

УДК 629.7.036.5

*Експериментально досліджено далекобійність вихрових кілець що до паливних баків ракет-носіїв. Доведена ефективність цього введення газу при використанні гарячих робочих тіл. Сформульовані рекомендації*

*Ключові слова: наддування, стискаюча дія, вихрові кільця, далекобійність, баки великого подовження*

*Експериментально досліджена дальнобойність вихрових кілець применительно к условиям топливных баков ракет-носителей. Показана эффективность такого ввода газа при использовании горячих рабочих тел. Сформулированы рекомендации*

*Ключевые слова: наддув, стесняющее действие, вихровые кольца, дальнобойность, баки большого удлинения*

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВИХРЕВЫХ КОЛЕЦ ДЛЯ НАДДУВА ТОПЛИВНЫХ БАКОВ ДВИГАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК РАКЕТ- НОСИТЕЛЕЙ

**Ю. А. Митиков**

Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой  
Кафедра двигателестроения

Днепропетровский национальный университет  
им. Олеса Гончара

пр. Гагарина, 72, г. Днепропетровск, Украина, 49010

Контактный тел.: 067-565-00-05

E-mail: mitikov@yandex.ru

### Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными и практическими задачами

В настоящее время все большее число стран входят и стремятся выйти на мировой рынок оказания пусковых услуг. Если еще не так давно запуск спутников и других космических объектов был прерогативой исключительно государственных организаций, то в наше время уже частные компании уверенно осваивают этот весьма привлекательный рынок. В 2012 году частная компания SpaceX (США) успешно запустила к МКС с помощью носителя Falcon 9 возвращаемый транспортный корабль Dragon. Не трудно предвидеть, что конкуренция по запуску объектов различного назначения в космическое пространство далее будет только расти. Побеждать в этой борьбе, естественно, будет тот, кто обеспечит меньшую цену вывода единицы массы на опорную орбиту при требуемой надежности.

В связи с этим заметно возрастает актуальность работ, направленных на оптимизацию параметров систем ракет-носителей (РН), на нахождение наиболее эффективных режимов их работы. Уместно отметить, что конечная масса систем наддува (СН) топливных баков двигательных установок (ДУ), совершенствованию параметров которых посвящена данная статья, может достигать 7% конечной массы ступени [1], и тут, несмотря на большую историю применения горячих СН, есть ещё ряд проблемных вопросов [2].

### Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которым посвящается данная статья

Одним из путей повышения эффективности СН является увеличение температуры используемого ра-

бочего тела на входе в бак. К настоящему времени в системах питания ДУ достигнут уровень ~ 1100 К. Но уже при этой температуре возникают проблемы перегрева верхних алюминиевых (наиболее распространенный материал) днищ топливных баков и устройств, на нем расположенных. Этот момент и большие непроизводительные тепловые потери газа наддува в граничные поверхности в баке существенно снижают эффективность перспективных высокотемпературных СН.

Естественно желание проектантов СН «отодвинуть» раскаленное облако газа от верхнего днища вглубь бака, вводя его вдоль продольной оси бака с определенной скоростью [3]. При этом известны исследования, проведенные на баках с удлинением (отношение длины цилиндрического бака к его диаметру) 0,8, показывающие, что выравнивание температурного профиля газа по высоте бака позволяет достичь экономии газа наддува до 30% [4]. Однако реализация этого очевидного технического решения наталкивается на существенные трудности. Так, при традиционном турбулентном струйном вводе высокотемпературного газа в баки большого удлинения, характерного для первых ступеней РН, за счет стесняющего действия конструкции [5] струя при любой дозвуковой скорости ввода распространиться далее чем на 1,5 – 2,0 калибра бака не в состоянии. Попытки оптимизации скорости ввода газа только на этом участке являются частичным решением проблемы [6].

Предложения [3] по использованию многорежимных газоводов, которые позволяли бы вводить высокотемпературный газ последовательно по мере опорожнения бака через 1,5 – 2,0 его калибра, достаточно сложны в реализации на горячей газе и до сих пор не осуществлены.

**Формулирование целей статьи**

Целью данного исследования является нахождение и обоснование целесообразности применения нового для СН баков ДУ способа ввода высокотемпературного рабочего тела в их свободные объемы. Искомый способ должен позволять перемешивать газ (выравнивать температурный профиль) во всем свободном объеме топливного бака удлинением до 6, характерным для первых ступеней РН. Данный способ ввода газа в бак должен позволять рассматривать возможность повышения температуры его на входе в бак выше 1100 К, что повысило бы эффективность системы питания ДУ в целом. Это, в свою очередь, позволило бы снизить потребную массу газа наддува на борту РН, систем его хранения и подачи в бак, что положительно сказалось бы на массовых характеристиках носителя.

**Изложение основного материала исследования с полным обоснованием полученных научных результатов**

В настоящее время в различных областях техники в большей или меньшей степени используются так называемые вихревые кольца (ВК). Авторам известны, возможно, первые факты их массового использования – немецкими инженерами на побережье Нормандии для уничтожения низколетящих бомбардировщиков союзников во время второй мировой войны (поломка оперения). Сегодня ВК применяются для увеличения высоты выброса (площади рассеивания) продуктов сгорания ТЭС, для тушения пожаров на газовых и нефтяных месторождениях, для равномерного кондиционирования воздуха в салонах автомобилей премиум класса и др.

В настоящее время достаточно хорошо разработаны методы расчета распространения вихревых колец в неограниченных объемах [7]. Однако распространение ВК в стесненных условиях, характерных для свободных объемов топливных баков РН первых ступеней, практически не изучено.

Целью проведенных экспериментальных исследований было изучение закономерностей распространения вихревых колец в условиях, имитирующих стесненные условия топливного бака РН. Исследования проведены на установке, принципиальная схема которой приведена на рис. 1.

Модельная цилиндрическая емкость 1 для упрощения визуального изучения поведения вихревых колец была выполнена из оргстекла. Диаметр ее составлял 0,4 м, высота обечайки ~1,1 м, нижнее днище было выполнено сферическим. На верхнем днище размещались генератор вихревых колец 2 (ГВК), подогреватель 3 рабочего тела (воздуха), генератор дыма 4 (для визуализации колец). Также установка была снабжена системами измерений и слива рабочей жидкости (воды). Управление длительностью импульсов формирования ВК и их частотой осуществлялось с помощью специального генератора (на схеме не показан).

Работа на установке производилась в следующей последовательности. Воздух из аккумулятора давления 6 через регулятор 7 поступал в электропневмоклапан

(ЭПК) 8. Контроль давления перед ЭПК 8 производился по манометру 9. Одновременно воздух через регулятор давления 10 поступал в генератор дыма 4, который связан с ГВК.

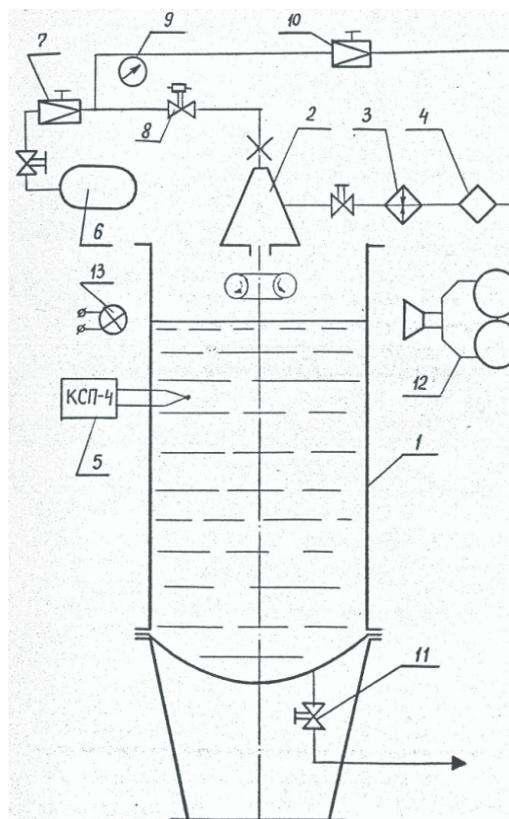


Рис. 1. Схема установки

При проведении экспериментальных исследований варьировались следующие режимные параметры:

- давление перед ЭПК ( $0 \div 20 \times 10^5$  н/м<sup>2</sup>);
- частота следования импульсов ( $0 \div 20$  Гц);
- длительность импульса (0, 011 с, 0, 013 с, 0, 020 с);
- высота свободного объема емкости, измеряемая по ее оси от выходного сечения ГВК 2 до свободной поверхности жидкости ( $0 \div 1,1$  м).

Основные параметры ВК (начальная скорость, скорость на участках дистанции, дальнобойность) определялись как экспериментально (например, по прохождению вихрем контрольного расстояния), так и теоретически по известным зависимостям для нестесненного движения. Здесь и в дальнейшем под дальнобойностью ВК понималось то наибольшее расстояние, которое оно проходило по оси емкости до момента разрушения. Следует заметить, что после отклонения от оси установки (ввода) кольца двигались по случайным криволинейным траекториям, при этом проходили еще достаточно большие расстояния. Наибольший практический интерес представляли соосно движущиеся кольца. Эксперименты проведены в диапазоне начальных вертикальных скоростей ВК  $4,0 \div 10,0$  м/с.

Влияние различных параметров на величину относительной дальнобойности (отношение абсолютной дальнобойности к диаметру выходного отверстия ГВК) представлено на рис. 2.

Как следует из анализа представленных экспериментальных данных, дальнобойность ВК возрастает с увеличением длительности включения ЭПК и перепада давления на генераторе колец, характеризующих массу ВК и их начальную скорость. С возрастанием частоты генерирования ВК дальнобойность падает, что можно объяснить увеличением интенсивности взаимодействия между отдельно взятыми ВК в вихревом столбе в результате уменьшения расстояния между ними. При этом увеличение начальной скорости отдельных ВК приводит в итоге к увеличению дальнобойности вихревого столба. При частоте генерирования ВК  $f \geq 10$  Гц диаметр вихревого столба по его длине практически не увеличивается, что можно объяснить незначительной эжекцией в ВК газа окружающей среды. В этом случае можно говорить о наступлении режима каналирования (движение среды в псевдоканале).

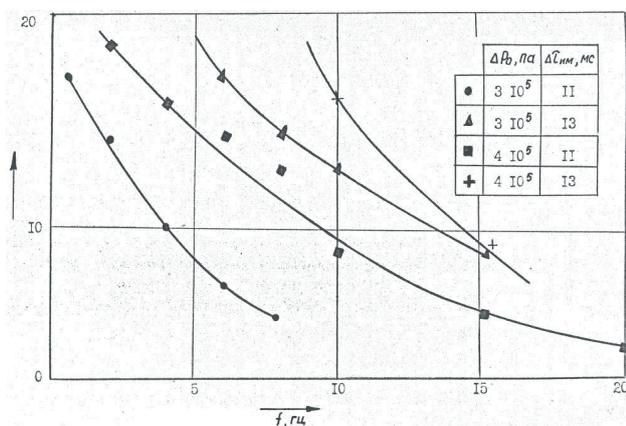


Рис.2. Изменение относительной дальнобойности кольца от основных параметров ВК

Одним из основных результатов проведенных экспериментальных исследований является определение влияния стеснения конструкции бака на распространение ВК в нем. При отношении диаметра емкости к диаметру ВК больше 4, стесняющего действия стенок бака на распространение ВК не обнаружено. При подаче в бак газа в виде ВК с меньшей плотностью (большей температурой) скорость их движения по оси бака снижается медленнее, что можно объяснить некоторым уменьше-

нием радиуса вихря в кольце под действием силы Архимеда. Экспериментально зафиксировано, что степень каналирования при вводе в бак горячего газа наддува в виде ВК выше, чем при использовании холодного газа.

После разрушения ВК скорость газа в радиальном направлении весьма невысока по сравнению с предыдущей вертикальной скоростью движения.

#### Выводы из данного исследования и перспективы дальнейших работ в данном направлении

Проведенные экспериментальные исследования особенностей распространения турбулентных вихревых колец в ограниченном объеме топливного бака ДУ позволяют сделать следующие выводы:

1. При отношении диаметра емкости к диаметру ВК больше 4, стесняющего действия стенок бака на распространение ВК не обнаружено.

2. Дальнобойность ВК возрастает с увеличением длительности включения ЭПК и перепада давления на генераторе колец, характеризующих массу ВК и их начальную скорость. С возрастанием частоты генерирования ВК дальнобойность падает.

3. Показана возможность существования (при  $f = 10 \dots 20$  Гц) режима каналирования системы последовательно генерируемых ВК, при котором практически отсутствует тепломассообмен между ВК и газовым объемом.

4. Степень каналирования при вводе в бак горячего газа наддува в виде ВК выше, чем при использовании холодного газа.

Полученные результаты по распространению ВК в стесненных условиях позволяют оптимистично смотреть на перспективы использования этого способа подачи высокотемпературного рабочего тела в свободные объемы топливных баков двигательных установок РН. В дальнейшем целесообразно продолжить исследования по определению механизма взаимодействия ВК с поверхностью топлива, находящегося под действием циркуляционных токов от аэродинамического нагрева стенок нетеплоизолированных баков на активном участке траектории полета РН, поиску оптимальной конструкции устройства ввода горячих ВК (генератор ВК) в свободный объем бака.

#### Литература

1. Митиков, Ю.А. Газобаллонные системы наддува и ракеты-носители нового поколения [Текст] / Ю.А. Митиков // Космическая техника. Ракетное вооружение. – 2012. – №1. – С. 179 – 185.
2. Митиков, Ю.А. Пути повышения надежности и безопасности эксплуатации ракетных комплексов [Текст] / Ю.А. Митиков, В.А. Антонов, М.Л. Волошин, А.И. Логвиненко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – № 3 (90). – С. 30 – 36.
3. Митиков, Ю.О. Рекомендації по проектуванню газоводів баків великого подовження [Текст] / Ю.А. Митиков, М.В. Поляков // Збірник наукових праць ХУПС. – 2012. – Вип. №2 (31). – С. 118 – 121.
4. Козлов А.А., Новиков В.Н., Соловьев Е.В. Системы питания и управления жидкостных ракетных двигательных установок. – М.: Машиностроение, 1988. – 352 с.
5. Митиков, Ю.А. Определение коэффициентов стеснения неизотермических турбулентных струй [Текст] / Ю.А. Митиков, С.А. Куда // Проектирование сложных технических систем. Сб. тр. ИТМ АН УССР. – 1989. – С.153 – 155.
6. Митиков, Ю.А. Оптимизация скорости ввода горячего гелия в бак с кислородом [Текст] / Ю.А. Митиков, С.А.Куда // Вісник НТУ «ХП». [Текст] 2012. – №34. – С. 9 – 16.
7. Тарасов, В.Ф. Экспериментальные исследования переноса примеси турбулентным вихревым кольцом [Текст] / В.Ф. Тарасов, В.И. Якушев // ПМТФ. – 1974. – №1. – С. 130 – 136.

8. Будник, В.С. Обобщенный энергетический подход к организации теплообменных процессов в свободном газовом объеме топливных баков жидкостных ракет [Текст] / В.С. Будник, Ю.Ф. Даниев, Н.Ф. Свириденко // Техническая механика. – 1998. – №7. – С. 98 – 106.

**Abstract**

*One of the ways of improving the efficiency of pressurization systems of fuel tanks of launch vehicles powerplant engines is raising the temperature increase of working body while entering the tank. At the moment 1100 K temperature is reached, but even with usage of this temperature the problem of overheating of aluminum top floor occurred. Attempts to stretch a cloud of overheated gas gave no result due to limiting action of its design using tradition jet input of hot gas into tanks.*

*The extension movement of hot gas injected as vortex circles considering carrier conditions (a range of pressures, tank geometry, time of pressurization work and other) was experimentally investigated. Inject speed ranged 4-10 m/s. Ratios of tank diameter to ring diameter in which limiting action of tank starts showing were found. Frequencies for injection of vortex circles into tank when channeling mode begins are determined. Also main factors that influence on vortex circles range in tank are identified. Main parameters of gas flow in tank after breaking of vortex circles are counted.*

*The obtained results of vortex circles spreading in ranged conditions allow to see the prospects optimistically in using this method of injecting working body with high temperature in free space of powerplant engines fueled tanks. It is appropriate to continue exploring the determination of interaction mechanism of vortex circles and fuel surface, to continue exploring optimal design of vortex circles generator*

**Keywords:** *pressurization, limiting action, vortex circles, range, high elongation tanks*

УДК 532.53

# ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТОКОВ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ С ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ ПО ДЛИНЕ РАСХОДОМ

**Башир Хоггас**

Аспирант

Кафедра прикладной гидроаэромеханики и  
механотроники

Национальный технический университет  
Украины

«Киевский политехнический институт»

ул. Звиреницькая, 76. г. Киев, Украина, 01901

Контактный тел.: 093-575-07-32

Email: hoggas36@yahoo.fr

*Розглянуто течію аномально-в'язкої рідини в трубопроводах зі змінними за довжиною витратою. В якості робочих рідин використовувалися середовища, які моделюють реологічну поведінку нафти. Представлено реологічні характеристики з різних нафтових джерел Алжирської народної демократичної республіки. На основі описаного в роботі експериментального стенда отримано дані з визначення коефіцієнта гідравлічного тертя і факторів, які впливають на нього*

**Ключові слова:** *аномально-в'язка рідина, витрата, реологічні характеристики, коефіцієнт гідравлічного тертя, градієнт швидкості*

*Рассмотрено течение аномально-вязких жидкостей в трубопроводах с изменяющимся по длине расходом. В качестве рабочих жидкостей использовались среды, моделирующие реологическое поведение нефти. Представлены реологические характеристики из разных источников Алжирской народной демократической республики. На основании описанного в работе экспериментального стенда получены данные по определению коэффициента гидравлического трения и факторов, оказывающих на него влияние*

**Ключевые слова:** *аномально-вязкая жидкость, расход, реологические характеристики, коэффициент гидравлического трения, градиент скорости*

## 1. Введение

Повышение эффективности работы трубопроводов, в частности нефтепроводов, связано с решением целого ряда проблем, в том числе и проблем гидравли-

ческого расчета систем и потоков с изменяющимся по длине расходом протекающей жидкости. Рассматриваемые течения довольно часто встречаются в распределительных устройствах, поэтому эффективный расчет характеристик такого потока представляет важную