

УДК 629.7.063.6

Катренко М. А.

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры двигателестроения физико-технического факультета Днепровского национального университета им. О. Гончара, Днепр, Украина, e-mail: bruw@i.ua;

Панченко А. А.

канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник кафедры двигателестроения физико-технического факультета Днепровского национального университета им. О. Гончара, Днепр, Украина, e-mail: glinsk71@ukr.net

ИССЛЕДОВАНИЕ ГРАНИЦ УСТОЙЧИВОЙ ПОДАЧИ ТОПЛИВА В КАМЕРУ С ПРОТИВОДАВЛЕНИЕМ

Цель работы. Экспериментально исследовать факторы и параметры интегрированной в камеру сгорания системы подачи компонентов топлива с пористыми распылителями, влияющих на границы устойчивой подачи компонентов на режимах дросселирования ракетного двигателя в камеру сгорания с противодавлением.

Методы исследования. При проведении исследований использовались методы физического моделирования, основанные на фундаментальных законах гидромеханики, теории подобия и планирования физического эксперимента, с использованием общепринятых методов обработки результатов измерений.

Полученные результаты. Исследованы срывные характеристики насосных агрегатов с пористыми распылительными кольцами, установленные на периферийном диаметре рабочего колеса насоса, подающих жидкость в камеру с противодавлением. Определены границы устойчивых режимов подачи жидкости в зависимости от характеристик пористых колец, массового расхода жидкости и частоты вращения ротора.

Научная новизна. Определены зависимости границ срывных режимов подачи жидкости системой питания с использованием пористых распылителей, установленных на периферии рабочих колес насосов в камеру с противодавлением от пористости распылительных устройств и частоты вращения ротора насоса.

Практическая ценность. Полученные результаты позволяют создавать насосные агрегаты для ракетных двигателей с глубоким дросселированием по расходу, а также обеспечивается возможность плавного уменьшения тяги ракетного двигателя путем уменьшения расхода, что в свою очередь позволяет более рационально использовать топливо на борту летательного аппарата.

Ключевые слова: двигатель; жидкость; агрегаты системы питания; насос; пористое кольцо; пористость; срыв.

ВВЕДЕНИЕ

Осуществление плавного дросселирования ракетного двигателя с возможностью изменения его глубины является важной научной и практической проблемой. Исследование факторов и параметров, влияющих на границы устойчивой подачи топлива в камеру с противодавлением при дросселировании ракетного двигателя представляет малоисследованную, важную научно-практическую задачу. Интеграция системы подачи компонентов топлива в камеру сгорания может обеспечить не только уменьшение массы двигателя за счет отказа от форсуночной головки, но дает возможность рационально использовать топливо для увеличения дальности использования аппарата, а также будет иметь меньшую стоимость. Кроме этого, интегрированная в камеру сгорания система подачи компонентов топлива может быть использована как для жидких, так и гибридных компонентах топливах, что расширяет область применения двигателя с ней.

1 АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Идея применения интегрированной в камеру сгорания комбинированной системы подачи компонентов топлива с использованием центробежных насосов осуществлена фирмой Мессершмитт-Бельков-Блом [1]–[2]. Дальнейшие продолжение научных изысканий в области интеграции системы подачи и камеры сгорания получили в [3]. В [4]–[5] разработаны схемы гибридных ракетных двигателей, в которых использовалось горючее в твердом, а окислитель в жидком агрегатных состояниях. Из результатов работы [6] получено, что изменение параметров насоса с пористым кольцом дало возможность обеспечить устойчивый режим работы двигателя. Данные опубликованных работ в области создания интегрированных в камеру сгорания ракетного двигателя системы подачи компонентов топлива показывают их перспективность.

2 ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью проведенного исследования являлось экспериментальное исследование факторов и параметров интегрированной в камеру сгорания системы подачи компонентов топлива с пористыми распылителями, влияющий на границы устойчивой подачи компонентов на режимах дросселирования ракетного двигателя.

Для достижения этой цели, необходимо решить следующие задачи: создать пористые распылители, с малыми значениями пористости; провести экспериментальные исследования, направленные на определения границ устойчивой подачи жидкости в камеру с противодавлением; проанализировать влияние расхода жидкости и частоты вращения ротора на границы устойчивости системы подачи.

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведенные экспериментальные исследования являются продолжением работ, результаты которых изложены в [6]. Непосредственным объектом экспериментальных исследований являлись рабочие колеса насосов турбонасосного агрегата с пористыми кольцами. Модельная камера сгорания состояла из корпуса с прозрачной крышкой, в который подсоединялся трубопровод подачи воды, трубопровод подачи воздуха, а также разъемы средств измерения. В корпусе камеры замещался полый вал, на который устанавливалось рабочее колесо насоса закрытого типа, состоящее из несущего и покрывного дисков, пористого кольца.

На периферийном диаметре рабочего колеса, после пористого кольца, устанавливалось распылительное устройство, которое закреплялось на дисках. Пористое кольцо было выполнено из 52 слоев сетки с ячейкой $0,0005 \times 0,0005$ из проволоки диаметром $0,00025$ м. Внутренний диаметр распылительных устройств составлял $0,022$ м, а наружный – $0,06$ м, ширина пористого кольца $b_2 = 0,004$ м. Распылительные устройства имели следующие особенности: 1) устройство А выполнялось из металлической ленты из нержавеющей стали и имело 122 перфорированных отверстия диаметром $0,0003$ м; 2) устройство Б выполнялось из такой же ленты и имело два диаметрально расположенных отверстия диаметром $0,003$ м; 3) устройство В было выполнено из металловолокна, изготовленного из медной проволоки диаметром $0,00003$ м. Подвод жидкости к колесу осуществлялся через полый вал, в котором были выполнены радиальные отверстия. Рабочее тело – дегазированная вода.

В проведенных исследованиях определялся перепад статического давления как разность между общим перепадом – между давлением в камере сгорания и давлением на входе в рабочее колесо и перепадом на рабочем колесе не имею-

щего пористого кольца. Массовый расход определялся тахометрическим методом, с использованием расходомера ТДР7-1-1. Фильтрационные характеристики были получены для частот вращения ротора от 3077 до 6154 об/мин. На рис. 1–3 представлены зависимости перепада статического давления в рабочих колесах с пористыми кольцами от массового расхода жидкости.

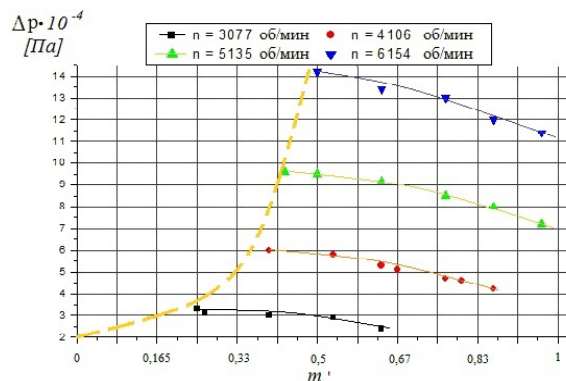


Рисунок 1. Зависимость перепада статического давления $\Delta \bar{P}_{ст}$ от относительного массового расхода жидкости \dot{m}' колеса с распылителем А

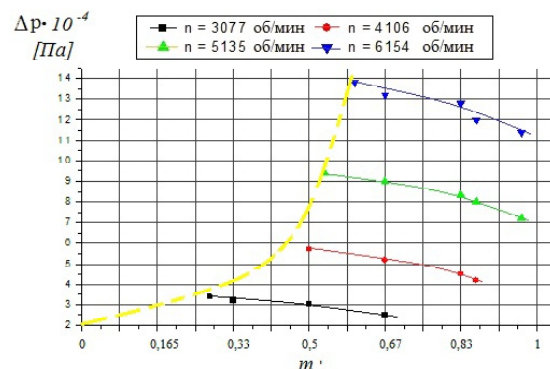


Рисунок 2. Зависимость перепада статического давления $\Delta \bar{P}_{ст}$ от относительного массового расхода жидкости \dot{m}' колеса с распылителем Б

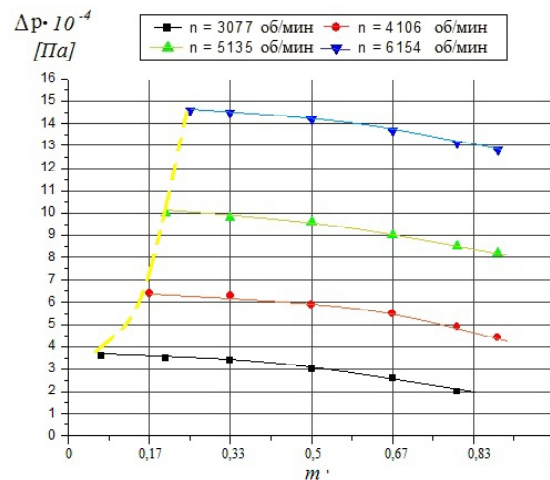


Рисунок 3. Зависимость перепада статического давления $\Delta \bar{P}_{ст}$ от относительного массового расхода жидкости \dot{m}' колеса с распылителем В

4 АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из опыта экспериментальных исследований, изложенных в [6], следовало, что устойчивость подачи топлива в камеру с противодавлением возможна, если создать на выходе из рабочего колеса участок, где потери статического давления будут больше чем прирост давления создаваемый за счет центробежных сил этим участком. Кроме этого, устойчивая подача компонента возможна, если создать на небольшом радиальном участке местное увеличение скорости жидкости, способствующее появлению потерь статического давления. Замечено, что организация течения жидкости с местным ускорением в системе подачи компонентов, влияет на границу устойчивой работы камеры сгорания. Для рабочего колеса закрытого типа, содержащего на периферийном диаметре пористое кольцо, уравнение неразрывности может быть представлено в виде:

$$\dot{m} = \rho \cdot S \cdot |C| = \rho \cdot S_{II} \cdot Cr = \text{const},$$

где $|C|$ – фильтрационная скорость, являющаяся вектором, направленным в сторону движения жидкости, по нормали к поверхности, величина которого равна объемному расходу на единицу полной площади на выходе из колеса S с учетом пор и пористой среды. Действительная скорость движения жидкости Cr , определяющая массовый расход \dot{m} , будет определяться из соотношения:

$$Cr = \frac{S \cdot |C|}{S_{II}} = \frac{|C|}{n}.$$

Следовательно, увеличение проекции абсолютной, действительной скорости на радиальное направление возможно за счет уменьшения просветности. Параметр n – просветность [7–9] распылительных устройств составлял соответственно величину для распылителя А – $n_A = 0,0114$, для распылителя Б – $n_B = 0,01875$, для распылителя В – $n_B = 0,18$. Согласно [7]–[9], значение просветности пористого тела равно его пористости $n = m$ и его использование диктовалось необходимостью определения эквивалентной пористости распылительных устройств, выполненных из стального кольца с отверстиями.

Полученные экспериментальные данные позволили получить зависимости параметра устойчивости B от относительного массового расхода m' , которые представлены на рис. 4.

Из полученных графических зависимостей следует, что при $B \approx 1$ нарушается подача жидкости в камеру сгорания. Эта граница на рис. 4 показана постоянной $B = 1$. Область срыва подачи в камеру с противодавлением имеет диапазон по относительному массовому расходу при \dot{m}'

превышающий 10% от номинального при постоянной частоте вращения, при значениях пористости $m < 0,5$.

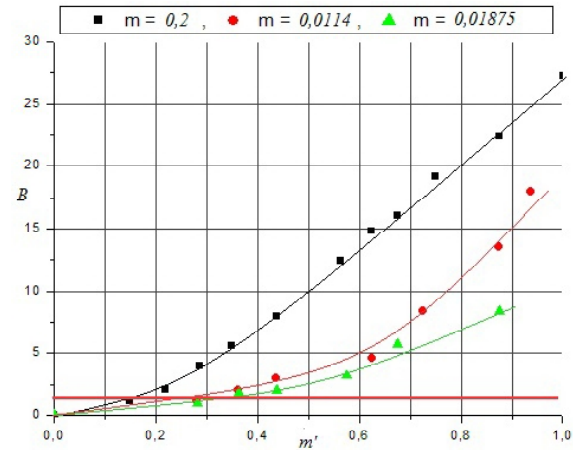


Рисунок 4. Зависимость параметра устойчивости B , от относительного расхода m'

На рис. 5 представлена зависимость минимального относительного расхода $\Delta m'_{\text{MIN}}$ от пористости m .

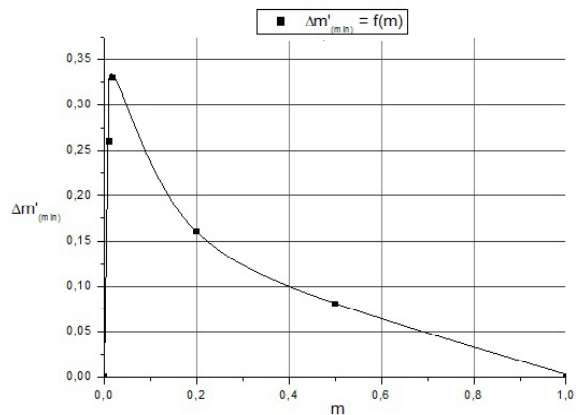


Рисунок 5. Зависимость минимального относительного расхода $\Delta m'_{\text{MIN}}$ от пористости m

При $m = 0$ проточная часть рабочего колеса полностью закрыта и массовый расход через камеру $\dot{m} = 0$. При $m = 1$ проточная часть рабочего колеса не загромождена порами, и с таким рабочим колесом осуществить подачу жидкости в камеру с противодавлением не представляется возможным из-за прорыва газа на вход в насос, что вызывает кавитационный режим его работы и массовый расход через камеру $\dot{m} = 0$. В области $0 < m < 0,5$ наблюдается рост области срыва подачи жидкости в камеру сгорания, которая составляет по относительному расходу от 0,8 до 0,33. В области $0,5 < m < 1$ плавное уменьшение зоны срыва, до граничного значения пористости $m = 1$.

ВЫВОДЫ

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1) пористые элементы, выполняющие роль распылительных устройств, с застойными полосами менее эффективны, чем полностью пронизываемые тела;

2) глубина дросселирования камеры при пористости распылительного устройства m , не превышающего 0,02 по массовому расходу, составляет 3,85 – 3,67 раз;

3) пористые распылители с пористостью $m = 0,2$ и более, выполненные из анизотропных материалов позволяют создавать дросселируемые двигатели с глубиной дросселирования до 13,6 раз;

4) с уменьшением пористости распылительного устройства с 0,2 до 0,0187, зона срыва увеличилась в 1,55 раз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND. Deutsches patentamt. Auslegeschrift. 1164753, Internat. Kl.: F 02 k, Deutsche Kl.: 46g-1/05. Nummer: 1164753. Aktenzeichen: St158931a/46g. Anmeldetag: 12. Dezember 1959. Auslegetag: 5. März 1964. Raketentriebwerk für flüssige Treibstoffe. Anmeldetage: Вцлkow-Entwicklungen Kommanditgesellschaft, Ottobrunn bei München. Als Erfinder benannt: Dipl.-Ing. Karl Stuckel, Ottobrunn bei München.
- [2]. Михайлов В. В. Дросселируемые жидкостные ракетные двигатели / В. В. Михайлов, В. Г. Базаров. – М. : Машиностроение, 1985. – 106 с.

- [3]. Патент № US2536599A (США) кл. 60-35.6 Управляемая паром вращающаяся камера сгорания. / Ester C Goddard. дата заявки 02.01.1948. опубл. 02.01.1951.
- [4]. Патент на корисну модель, Україна: 118587, МПК В63Н 11/00. Гідрореактивний двигун / Катренко М.О. власник Катренко М.О. – № u201702829; дата заявки 27.03.2017; дата публік. 10.08.2017, Бюл. №15. 2017. : ил.
- [5]. Патент на корисну модель, Україна: 118640, МПК В63Н 11/00. Гідрореактивний двигун / Катренко М.О. власник Катренко М.О. – № a201702588; дата заявки 20.03.2017; дата публ. 28.08.2017, Бюл. №16. 2017. : ил.
- [6]. Теоретико-экспериментальные исследования комбинированных систем подачи топлива в камеру сгорания ракетных и ракетно-прямоточных двигателей / С. А. Белогуров, М. А. Катренко, А. А. Панченко, Л. В. Пронь // Вестник двигателестроения. – № 1. – 2013. – С. 29–34. – ISSN 1727-0219.
- [7]. Аравин, В. И. Теория движения жидкостей и газов в недеформируемой пористой среде : учеб. пособ. для втузов. / В. И. Аравин, С.Н. Нумеров. – М. : Гостехиздат. – 1953. – 616 с.
- [8]. Коллинз, Р. Течения жидкостей через пористые материалы. : пер. с англ. / под ред. Г. И. Баренблатта. – М. : Мир, 1964. – 352 с.
- [9]. Шейдеггер, А. Э. Физика течения жидкостей через пористые среды. – М. : Гос. изд. нефтяной и горно-топливной лит., 1960. – 250 с.

Статья поступила в редакцию 26.02.2018

Катренко М.О. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры двигунобудування фізико-технічного факультету Дніпровського національного університету, Дніпро, Україна, e-mail: bruw@i.ua;

Панченко А.А. канд. техн. наук, провідний науковий співробітник кафедри двигунобудування фізико-технічного факультету Дніпровського національного університету, Дніпро, Україна, e-mail: glinsk71@ukr.net;

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕЖ СТІЙКОГО ПОСТАЧАВАННЯ ПАЛИВА В КАМЕРУ З ПРОТИТИСКОМ

Мета роботи. Експериментально дослідити фактори та параметри інтегрованої в камеру згоряння системи подачі компонентів палива з пористими розпилювачами, що впливають на межі стійкого постачання компонентів на режимах дроселювання ракетного двигуна в камеру згоряння з протитиском.

Методи дослідження. При проведенні досліджень використовувалися методи фізичного моделювання, які ґрунтовані на фундаментальних законах гідромеханіки, теорії подібності та планування фізичного експерименту, з використанням загальноприйнятих методів обробки результатів вимірювань.

Отримані результати. Досліджено зривні характеристики насосних агрегатів з пористими кільцями, що розпилюють, та встановлені на периферійному діаметрі робочого колеса насоса, що подають рідину в камеру з протитиском. Визначено межі стійких режимів постачання рідини в залежності від характеристик пористих кілець, масової витрати рідини і частоти обертання ротора.

Наукова новизна. Визначено залежності між граничними режимами постачання рідини системою

живлення з використанням пористих розпилювачів, встановлених на периферії робочих коліс насосів в камеру з протитиском від пористості і частоти обертання ротора насоса.

Практична цінність. Отримані результати дозволяють створювати насосні агрегати для ракетних двигунів з глибоким дроселюванням по витраті, а також забезпечується можливість плавного зменшення тяги ракетного двигуна шляхом зменшення витрати, що в свою чергу дозволяє більш раціонально використовувати паливо на борту літального апарату.

Ключові слова: двигун; рідина; агрегати системи постачання; насос; пористе кільце; пористість; зрив.

Katrenko M.A. Ph.D, Associate Professor, Associate Professor of the Engine Building Department of the Faculty of Physics and Technology of Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine, e-mail bruw@i.ua;

Panchenko A.A. Ph.D, Leading Researcher of the Engine Building Department of the Faculty of Physics and Technology of Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine, e-mail glinsk71@ukr.net;

STUDY OF THE BOUNDARIES OF SUSTAINABLE FUEL SUPPLY INTO THE BACK-PRESSURE COMBUSTION CHAMBER

Purpose. Experimental study of factors and parameters for the supply of fuel components incorporated into the combustion chamber with porous sprayers, affecting the boundaries of the components steady supply into the combustion chamber with back-pressure during the rocket engine throttling.

Methodology. During the research, physical modeling methods based on the fundamental laws of hydromechanics, the theory of similarity and physical experiment planning, using conventional methods for processing measurement results were used.

Findings. There are studied breakdown characteristics of pumping units with porous spray rings mounted on the periphery diameter of the pump impeller supplying fuel into the back-pressure chamber. The boundaries of stable modes of fuel supply are determined depending on the porous rings characteristics, mass flow rate and rotor speed.

Scientific novelty. There are determined dependencies of the boundaries of breakdown modes of the fuel supply system with porous sprayers installed at the periphery of the pump impeller supplying fuel in the back-pressure chamber from the porosity of the spraying devices and the pump rotor speed.

Practical value. The results obtained make it possible to create pumping units for rocket engines with a deep throttle flow rate, and allows for a smooth reduction in rocket thrust by reducing the flow rate over a wide range of rotor speeds of the turbo-pump assembly, which in turn allows more rational use of fuel on board the aircraft.

Keywords: engine; fuel; fuel supply units; pump; porous ring; porosity; breakdown.

REFERENCES

- [1]. BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND (1964). Deutsches patentamt. Auslegeschrift. 1164753, Internat. Kl.: F 02 k, Deutsche Kl.: 46g-1/05. Nummer: 1164753. Aktenzeichen: St158931a/46g. Anmeldetag: 12. Dezember 1959. Auslegetag: 5. Mrz. Raketentriebwerk für flüssige Treibstoffe Anmelder: B u l k o w - E n t w i c k l u n g e n Kommanditgesellschaft, Ottobrunn bei München. Als Erfinder benannt: Dipl.-Ing. Karl Stückel, Ottobrunn bei München.
- [2]. Mihajlov V. V., Bazarov V.G. (1985). Drosseliruemye zhidkostnye raketnye dvigateli. M.: Mashinostroenie, 106.
- [3]. Ester C. Goddard (1948). Patent № US2536599A (SShA) kl. 60-35.6 Upravljajemaja parom vrashhajushhajasja kamera sgoranija. opubl.
- [4]. Katrenko M. O. Patent na korisnu model', Ukraïna: 118587, MPK V63N 11/00. Hidroreaktivnij dvigun. № u201702829.
- [5]. Katrenko M. O. (2017). Patent na korisnu model', Ukraïna: 118640, MPK V63N 11/00. Hidroreaktivnij dvigun. № a201702588.
- [6]. Belogurov S. A., Katrenko M. A., Panchenko, A. A., (2013). Teoretiko - jeksperimental'nye issledovanija kombinirovannyh sistem podachi topliva v kameru sgoranija raketnyh i raketno-prjamotochnyh dvigatelej. Vestnik dvigatelestroenija, 1, 29-34.
- [7]. Aravin V. I., Numerov S.N. (1953). Teorija dvizhenija zhidkostej i gazov v nedeformiruemoj poristoj srede ucheb. M.: Gostehizdat, 616.
- [8]. Kollinz R., Barenblatta G. I. (1964). Tehenija zhidkostej cherez poristye materialy. M.: Mir, 352.
- [9]. Shejdegger A. Je. (1960). Fizika tehenija zhidkostej cherez poristye srody. Moscow: Gos. izd. neftjanoj i gorno-toplivnoj lit., 250.