

УДК 621.454.2.034.2

**И. А. ВОРОНЬКО, Д. И. ЗАВИСТОВСКИЙ***Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина***СТРУКТУРНАЯ ФУНКЦИЯ АСИММЕТРИЧНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ВИХРЕВЫХ ТРАКТОВ И УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ НА ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ В НИХ**

*Предложен аналитический способ определения структурной функции асимметричных цилиндрических вихревых трактов (ЦВТ), являющихся основой форсуночных устройств для воздушно-реактивных горелок и технологических газогенераторов. Рассмотрены особенности геометрических характеристик асимметричных ЦВТ с учётом уже известных зависимостей, определяющих регулярную структуру симметричных ЦВТ. Определён физический смысл и влияние структурной функции на гидравлические потери в ЦВТ, а также общность полученных зависимостей для ограниченных и цилиндрических вихревых трактов. Предложен способ учёта влияния шероховатости поверхности на гидравлические потери в ЦВТ.*

**Ключевые слова:** структурная функция, цилиндрический вихревой тракт, технологический газогенератор, форсуночные устройства, гидравлические характеристики ЦВТ, шероховатость поверхности.

**Введение**

Цилиндрические вихревые тракты [1] являются основой отдельного класса форсуночных устройств для ЖРД МТ, воздушно-реактивных горелок и технологических газогенераторов. В этой связи исследование гидравлической картины течения в сложной структуре ЦВТ имеет бесспорную актуальность. В работах [1, 2] показано наличие регулярной ячеистой структуры трактов, а также зависимость от неё их гидравлики.

Анализ структуры ЦВТ и получение для них структурной функции позволяет определять при исследовании цилиндрических вихревых трактов коэффициент гидродоли в одной ячейке с заданными геометрическими параметрами. Очевидно, что путевые потери определяются потерями в одной ячейке, количеством и способом их соединения.

Целью данной работы является проведение анализа структуры асимметричных ЦВТ (АЦВТ) для определения (полного или частичного) вида структурной функции, а также ограничение круга факторов, влияющих на путевые потери.

**Постановка задачи исследования**

По мнению многих исследователей дальнейшее совершенствование предпламенных процессов даёт широкие возможности по улучшению эксплуатационных свойств тепловых двигателей летательных аппаратов.

Анализ теоретических и экспериментальных

работ зарубежных и отечественных авторов [5-8] показывает, что ведётся активная разработка новых и совершенствование существующих узлов впрыска и смесеобразования, фронтных устройств различных типов тепловых двигателей. Исходя из вышесказанного, проверка любых идей и конструктивных разработок, направленных на интенсификацию диспергирования жидких топлив заслуживает пристального внимания.

Разработка форсуночных устройств различных типов на основе вихревых трактов предполагает использование, как правило, только трактов цилиндрического типа. Поэтому в дальнейшем речь будет идти лишь о ЦВТ, что, однако, не исключает обращения к результатам, полученным другими исследователями для ограниченных вихревых трактов, с целью анализа получаемых экспериментальных данных и определения границ их применимости.

В работе [3] в качестве одного из определяющих геометрических параметров при определении путевых потерь в ограниченном вихревом тракте был назван угол  $\varphi$ , характеризующий асимметрию вихревого тракта

Исследования, выполненные в работе [1], а также авторами настоящей статьи, указывают на существенное влияние асимметрии цилиндрического вихревого тракта на путевые потери в нём.

Угол  $\varphi$  характеризует характер соединения элементарных ячеек между собой, т.е. структуру тракта. Тогда целесообразно путевые потери в цилиндрических вихревых трактах определить следующим образом:

$$p = \bar{\xi}(\text{Re}; \psi; \bar{t}; \bar{R}; \bar{\Phi} \dots) S(\varphi) \frac{\Delta l \rho W^2}{d_3 \cdot 2}, \quad (1)$$

где  $\psi; \bar{t}; \bar{R}; \bar{\Phi}$  – геометрические параметры вихревого тракта [1, 3];

$S(\varphi)$  – структурная функция ЦВТ, зависящая от асимметрии тракта;

$\Delta l, d_3$  – длина участка и эквивалентный диаметр ЦВТ;

$\rho, W$  – плотность и скорость потока.

Таким образом, физический смысл структуры вихревого тракта состоит в том, что некая безразмерная величина  $S(\varphi)$  определяет влияние способа соединения ячеек между собой на потери в ЦВТ с определёнными геометрическими параметрами этих ячеек.

Учитывая периодическую структуру ЦВТ, заключающуюся в том, что рабочее тело при своём движении по тракту последовательно проходит идентичные пояса ячеек (рис. 1), каждый из которых на гидродинамически стабилизированном участке течения создаёт равное гидросопротивление, и на основании контрольных измерений, выполненных по методике работы [4], удалось определить зависимость падения давления в СЦВТ от длины тракта

$$\Delta p = \xi' \frac{\Delta l \rho W^2}{l \cdot 2}, \quad (2)$$

где  $\Delta l$  – длина участка тракта;

$\xi'$  – коэффициент путевых потерь одного пояса скрещиваний.

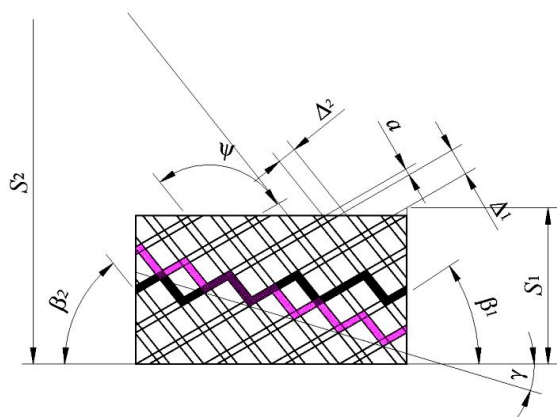


Рис. 1. К анализу периодичности структуры цилиндрических вихревых трактов

Условимся рассматривать лишь тракты, имеющие одинаковые размеры канавок на втулке и корпусе. До настоящего времени именно такие тракты подтвердили тот положительный эффект, который они дают при организации с их помощью смешения

жидкостей, её распыления, процессов теплопереноса. Качественные представления о процессе течения в вихревых трактах также позволяют ограничиться рассмотрением лишь трактов с одинаковыми канавками втулки и корпуса. Однако общность рассуждений и выводов при этом не будет нарушена, что будет показано ниже.

### Аналитическое определение структурной функции АЦВТ

Переопределим термин «ячейка», введённый в работе [1]. Под элементарной ячейкой тракта будем понимать одно скрещивание канавок и прилегающие перемычки (рис. 2). Пояса скрещивания таких ячеек будут образовывать некоторый угол  $\gamma$  с плоскостью входа потока в тракт. Количество заходов винтовых канавок втулки и корпуса можно выразить следующим образом:

$$n_1 = \frac{\pi D \sin \beta_1}{a + \Delta_1}, \quad n_2 = \frac{\pi D \sin \beta_2}{a + \Delta_2}. \quad (3)$$

Здесь  $D$  – диаметр сопряжения втулки и корпуса;

$a$  – ширина канавки в нормальном сечении;

$\Delta_1$  и  $\Delta_2$  – ширина перемычек втулки и корпуса в нормальном сечении.

Определим расстояния  $x_1$  и  $x_2$  (ширину канавки и перемычки в сечении, перпендикулярном оси тракта; см. рис. 2):

$$x_1 = \frac{\pi D}{n_1}, \quad x_2 = \frac{\pi D}{n_2}. \quad (4)$$

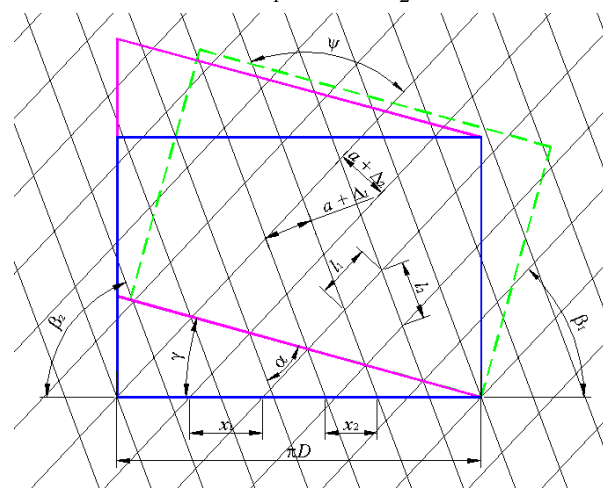


Рис. 2. К определению структурной функции АЦВТ

Тогда длины сторон ячейки можно определить следующими формулами:

$$l_1 = \frac{x_1 \sin \beta_1}{\sin \psi} = \frac{\pi D \sin \beta_1}{n_1 \sin \psi} = \frac{a + \Delta_1}{\sin \psi},$$

$$l_2 = \frac{x_2 \sin \beta_2}{\sin \psi} = \frac{\pi D \sin \beta_2}{n_2 \sin \psi} = \frac{a + \Delta_2}{\sin \psi}. \quad (5)$$

Рассмотрим элементарную площадку соприкосновения потоков каналов втулки и корпуса (см. схему на рис. 3). Из рисунка видно, что искомый угол  $\gamma$  равен

$$\gamma = \beta_2 - \alpha. \quad (6)$$

Следует оговориться, что формула (5) справедлива для случая, когда  $n_1 < n_2$ . При  $n_1 > n_2$  аналогичные рассуждения приводят к формуле

$$\gamma = \beta_1 - \alpha, \quad (7)$$

и, следовательно, во всех последующих выкладках угол  $\beta_1$  нужно заменить углом  $\beta_2$ . Угол  $\alpha$  является вспомогательной геометрической характеристикой АЦВТ, не имеющей определённого физического смысла, и необходим для дальнейших выкладок.

Проведя геометрический анализ и некоторые преобразования можно определить, что

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha &= \frac{a + \Delta_1}{b} = \frac{(a + \Delta_1)}{\frac{(a + \Delta_2)}{\sin \psi} - \frac{(a + \Delta_1) \cos \psi}{\sin \psi}} = \\ &= \frac{\sin \psi}{\frac{a + \Delta_2}{a + \Delta_1} - \cos \psi}. \end{aligned} \quad (8)$$

Вполне очевидно, что

$$\sin \alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 \alpha}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\left(\frac{a + \Delta_2}{a + \Delta_1} - \cos \psi\right)^2}{\sin^2 \psi}}}, \quad (9)$$

$$\cos \alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\sin^2 \psi}{\left(\frac{a + \Delta_2}{a + \Delta_1} - \cos \psi\right)^2}}}. \quad (10)$$

Тогда один из основных геометрических параметров АЦВТ — угол  $\gamma$ , может быть выражен следующими соотношениями:

$$\gamma = \beta_2 - \alpha = \beta_2 - \arcsin \left( 1 + \frac{\left(\frac{a + \Delta_2}{a + \Delta_1} - \cos \psi\right)^2}{\sin^2 \psi} \right)^{-\frac{1}{2}}; \quad (11)$$

$$\gamma = \beta_2 - \alpha = \beta_2 - \arccos \left( 1 + \frac{\sin^2 \psi}{\left(\frac{a + \Delta_2}{a + \Delta_1} - \cos \psi\right)^2} \right)^{-\frac{1}{2}}. \quad (12)$$

Из рисунка 3 видно, что

$$\begin{aligned} m &= l_2 \sin \alpha; \\ l &= \frac{m}{\cos \gamma} = \frac{l_2 \sin \alpha}{\cos \gamma} = \frac{(a + \Delta_2) \sin \alpha}{\sin \psi \cos \gamma}. \end{aligned} \quad (13)$$

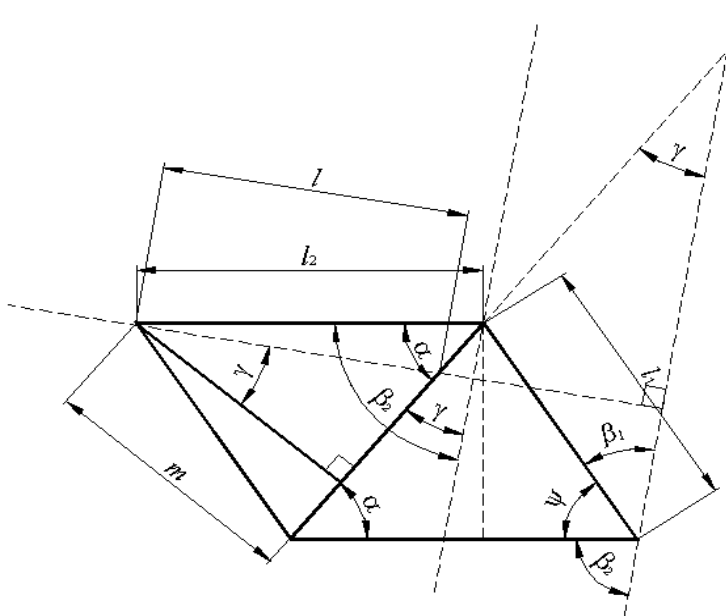


Рис. 3. Схематическое представление площадки соприкосновения потоков в АЦВТ

Выражение (13) совместно с (9) и (10) позволяет получить следующее выражение для величины  $l$ , как функции основных геометрических характеристик АЦВТ

$$l = \frac{a + \Delta_2}{\cos \beta_2 \cdot \frac{a + \Delta_2}{a + \Delta_1} - \cos(\psi + \beta_2)}. \quad (14)$$

В работе [1] величины  $a$  и  $\Delta$  предлагается заменить на их безразмерные аналоги, тогда

$$l = \frac{d_3(\bar{\Phi} + \bar{\Delta}_2)}{\cos \beta_2 \cdot \frac{\bar{\Phi} + \bar{\Delta}_2}{\bar{\Phi} + \bar{\Delta}_1} - \cos(\psi + \beta_2)}. \quad (15)$$

Гидропотери в АЦВТ могут быть записаны следующим образом [1]

$$\Delta p = \xi' \frac{\Delta l}{l} \frac{\rho W^2}{2} \quad (16)$$

или

$$\Delta p = \bar{\xi} \frac{\Delta l}{d_3} \cdot \frac{\cos \beta_2 \cdot \frac{\bar{\Phi} + \bar{\Delta}_2}{\bar{\Phi} + \bar{\Delta}_1} - \cos(\psi + \beta_2)}{\bar{\Phi} + \bar{\Delta}_2} \cdot \frac{\rho W^2}{2}. \quad (17)$$

Теперь из полученной формулы нетрудно выделить структурную функцию, определяющую геометрию асимметричных ЦВТ

$$S(\varphi) = \frac{\cos \beta_2 \cdot \frac{\bar{\Phi} + \bar{\Delta}_2}{\bar{\Phi} + \bar{\Delta}_1} - \cos(\psi + \beta_2)}{\bar{\Phi} + \bar{\Delta}_2} =$$

$$= \frac{\cos \beta_2}{\bar{\Phi} + \bar{\Delta}_1} - \frac{\cos(\psi + \beta_2)}{\bar{\Phi} + \bar{\Delta}_2}. \quad (18)$$

На рис. 4 приведены зависимости структурной функции  $S(\varphi)$  от угла скрещивания  $\psi$  при различных значениях угла  $\beta_2$ .

### Влияние шероховатости поверхности

Известно, что с возрастанием шероховатости  $S$ , коэффициент трения  $\lambda_{тр}$  возрастает во всем диапазоне чисел  $Re$ . Для гладких цилиндрических труб можно использовать формулу Альтшуля

$$\lambda_{тр} = 0,11 \left( \frac{S}{d_3} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25} \quad (19)$$

где  $d_3$  – эквивалентный диаметр канала.

Введём коэффициент  $K_S$ , учитывающий шероховатость поверхности. Его удобно представить в следующем виде

$$K_S = \frac{\lambda_{тр\text{ шер}}}{\lambda_{тр\text{ глад}}} = 0,35 Re^{0,25} \left( \frac{S}{d_3} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25} \quad (20)$$

Например, для канавок, полученных обработкой резанием, с шероховатостью  $R_z = 2$  мкм, величина  $\frac{S}{d_3} \approx 0,001$  при  $d_3 = 2$  мм. Тогда при  $Re = 2 \cdot 10^4$  коэффициент  $K_S = 1,072$ .

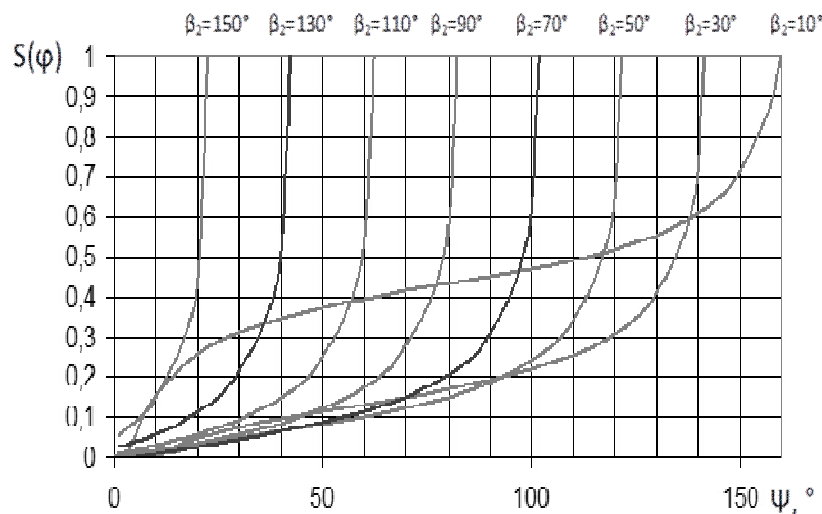


Рис. 4. График зависимости структурной функции  $S(\varphi)$  от угла скрещивания каналов  $\psi$  при фиксированных значениях угла  $\beta_2$  ( $\bar{\Phi} = 1,25$ ;  $D = 0,03$  м)

## Заключение

Предложен способ аналитического определения структурной функции асимметричных цилиндрических вихревых трактов, как основного элемента форсуночных устройств технологических газогенераторов.

Показана общность зависимостей, описывающих гидравлические потери в ограниченных и цилиндрических вихревых трактах.

Отмечена существенная зависимость гидравлического сопротивления ЦВТ от значений структурной функции.

Перспективным является нахождение оптимума структурной функции из условия минимизации гидросопротивления ЦВТ.

Предложен способ учёта влияния шероховатости поверхности на гидравлические потери в ЦВТ.

Используя гидродинамическое подобие течений в каналах полученные результаты можно распространить на форсуночные устройства полноразмерных воздушно-реактивных и жидкостных ракетных двигателей.

## Литература

1. Грушенко, А. М. *Жидкостные и газожидкостные форсунки с взаимно перекрещивающимися каналами и их использование для распыления топлив тепловых двигателей летательных аппаратов [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.07.05 / Грушенко Александр Михайлович. – Харьков : Харьк. авиац. ин-т, 1987. – 231 с.*

2. Завистовский, Д. И. *Методы расчета цилиндрических вихревых трактов ракетных и воздушно-реактивных двигателей [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.07.05 / Завистовский Дмитрий Игоревич. – Харьков : Харьк. авиац. ин-т, 2003. – 174 с.*

3. Говард, К. П. *Характеристики теплопередачи и гидравлического сопротивления теплообменных поверхностей со скошенными каналами и поверхностей из стеклокерамики [Текст] / К. П. Говард // Энергетические машины и установки: Тр. амер. об-ва инженеров-механиков. – 1965. – Сер. А., № 1. – С. 85-101.*

4. Орлин, С. А. *Экспериментальное исследование теплообмена и гидравлического сопротивления в кольцевых трактах с компланарными каналами [Текст] / С. А. Орлин, С. А. Поснов // Вопросы двигателестроения: Тр. МВТУ. – М. : МВТУ, 1984. – № 417. – С. 9-22.*

5. Морозова, И. В. *Усовершенствование процессов в камере сгорания тепловых двигателей путем электрофизического воздействия на углеводородное топливо [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.03 / Морозова Ирина Владимировна. – Киев : Нац. авиац. ун-т, 2016. – 159 с.*

6. Киселев А. С. *Оптимизация штыревых форсунок для камеры сгорания мощного ЖРД. [Текст] : А. С. Киселев // Труды XXXII: сб. науч. тр. / Фед. косм. агентство, НПО Энергомаш им. ак. В. П. Глушко. – М., 2015. – С. 4-22.*

7. Elliott, R. M. *Development of a gas-liquid injector for liquid rocket engine [Electronic resource] / R. M. Elliott, P. T. Lacava // Proc. 20th International Congress of Mechanical Engineering, November 15-20, 2009. – Gramado, RS, Brazil, 2009. – Access mode: <http://www.abcm.org.br/anais/cobem/2009/pdf/COB09-1971.pdf>. – 12.05.2017.*

## References

1. Grushenko, A. M. *Zhidkostnye i gazozhidkostnye forsunki s vzaimno perekreshchivayushchimisya kanalami i ikh ispol'zovanie dlya raspyleniya topliv teplovykh dvigatelei letatel'nykh apparatov*. Dis. ... kand. tekhn. nauk [Liquid and gas-liquid injectors with mutually intersecting channels and their using for propellant atomizing in heat engines of flight vehicles]. Khar'kov, Khar'k. aviats. in-t. Publ., 1987. 231 p.

2. Zavistovskii, D. I. *Metody rascheta tsilindricheskikh vikhrevykh traktov raketnykh i vozdushno-reaktivnykh dvigatelei*. Dis. ... kand. tekhn. nauk [Calculation methods of cylindrical vortex tracts of rocket and air-breathing engines]. Khar'kov, Khar'k. aviats. in-t. Publ., 2003. 174 p.

3. Govard, K. P. *Kharakteristiki teploperedachi i gidravlicheskogo soprotivleniya teploobmennyykh poverkhnostei so skoshennymi kanalami i poverkhnostei iz steklokeramiki* [Heat transfer and hydraulic resistance characteristics of heat-exchange surfaces with sloping channels and surfaces from glass-ceramic]. *Energeticheskie mashiny i ustanovki: Tr. amer. ob-va inzhenerov-mekhanikov – Journal of engineering for power. Transactions of the ASME*, 1965, ser. A, no. 1, pp. 85-101.

4. Orlin, S. A. *Eksperimental'noe issledovanie teploobmena i gidravlicheskogo soprotivleniya v kol'tsevykh traktakh s komplannymi kanalami* []. *Voprosy dvigatelestroeniya Tr. MVTU – Engine building questions, MHTS*. Moskva, MVTU, 1984, no. 417, pp. 9-22.

5. Morozova, I. V. *Usovershenstvovanie protsessov v kamere sgoraniya teplovykh dvigatelei putem elektrofizicheskogo vozdeistviya na uglevodorodnoe toplivo*. Dis. ... kand. tekhn. nauk [Improvement of processes in combustion chamber of heat engines by electro-physical impact on hydrocarbon propellant]. Kiev, Nats. aviats. un-t. Publ., 2016. 159 p.

6. Kiselev A. S. *Optimizatsiya shtyrevykh forsunok dlya kamery sgoraniya moshchnogo ZhRD* [Optimization of pin injectors for combustion chamber of power LPRE]. *Trudy XXXII, sb. nauch. tr., Fed. kosm. agentstvo, NPO Energomash im. ak. V. P. Glushko* [Proceedings XXXII, Federal space agency, NPO Energomash], Moscva, 2015. pp. 4-22.

7. Elliott, R. M. Development of a gas-liquid injector for liquid rocket engine. *Proc. 20th International Congress of Mechanical Engineering, November 15-20, 2009*, Gramado, RS, Brazil. Available at: <http://www.abcm.org.br/anais/cobem/2009/pdf/COB09-1971.pdf> (accessed 12.05.2017).

*Поступила в редакцию 12.09.2017, рассмотрена на редколлегии 23.11.2017*

## СТРУКТУРНА ФУНКЦІЯ АСИМЕТРИЧНИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ВИХРОВИХ ТРАКТІВ І УРАХУВАННЯ ВПЛИВУ ШОРСТКОСТІ ПОВЕРХНІ НА ГІДРАВЛІЧНІ ВТРАТИ У НИХ

*I. O. Voronko, D. I. Zawistovskiy*

Запропоновано аналітичний спосіб визначення структурної функції асиметричних циліндричних вихрових трактів (АЦВТ), які є основою форсунокових пристроїв для повітряно-реактивних пальників та технологічних газогенераторів. Розглянуто особливості геометричних характеристик асиметричних ЦВТ з урахуванням вже відомих залежностей, що визначають регулярну структуру симетричних ЦВТ. Визначено фізичний зміст та вплив структурної функції на гідравлічні втрати в ЦВТ, а також спільність отриманих залежностей для обмежених та циліндричних вихрових трактів. Запропоновано спосіб урахування впливу шорсткості поверхні на гідравлічні втрати у ЦВТ.

**Ключові слова:** структурна функція, циліндричний вихровий тракт, технологічний газогенератор, форсунокові пристрої, гідравлічні характеристики ЦВТ, шорсткість поверхні.

## STRUCTURE FUNCTION OF ASYMMETRICAL CYLINDRICAL VORTEX TRACTS AND SURFACE ROUGHNESS ACCOUNTING ON HYDRAULIC LOSSES IN THEM

*I. A. Voronko, D. I. Zawistovskiy*

The aim of this work is the analysis of the structure of the asymmetrical cylindrical vortex tracts to determine the form of structure function, and limiting the circle of factors affecting travel loss.

The analysis of theoretical and experimental works of foreign and domestic authors was done. The analysis has shown that the active development of new ones and improvement of existing injection and mixture formation units, front-line devices of different types of heat engines is carried out.

According to many researchers, further improvement of pre-flaming processes provides ample opportunities to improve operational properties of flight vehicles heat engines.

The analytic method of definition of structure function of asymmetrical cylindrical vortex tracts which are the base of injector units for air-feed jet burners and technological gas-generators has been proposed. The researches of the authors point to a significant effect of the asymmetry of a cylindrical vortex tract on travel loss in it. The analysis of cylindrical vortex tracts structure and obtaining structure function for them lets determine the hydraulic loss coefficient in single cell with given geometric parameters.

The features of asymmetrical cylindrical vortex tracts geometrical characteristics with the account of already known relations for cylindrical vortex tracts defining regular structure of symmetrical cylindrical vortex tracts have been considered. The physical meaning and influence of structure function on hydraulic loss in cylindrical vortex tracts and also community of relations given for limited and cylindrical vortex tracts has been defined. The tracts with the same dimensions of grooves on bush and body were considered. These tracts confirm positive effect at the organization of mixing and atomizing liquids and heat transfer processes. Qualitative ideas about the process of flow in vortex tracts also let consider the cylindrical vortex tracts with the same grooves.

The method of impact of surface roughness accounting on hydraulic losses in cylindrical vortex tracts has been proposed. The known Altshul's formula transformed for cylindrical vortex tracts has been obtained.

**Keywords:** structure function, cylindrical vortex tract, technological gas-generator, injector units, hydraulic characteristics of CVT, surface roughness.

**Воронько Ирина Алексеевна** – ассистент каф. технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: [irina-voronko@ukr.net](mailto:irina-voronko@ukr.net).

**Завистовский Дмитрий Игоревич** – канд. техн. наук, доцент каф. конструкций и проектирования ракетной техники, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: [rocketenginestalks@gmail.com](mailto:rocketenginestalks@gmail.com).

**Voronko Iryna** – Assistant of the Dept. of Technology of Aircraft Manufacturing, National Aerospace University “Kharkov Aviation Institute”, Kharkov, Ukraine, e-mail: [irina-voronko@ukr.net](mailto:irina-voronko@ukr.net).

**Zawistovskiy Dmitry** – PhD, Assistant Professor of the Dept. of Constructions and Design of Rocket Technics, National Aerospace University “Kharkov Aviation Institute”, Kharkov, Ukraine, e-mail: [rocketenginestalks@gmail.com](mailto:rocketenginestalks@gmail.com).