктов детонации - газа) [4], которое показало возможность увеличения импульса в атмосфере в 3 раза по сравнению с вакуумом. Там же показано, что при взаимодействии газа с атмосферой происходит колебательный процесс, в определенные моменты которого газ движется обратно к источнику. Этот газ может стать присоединенной массой для следующего цикла. При скважности рабочих пульсаций, близкой к нулю, возможно использование части цикловой массы отработанной струи газа (её «хвоста», имеющего меньшую скорость, чем фронт) в качестве присоединенной массы (рис.3). На базе полученных результатов исследований ПуВРД без ЭУТ был разработан двигатель [5], обеспечивающий высокий уровень лобовой тяги.

Результаты испытаний ПуВРД с ЭУТ представлены на рис.4,5,6 в виде зависимостей измеренных усилий на ЭУТ, динамического напора и пульсаций давления на выходе из эжекторного канала от частоты вращения золотника.

Представляет интерес изменение параметров в диапазоне частот вращения золотника n от 12000 до 13000 об/мин. При изменении n на 8,3 % усилие на ЭУТ $R_{э.эксп}$ увеличилось на 41 %. При этом резко изменилось поле скоростей на выходе из ЭУТ – произошло уменьшение скорости потока в пристеночной области канала. Для объяснения явления была выполнена расчетная оценка изменения тяги на ЭУТ $R_{э.расч}$ по параметрам потока на его выходе и выполнен анализ экспериментальных и расчетных результатов [3].

Таблица 1

Тяга ЭУТ, Н	n, об/мин	
	12 000	13 000
$R_{э.расч}$	10,18	10,23
$R_{э.эксп}$	12,14	17,15

Авторах α : Богданов Василий Иванович – эксперт ОАО «НПО «Сатурн».

Авторах σ : Боровкова Ольга Сергеевна – инженер-конструктор 3/к ОАО «НПО «Сатурн».

По расчетной оценке усилие на эжекторном канале значительно меньше измеренного, при увеличении n с 12000 об/мин до 13000 об/мин оно должно увеличиться всего на 0,5 %. Однако измеренное усилие при этом возросло на 41 % (табл.1). Противоречие между расчетными и экспериментальными значениями усилий, особенно при переходе с $n = 12000$ об/мин на $n = 13000$ об/мин, увяжем с резким изменением поля скоростей в этом диапазоне частот вращения золотника.

Резкое уменьшение скорости потока в пристеночной области эжекторного канала можно объяснить его отрывом потока в диффузорной части канала. Известно [6], что отрыв пограничного слоя всегда связан с образованием вихрей в результате взаимодействия прямого и обратного течений, что может быть в колебательном процессе. В этом процессе и может происходить присоединение массы, повышающее тягу [1], т.е. одна и та же масса воздуха может создавать тягу сначала как активная, а затем как присоединенная. При этом происходит преобразование кинетической энергии (динамического напора) в импульс. Этим и объясняется противоречие между измеренной тягой и результатом расчетной оценки ее по динамическому напору. Можно предположить, что на $n = 12000$ об/мин имеет место умеренное присоединение массы газа без отрыва потока, а на $n = 13000$ об/мин – более интенсивное, с его отрывом, возможно, в резонансном колебательном процессе уже с неоднократным присоединением одной и той же массы (назовём это - присоединением отработанной или собственной массы газа).

Для подтверждения этого, а также для исключения возможного присоединения внешней массы, на выходе эжекторного канала (на расстоянии 10...20 мм) устанавливался цилиндрический экран. Испытания показали [3], что динамика протекания усилия на эжекторном канале не изменилась, значения усилий с экраном и без него мало отличались для одних и тех же частот пульсаций. Характерным является и то, что динамика протекания амплитуды пульсаций ΔP (рис.6), измеренных на выходе эжекторного канала датчиком ЛХ-610 на $n > 12000$ об/мин такая же, как у усилия, измеренного на эжекторном канале.

Если в пульсирующей газовой струе есть взаимодействие масс, то будут и потери на удар. При этом чем выше упругость газа, тем меньше кинетической энергии при ударе преобразуется во внутреннюю и больше в импульс.

Такое взаимодействие отработанных масс газа может быть и в традиционных пульсирующих ВРД. Был выполнен анализ газодинамических, тяговых характеристик, а также геометрических параметров известных пульсирующих ВРД [7]. Здесь характерно сильное влияние отношения длины L двигателя к его диаметру d на удельный расход топлива. При увеличении данного отношения, и соответственно объёма выходного устройства двигателя, растёт присоединённая масса газа, что приводит к увеличению импульса и снижению удельного расхода топлива $C_{уд}$ (рис.7). При этом максимальное давление сгорания изменяется незначительно. На рис. 8 показана схема ПуВРД SNECMA 3340 «Escopette» с увеличенным L/d с удельным расходом топлива, близком к уровню, соответствующим малоразмерным ТРД. Результаты анализа соответствуют полученным ранее в ОАО «НПО «Сатурн» результатам расчетных и экспериментальных исследований пульсирующего рабочего процесса в реактивных двигателях.

Для проверки эффекта увеличения импульса за счет взаимодействия отработанных масс газа в условиях космоса была создана экспериментальная установка (рис. 9) с привязкой к вакуумной камере ВК-25 ОАО «ВПК «НПО Машиностроения», обеспечивающей давление 0,001 МПа (технический вакуум) [8].

Отсутствие внешней среды должно было окончательно определить возможность увеличения удельного импульса реактивного двигателя за счет взаимодействия отработанных масс газа. Для измерения тяги, учитывая опыт работы с пульсирующими установками, был применен надёжный метод с использованием баллистического маятника. Тяга определялась величиной отклонения установки с помощью датчика угловых перемещений. Установка представляет собой пульсирующий реактивный двигатель с приводным от электродвигателя золотником и выходным устройством регулируемой длины. На вход в двигатель от баллонов подавался воздух, золотник сменный. Один выполнен с тремя рабочими полостями, второй - с четырьмя. Параметры рабочих пульсаций (частота, скважность) определялись типом золотника и частотой его вращения.

На рис.10 представлен один из результатов испытаний в вакууме в виде зависимости тяги R , расхода воздуха G_v и удельной тяги $R_{уд}$ от частоты вращения золотника n , конфигурации двигателя и давлений перед золотником и в вакуумной камере.

Максимальные значения $R_{уд}$, полученные для каждой конфигурации двигателя (тип золотника, длина выходного устройства) в зависимости от степени понижения давления в выходном устройстве отражены на рис. 11. На этом же рисунке приведены расчетные зависимости идеальной удельной тяги для полного расширения при пульсирующем (нестационарном) истечении. Для нестационарного истечения τ_c равно его начальному значению.

Расчет идеальной тяги для пульсирующего истечения выполнялся методом численного интегрирования процесса квазистационарного адиабатического расширения.

По результатам испытаний в вакууме эффект увеличения удельной тяги за счет присоединения отработанной массы газа (при взаимодействии цикловых масс) подтверждается:

- превышением экспериментальных значений удельной тяги над расчетной квазистационарной; на малых τ_c , где потери, особенно на удар, малы, превышение может составить более 100%;
- наличием пиков на экспериментальной кривой зависимости удельной тяги от частоты пульсации, свойственных резонансу; резонанс здесь возможен при передаче энергии посредством взаимодействия цикловых масс воздуха с относительно малыми потерями на удар (так называемым малым затуханием, свойственным резонансу);

Выполненные предварительные расчётные исследования с учётом результатов экспериментальных исследований характеристик ПуВРД показали возможность повышения импульса за счёт увеличения объёма выходного устройства при конусном исполнении (рис.9). При этом для $\tau_c = 100$ необходимо, чтобы объём выходного устройства был примерно в 100 раз больше объёма рабочей полости золотника, что обеспечит взаимодействие больших масс воздуха. Поэтому целесообразно продолжить исследования с учётом этой доработки. При испытаниях изменение длины выходного устройства следует производить последовательной обрезкой его концевой части.

Расчётно-теоретическим исследованием, при корректных допущениях, получены соотношения для определения тяговых характеристик с учётом присоединения отработанной (собственной) массы газа в условиях пульсирующего рабочего процесса для ВРД [9].

Тяга для пульсирующего ВРД с присоединением собственной массы газа по аналогии с известным эжекторным усилителем тяги:

$$P = G_b \cdot C_c \cdot \sqrt{(\mu + 1) \cdot \eta} - G_b \cdot V_{II},$$

где: - $\mu = \frac{G_{пр}}{G_b}$ - коэффициент присоединения

массы определяется отношением присоединённого расхода газа $G_{пр}$ к расходу воздуха G_b ;

- η - КПД процесса присоединения массы, а удельная тяга определится соотношением:

$$R_{уд} \approx C_c \cdot \sqrt{(\mu + 1) \cdot \eta} - V_{II},$$

Из анализа полученных соотношений следует, что скорость истечения газа не может определять удельную тягу как в обычном ВРД. Для её определения необходимо использовать известное отношение измеренной тяги к расходу воздуха через двигатель. А скорость полёта может быть больше скорости истечения, при этом характер протекания полётного КПД будет таким же как у ракетного двигателя, с оптимумом $\eta_{п. max} = 1,0$ (рис.12).

Сложность протекания нестационарных процессов в пульсирующем реактивном двигателе требует для определения его тяговых характеристик применения современных численных методов с последующим экспериментальным подтверждением.

Наибольший эффект от взаимодействия цикловых масс в пульсирующем рабочем процессе может быть получен в реактивных двигателях, которые при стационарном истечении газа в полетных условиях имели бы низкий тяговый КПД:

- двигатели первых ступеней ракет-носителей;
- двигатели ориентации космических аппаратов;
- двигатели торможения;
- подъемные двигатели для самолетов вертикального взлета и посадки.

Интересным представляется реализация управления величиной присоединения массы, например изменением параметров рабочих пульсаций, в многорежимных реактивных двигателях для поддержания тягового КПД на высоком уровне во всём диапазоне скоростей полёта. Т.е. на малых скоростях полёта присоединение массы максимально, по мере разгона летательного аппарата оно уменьшается.

Библиографический список

1. Богданов В.И. Взаимодействие масс в рабочем процессе пульсирующих реактивных двигателей как средство повышения их тяговой эффективности // ИФЖ. 2006. Т. 79. № 3. С. 85-90.
2. V.I.Bogdanov. Pulse Increase at Mass Interaction in an Energy Carrier. American Journal of Modern Physics. Vol.2, №4, 2013, pp.195 -201.
3. Богданов В.И., Буракова Л.И. Оценка эффектов взаимодействия масс в пульсирующих реактивных двигателях по результатам экспериментальных исследований. Вестник РГАТА им. П.А.Соловьёва. Рыбинск. 2011. №3. С.90-95.
4. Баум Ф.А., Орленко Л.П., Станюкович К.П., Шехтер Б.И. Физика взрыва. М.: Наука, 1975.
5. Богданов В.И., Дормидонтов А.К., Пьянков К.С. и др. Повышение лобовой тяги пульсирующего ВРД с многополостной камерой сгорания постоянного объёма// Вестник машиностроения. 2012. №7 С.35 – 39.
6. Сергель О.С. Прикладная гидрогазодинамика. М.: Машиностроение, 1981.-374с.
7. Развитие бесклапанных ПуВРД. Р. Маршал, П. Серванти – Bull. Assoc. maritime and airborne. 1963. №63. С.611-630.
8. Богданов В.И., Реш Г.Ф., Шишурин А.В. Предварительные результаты экспериментальных исследований эффекта увеличения импульса пульсирующего реактивного двигателя в вакууме за счёт присоединения собственной массы газа, перспективы его использования. Вестник РГАТУ им. П.А. Соловьёва. Рыбинск. 2013. №1. С.23-30.
9. Богданов В.И., Боровкова О.С. Некоторые особенности определения тяговых характеристик пульсирующих реактивных двигателей. Вестник РГАТУ им. П.А. Соловьёва. Рыбинск. 2013. №2. С.18-24.

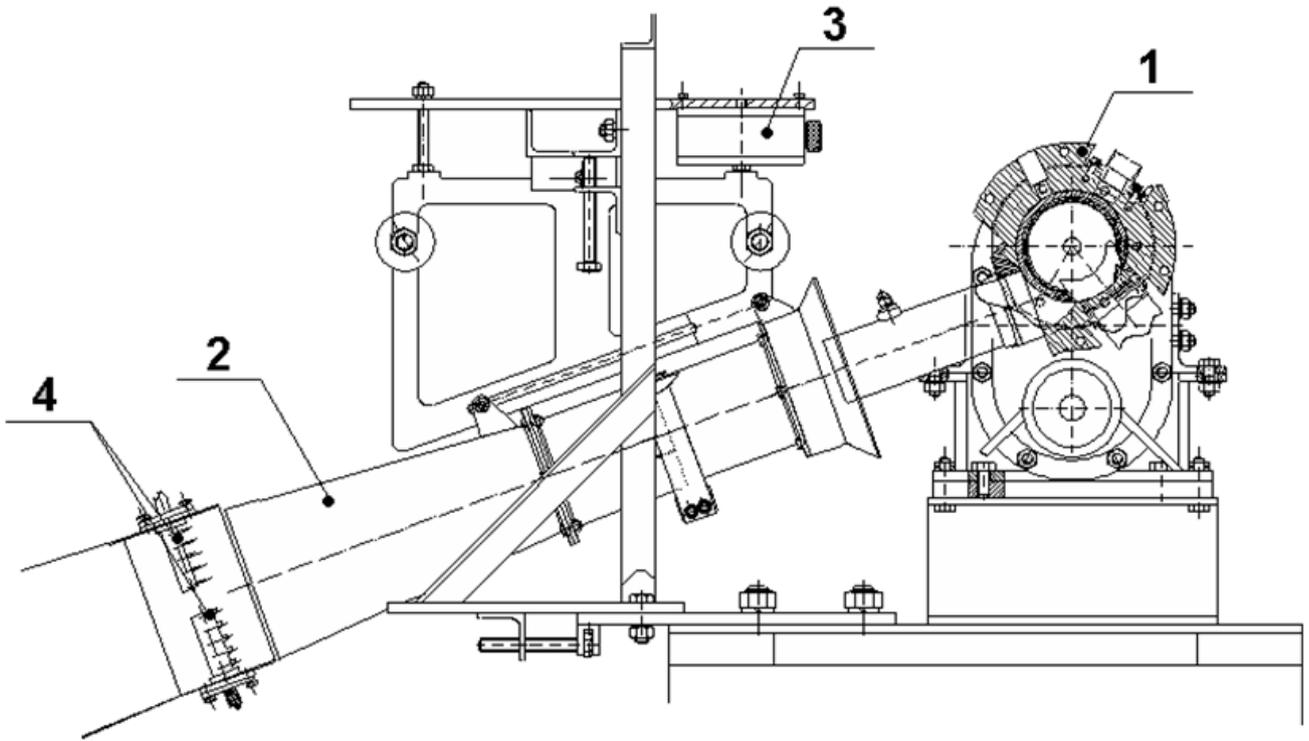


Рис 1 : ПуВРД с золотниковой камерой сгорания и эжекторным усилителем тяги: 1 - ПуВРД; 2 - эжекторный канал; 3 - силоизмерительный датчик; 4 - датчики измерения полного давления и температуры газа.

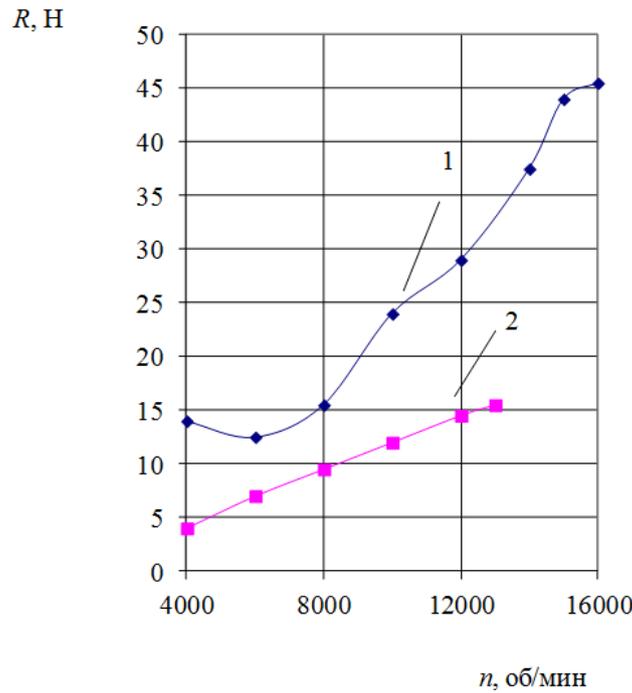


Рис 2 : Зависимость тяги ПуВРД от частоты вращения золотника: 1 – эксперимент; 2 – расчет.

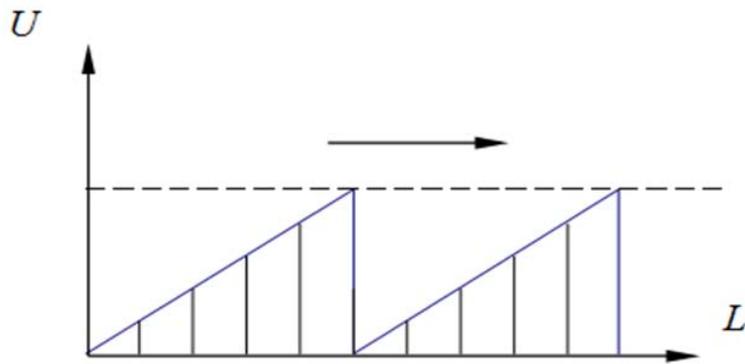


Рис 3 : Типичное распределение скорости U по длине L цикловых масс газа.

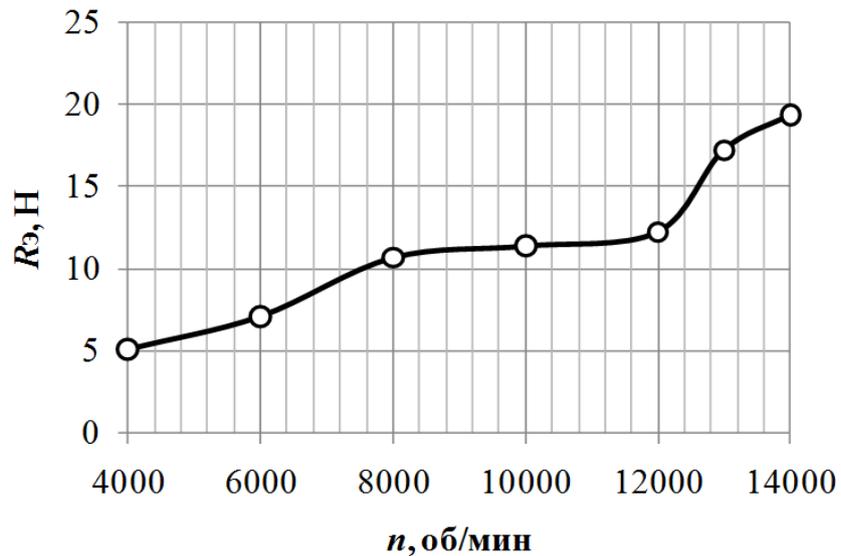


Рис 4 : Зависимость измеренных усилий на эжекторном канале от частоты вращения золотника.

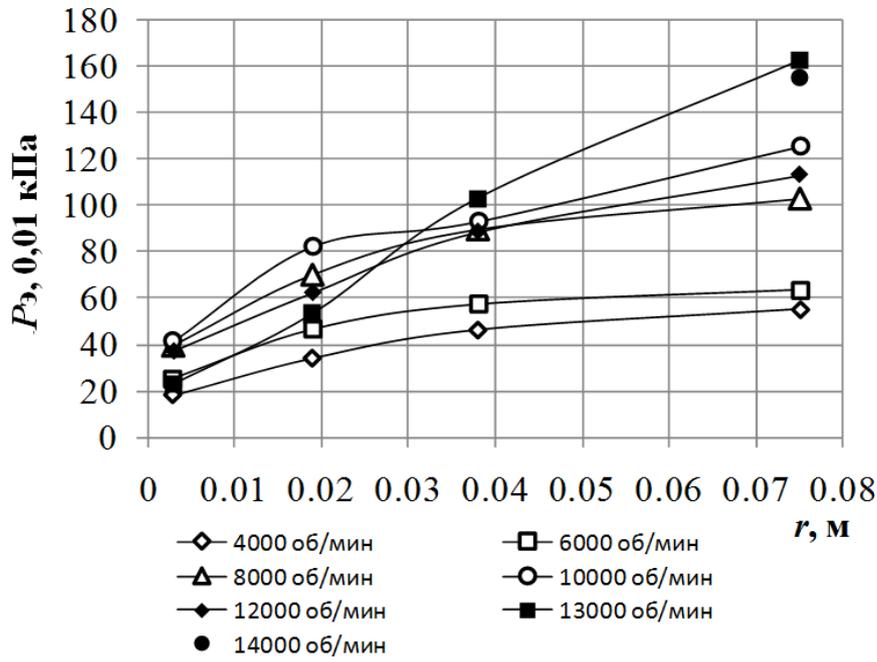


Рис 5 : Распределение измеренного динамического напора по радиусу на выходе эжекторного канала.

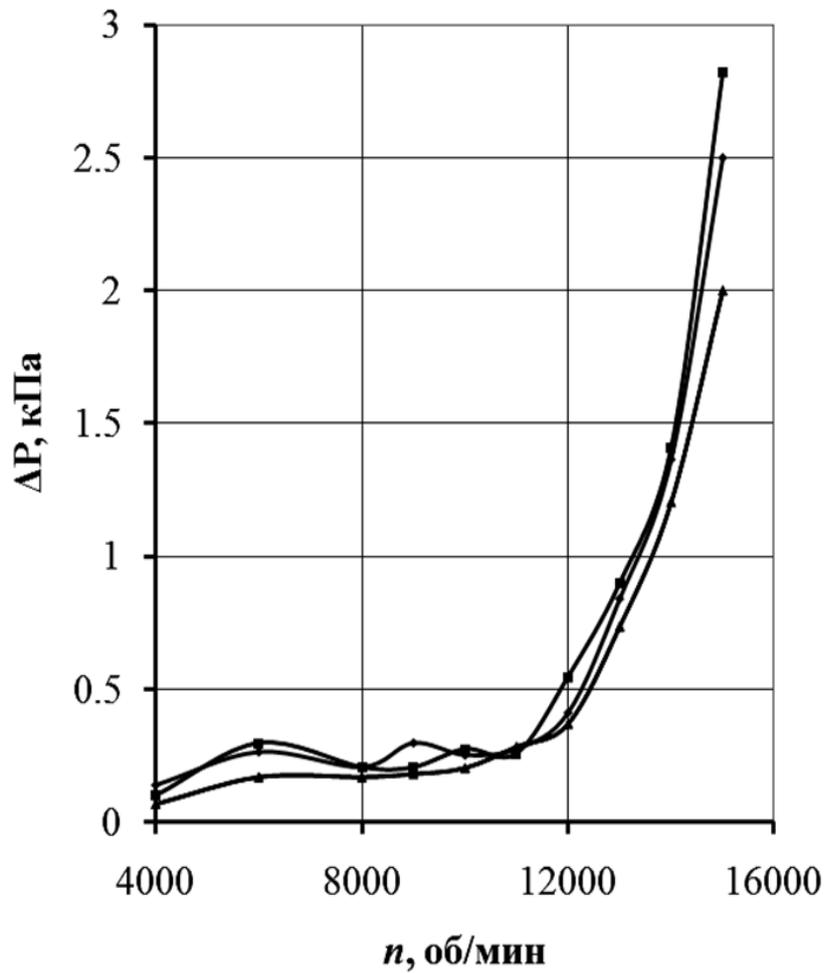


Рис 6 : Пульсации давления на выходе эжекторного канала.

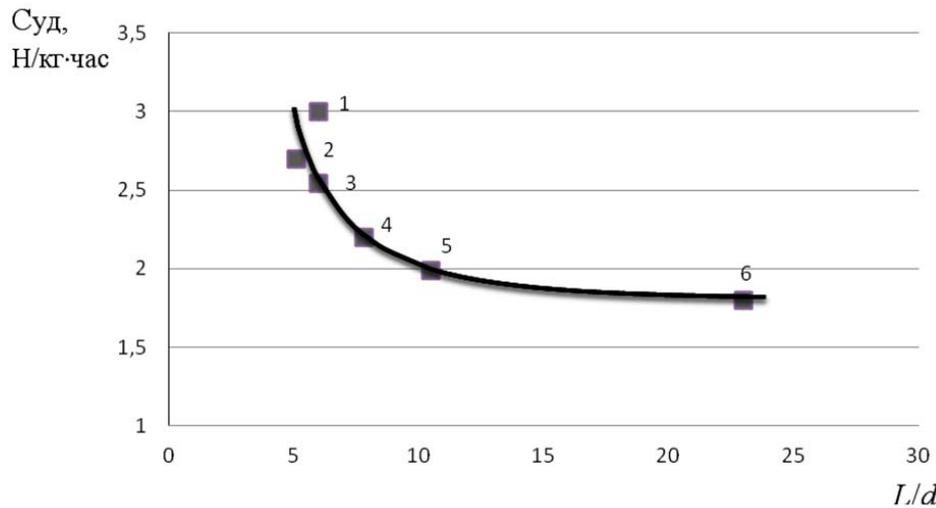


Рис 7 : Зависимость удельного расхода топлива от отношения длины двигателя к его диаметру (1 – AS014, 2 - AY-8-75C (США), 3 - SNCAN (Франция), 4 - Саундерс-РО (Англия), 5 - AS.1 (Германия), 6 - Escopette (Франция))

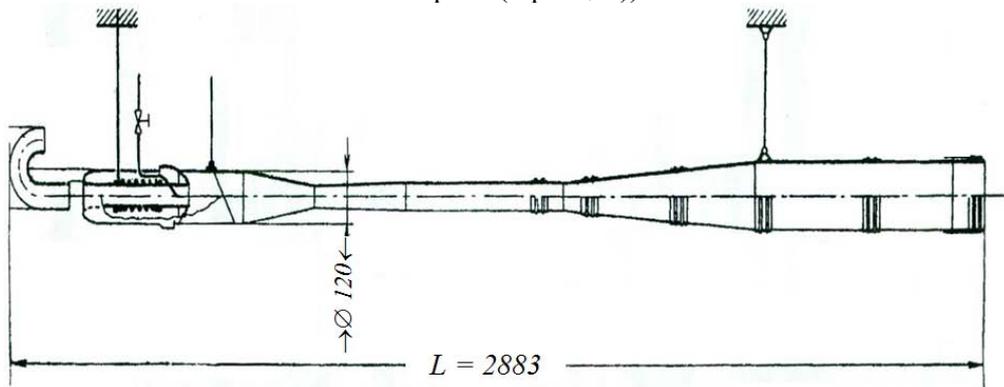


Рис 8 : Пульсирующий воздушно-реактивный двигатель SNECMA 3340 «Escopette»

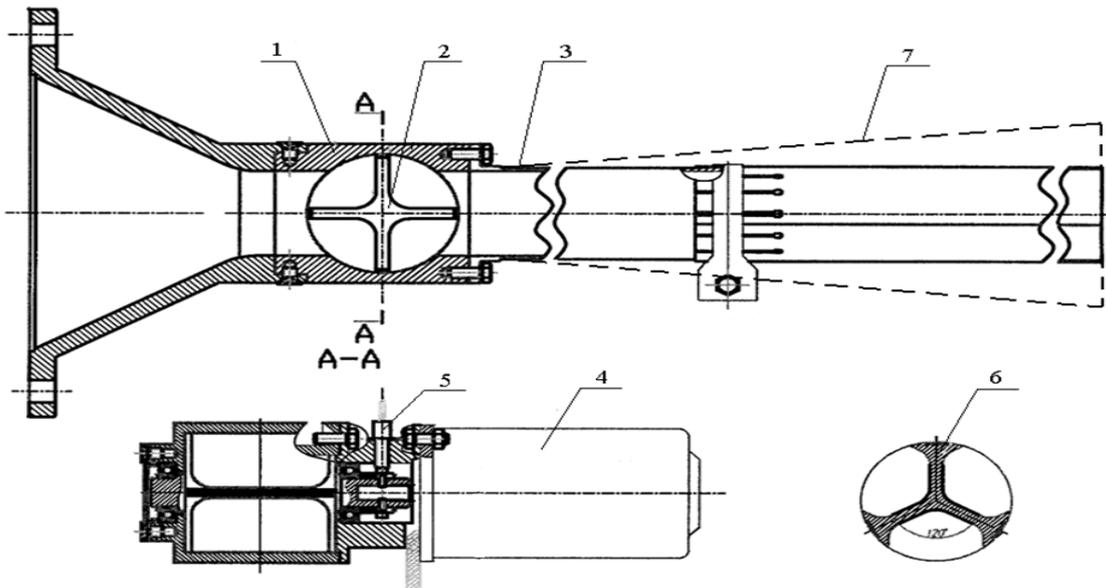


Рис 9 : Схема экспериментального пульсирующего реактивного двигателя 1 – корпус; 2 – четырехлопастной золотник; 3 – выходное устройство с регулируемой длиной; 4 – приводной электродвигатель; 5 – датчик частоты вращения; 6 – трехлопастной золотник; 7 – конфигурация выходного устройства с увеличенным объёмом

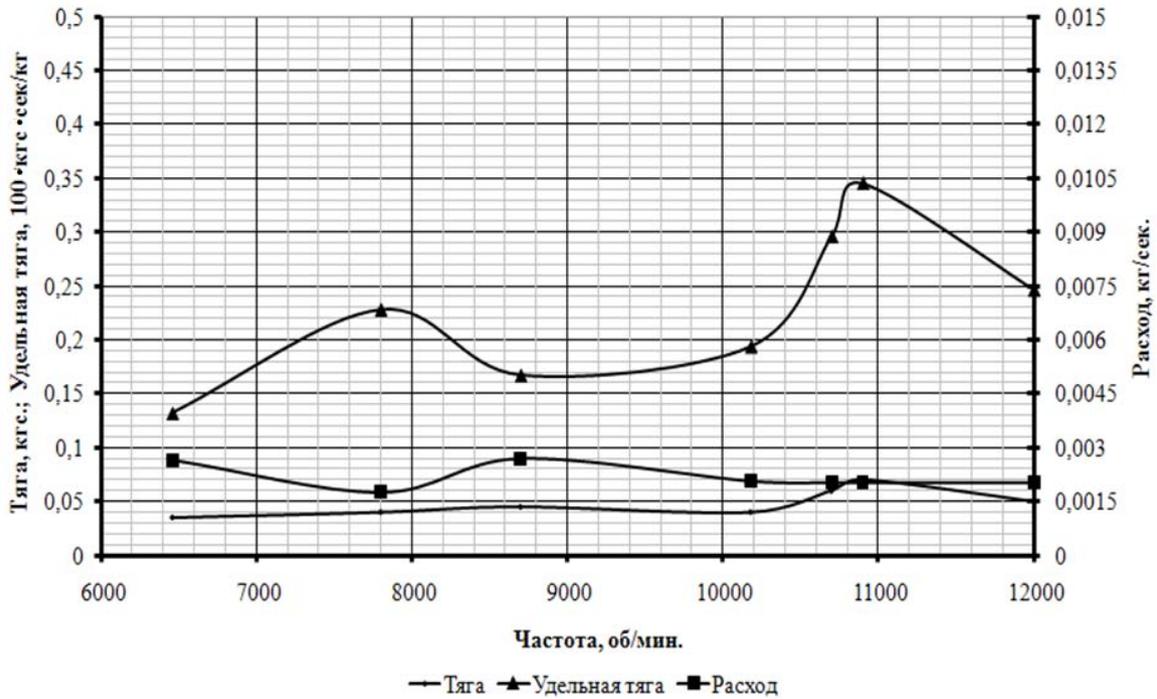


Рис 10 : Зависимость тяги двигателя от частоты вращения золотника; давление в ВК 0,0075 МПа; давление в ресивере 0,015 МПа; 3-х полостной золотник; длина выходного устройства – 400 мм

$$R_{уд} = \frac{\text{даН} \cdot \text{с}}{\text{кг}}$$

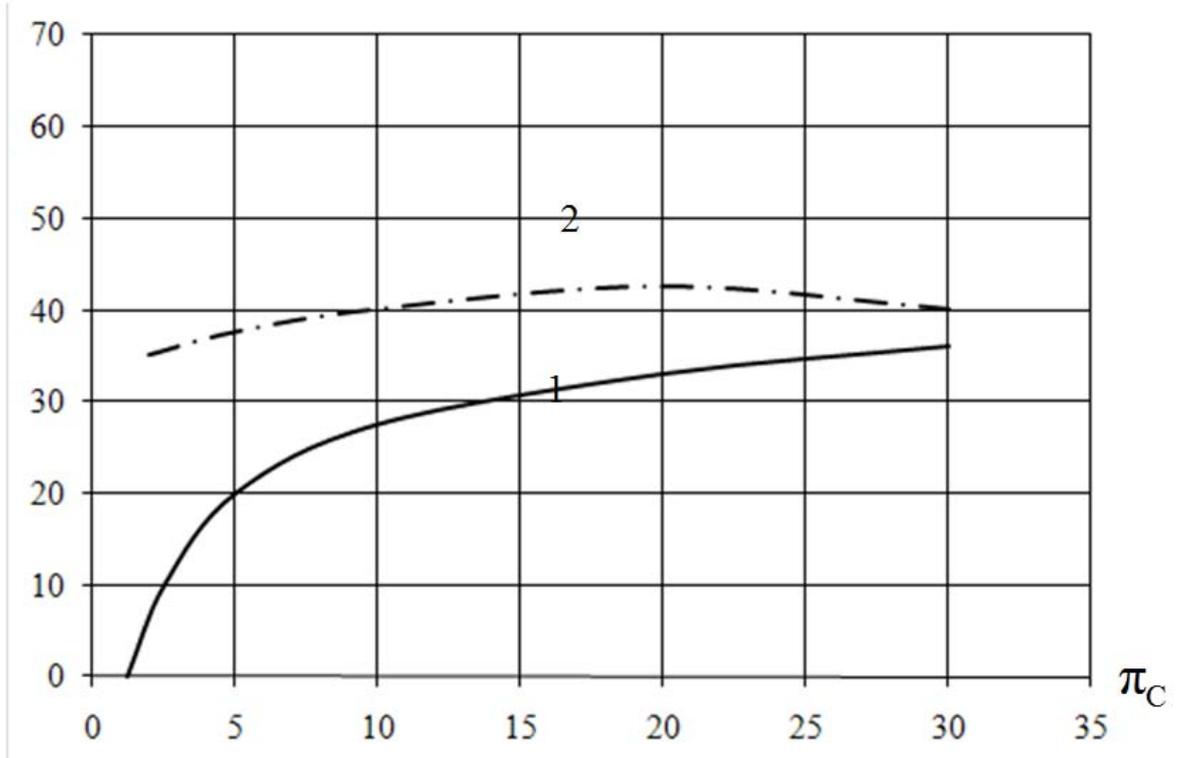


Рис 11 : Зависимости $R_{уд}$ от π_c при различных режимах истечения: 1 – идеальное, нестационарное, полное расширение; π_c равно начальному значению; 2 – эксперимент; π_c равно начальному значению

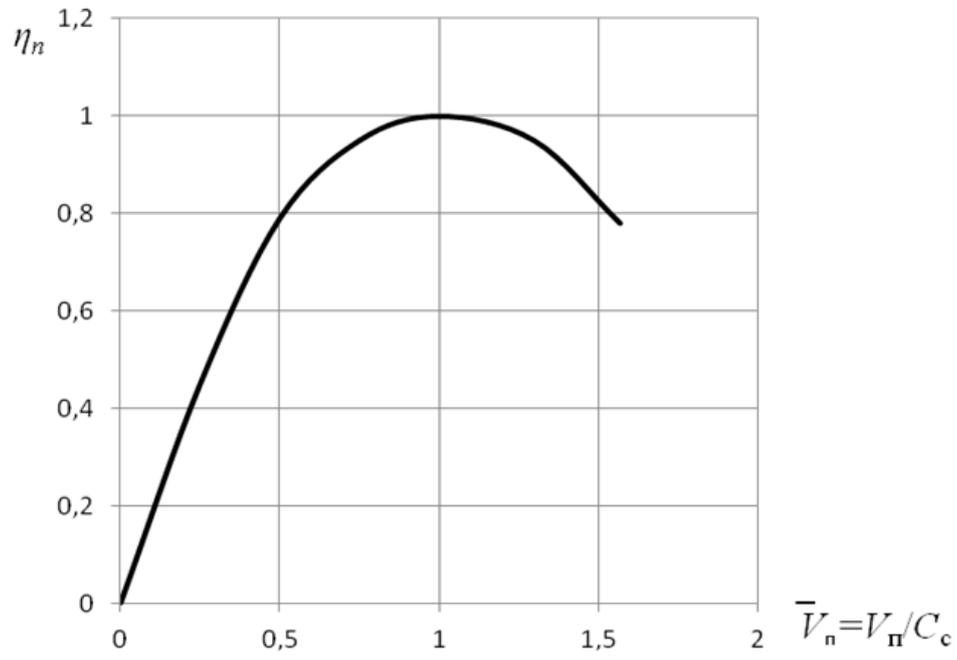


Рис 12 : Полетный КПД пульсирующего воздушно-реактивного двигателя.

This page is intentionally left blank