

УДК 621.453.034.3:621.646.7

А.М. ГРУШЕНКО, А.Л. КИРЬЯНЧУК

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Украина

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СМЕСЕОБРАЗУЮЩЕГО УЧАСТКА В АСИММЕТРИЧНОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ВИХРЕВОМ ТРАКТЕ

*Рассмотрена задача по определению протяженности смесеобразующего участка при совместном течении двух жидкостей через цилиндрический вихревой тракт (ЦВТ). Представлена методика экспериментальных исследований смесеобразования при канальном течении разнородных жидкостей в ЦВТ. Предложена методика количественной оценки экспериментальных данных по смешению разнородных жидкостей в проточных трактах с взаимно перекрещивающимися каналами, основанная на цветовой идентификации состава образовавшейся смеси, с использованием стандартных программных продуктов, применяемых при обработке цифровых изображений. Определена зависимость протяженности смесеобразующего участка ЦВТ от геометрических характеристик его проточной части и режимных параметров течения жидкостей.*

**Ключевые слова:** смесеобразующий участок, смесеобразование, цилиндрические вихревые тракты, взаимно перекрещивающиеся каналы, цветовая идентификация, массообмен.

### Введение

Смешение жидкостей в проточных элементах на основе цилиндрических трактов со взаимно перекрещивающимися каналами представляет практический интерес ввиду компактности таких устройств и существенной интенсификации процессов массообмена между группами сопрягаемых каналов [1, 2]. В настоящее время достаточно полно исследованы процессы диссипации энергии в таких трактах и процессы диспергирования жидкостей в пневматических форсунках ячейкового типа [3]. Закономерности смешения разнородных жидкостей и минимизация потерь на функционирование таких устройств в настоящее время мало изучены.

### 1. Формулирование проблемы

Интенсивность процессов массообмена в ЦВТ определяет как диссипацию (потери) энергии в потоке, так и потенциальную возможность смешения разнородных жидкостей. В первом случае дифференцируют нестабилизированное течение на входном участке ЦВТ и гидродинамически стабилизированное течение, когда потери в тракте подчиняются модифицированному для ЦВТ закону Дарси-Вейсбаха [4]:

$$\Delta p = \xi K \frac{\sin \psi}{\sin \beta_2 (\bar{\Phi} + \Delta)} \cdot \frac{\Delta l}{d_3} \cdot \frac{\rho W^2}{2}, \quad (1)$$

где  $K$  – коэффициент взаимного влияния ячеек в ветви;

$\bar{\xi}$  – путевые потери в одной ячейке с заданными геометрическими характеристиками;

$\Delta l$  – осевая протяженность участка ЦВТ;

$d_3$  – эквивалентный диаметр одного канала;

$\rho$  – плотность жидкости;

$W$  – скорость течения жидкости;

$\bar{\Phi} = a/d_3$  – безразмерная ширина канала в его

нормальном сечении на диаметре сопряжения втулки и корпуса;

$\bar{\Delta} = \Delta/d_3$  – безразмерная ширина перемычки в нормальном сечении на диаметре сопряжения втулки и корпуса;

$\beta_2$  – угол подъема винтовой линии одной группы каналов, при этом  $\beta_2 \geq \beta_1$ ;

$\psi$  – угол скрещивания каналов.

Поскольку массообмен в каналах ЦВТ определяет не только гидравлические потери, но и способность тракта выполнять функции смесителя, то уместно предположить, что количественные и качественные показатели смешения двух разнородных по реологическим свойствам жидкостей также определяется числами  $Re$  и геометрическими особенностями ЦВТ.

В качестве аналога начального (нестабилизованного) участка течения в ЦВТ в случае смешения следует принять участок ЦВТ, который обеспечивает полное перемешивание разнородных жидкостей. Этот участок назван нами смесеобразующим участком. Физический смысл этого нового термина состоит в следующем – на осевой длине смесеобразующего участка, начиная со входа в него разнород-

ных жидкостей, происходят и полностью заканчиваются процессы их смешения, и дальнейшее течение по тракту уже смешанных жидкостей за пределами этого участка не приводит к улучшению качества их смешения, а лишь увеличивает потери на прокачивание. Уместно предположить, что для некоторых случаев течения разнородных по реологическим свойствам жидкостей длина смесеобразующего участка  $\bar{l}_{см}$  может совпадать с длиной  $\bar{l}_{нач}$  начального участка течения с потерями, но в общем случае –  $\bar{l}_{нач} \neq \bar{l}_{см}$ .

Следовательно, проблема изучения смешения жидкостей в ЦВТ может быть сформулирована следующим образом – определение безразмерной длины смесеобразующего участка ЦВТ как функцию  $Re_1$ ,  $Re_2$ , геометрических особенностей ЦВТ, где  $Re_1$ ,  $Re_2$  числа Рейнольдса для разнородных жидкостей на входе в ЦВТ.

## 2. Критерии качества смешения разнородных жидкостей

Качество смешения двух разнородных жидкостей может быть определено по-разному для растворимых и нерастворимых жидкостей. Для нерастворимых, как правило, различных по реологическим свойствам жидкостей, качество смешения определяется временем существования их суспензии, которое может исчисляться от нескольких минут до нескольких десятков часов.

Для растворимых жидкостей качество их смешения в смесительном устройстве может быть определено как достижение заданного по условиям эксперимента массового соотношения смешиваемых жидкостей. Например, две разнородные жидкости имеют на входе в ЦВТ определенные значения  $Re_1$  и  $Re_2$ , что при заданной геометрии тракта, будет соответствовать расходам  $\dot{m}_1$  и  $\dot{m}_2$  этих жидкостей на входе.

Под полным или завершенным смешением будет подразумеваться факт равенства соотношения масс разнородных жидкостей при отборе проб их смеси по длине тракта заданному соотношению масс  $\dot{m}_1 / \dot{m}_2$  на входе в ЦВТ (до смешения):

$$\frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_2} = (K_{1,2})_{эксп}, \quad (2)$$

где  $(K_{1,2})_{эксп}$  – концентрация первой жидкости во второй.

Вполне очевидно, что если на определенной осевой длине тракта мы получим смесь, концентрация которой соответствует соотношению (2), дальнейшее увеличение осевой протяженности ЦВТ не

имеет смысла, так как количественный критерий качества смешения жидкостей в потоке достиг своего максимума.

Количественный критерий качества смешения  $(K_{1,2})_{эксп}$  может быть применен и для несмешиваемых жидкостей, однако при этом необходимо брать во внимание и качественный показатель процесса смешения – время существования полученной суспензии, которое может зависеть не только от определяющих параметров  $Re_1$ ,  $Re_2$ , геометрических характеристик ЦВТ, но также и от наличия кавитационных процессов в смесительном устройстве, масштаба турбулентности, температуры и т.д. В случае количественной оценки качества смешения для растворимых жидкостей мы резонно предполагаем, что величина  $(K_{1,2})_{эксп}$  характеризует и полноту перемешивания жидкостей. Это связано с тем, что отбор проб осуществляется через капиллярные отверстия, имеющие выход на самые удаленные от  $D_{ср}$  поверхности ЦВТ.

## 3. Особенности геометрической структуры асимметричного ЦВТ

Как и в случае симметричного ЦВТ, проточная часть асимметричного тракта образована двумя группами многозаходных винтовых канавок, выполненных на корпусе и втулке тракта. Появление термина асимметричный связано с тем, что углы подъема винтовых линий канавок корпуса и втулки различны, а следовательно различно и их количество. На рис. 1 изображена развертка асимметричного вихревого тракта, образованного шестизаходными винтовыми канавками корпуса и двенадцатизаходными винтовыми канавками втулки. Видно, что в данном случае также формируется характерная ячейковая структура проточной части тракта.

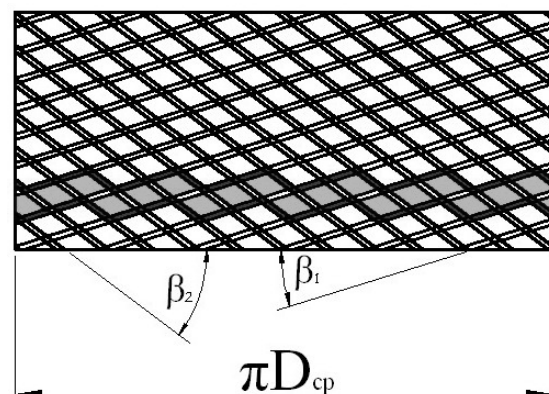


Рис. 1. Схема формирования ячейковой структуры асимметричного ЦВТ (развертка по среднему диаметру сопряжения  $D_{ср}$ )

Затонированные на рис. 1 области иллюстрируют связь между ячейками одного пояса скрещиваний. Как можно видеть, для асимметричного ЦВТ (АЦВТ) также существует регулярно повторяющаяся структура, при этом ячейки группируются в параллельные ветви, которые образуют (аналогично симметричному ЦВТ) повторяющиеся пояса скрещиваний. Длина одного повторяющегося пояса скрещиваний  $\bar{l}$  в общем случае определяется по известной зависимости:

$$\bar{l} = \frac{d_3 (\bar{\Phi} + \bar{\Delta}) \cdot \sin \beta_2}{\sin \psi} \quad (3)$$

#### 4. Экспериментальные исследования

Для определения длины смесеобразующего участка ЦВТ различной геометрической структуры при различных числах  $Re_1$  и  $Re_2$  на входе в вихревой тракт были созданы исследовательские модели ЦВТ с различной структурой (симметричные и асимметричные ЦВТ). Отбор проб смешиваемых жидкостей осуществлялся через капиллярные каналы, осевое расположение которых было кратно длине одного пояса скрещивания каналов, а выход капиллярных отверстий пробоотборников позиционировался на внутренней поверхности винтовых канавок корпуса модели на наибольшем расстоянии от  $D_{cp}$ . Это обеспечивало минимальное влияние отбора проб на гидродинамику процесса, позволило определять количественный показатель смешения  $(K_{1,2})_{эксп}$  и утверждать о его идентичности по всему поперечному сечению смешиваемого потока.

Осевая длина моделей смесителей (рис. 2) в несколько раз превышала длину начального участка нестабилизированного течения в ЦВТ[5], что предопределяло возможность нахождения длины участка смешения.

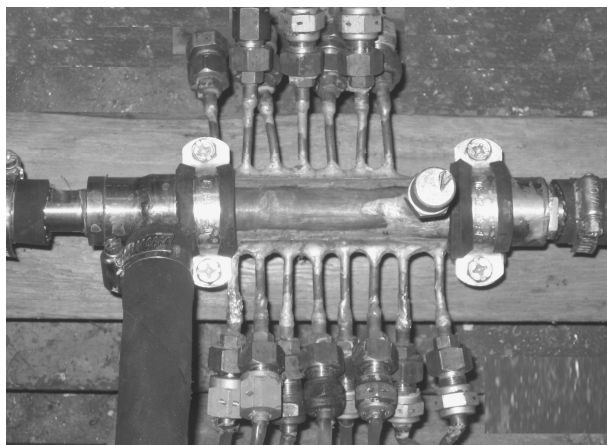


Рис. 2. Экспериментальный образец ЦВТ

Расход двух растворимых жидкостей измерялся тарированными расходомерами с точностью  $\pm 1\%$ . В качестве смешиваемых жидкостей использовались чистая и подкрашенная водорастворимым темносиним пигментом вода. Реологические свойства жидкостей считались идентичными. Количественный показатель смешения  $(K_{1,2})_{эксп}$  определялся для проб смеси из каждого пробоотборника по интенсивности синего цвета. Для этого непосредственно перед экспериментом готовились эталоны проб смешанных жидкостей для различных значений концентрации подкрашенной жидкости в чистой воде в исследуемом диапазоне концентраций.

Стендовое оборудование позволяло задавать значения  $\dot{m}_1$  и  $\dot{m}_2$  на входе в исследуемый тракт, где  $\dot{m}_1$  - расход подкрашенной воды, а  $\dot{m}_2$  - чистой воды. Вполне очевидно, что полное смешение жидкостей происходило тогда, когда одна из проб смешанных жидкостей будет иметь интенсивность окраски, идентичную интенсивности окраски эталонной смеси с концентрацией  $\dot{m}_1 / \dot{m}_2$ . Для значений  $\dot{m}_1$  и  $\dot{m}_2$  определялись значения  $Re_1$  и  $Re_2$ , что наряду со знанием геометрических характеристик ЦВТ ( $d_3, \bar{l}, \beta_2, \beta_1, D_{cp}$ ) позволило изучать процессы смешения жидкостей в зависимости от режимных параметров и конструктивных особенностей ЦВТ.

Для оценки результатов экспериментов применена методика цветовой идентификации состава смеси. Суть методики состоит в следующем.

При помощи цифровой фотокамеры осуществляется фотофиксация цветовой гаммы эталонных смесей жидкостей, изготовленных непосредственно перед проведением эксперимента в диапазоне концентраций  $(K_{1,2})_{эт} = 0, \dots, m_1 / m_2$ , а также цветовой гаммы заборов проб, полученных в процессе эксперимента, с концентрацией  $[(K_{1,2})_{эксп}]_n$ , где  $n=1 \dots 12$  - порядковый номер заборной магистрали. Фотофиксация осуществлялась при идентичных условиях освещенности, с использованием белого экрана и применением равнонаполненных цилиндрических пробирок. Очевидно, что каждая эталонная и полученная в процессе отбора проб смесь будет характеризоваться цветом с определенной интенсивностью оттенка используемого красителя. После получения фотографических изображений всех смесей при помощи прикладных программных продуктов для работы с изображениями, формируется последовательный набор цветных пронумерованных прямоугольных элементов, номера которых соответствуют номерам заборных магистралей, а цвет соответствует цвету отобранных через них

проб смесей. После этого при помощи стандартных функций прикладных программ осуществляется цветовое преобразование изображения, а именно замена одного цвета на другой. В качестве заменяющего цвета нами был выбран черный (выбор цвета не ограничен), а заменяемый цвет выбирался непосредственно из выше упомянутого последовательного набора цветов проб.

В результате такой операции указанный нами цвет преобразовывался в черный, при этом преобразование происходило для всех проб. В случае совпадения цветов в соседних прямоугольных элементах происходило размытие границы между ними и их слияние в одну область. Один из результатов такой обработки изображения представлен на рис. 3.

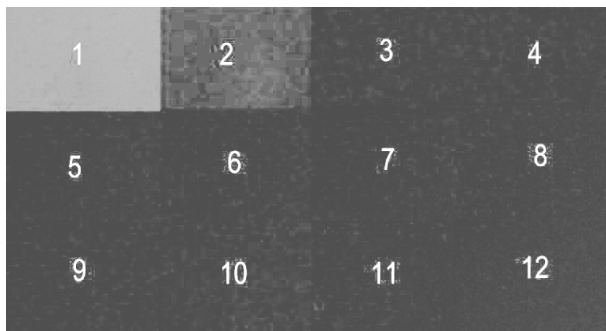


Рис. 3. Результат цветового преобразования изображения

Как видно, четкие границы сохранились у прямоугольных элементов под номерами 1 и 2, все остальные элементы слились в единую закрашенную область. Таким образом, мы можем сделать вывод, что осевая протяженность смесеобразующего участка, то есть участка, на котором процессы смесеобразования завершились в полной мере, определяется третьей заборной магистралью.

Аналогичным образом производится цветовая идентификация конечной концентрации смеси, с той лишь разницей, что картина аналогичная рис. 3 должна быть сформирована при сопоставлении изображений экспериментальных и эталонных смесей.

Так как точность определения концентрации жидкостей при идентификации зависит от количества заранее приготовленных эталонных смесей и от дискретности разбивки диапазона концентраций, процесс подготовки эталонных смесей становится громоздким и может привести дополнительным случайным и систематическим погрешностям. Для исключения этого была разработана методика цветовой интерполяции, суть которой состоит в следующем.

Изначально готовится ограниченное количество эталонных смесей с диапазоном разбивки по кон-

центрациям в 10%. С помощью тех же стандартных программных продуктов цветовой интервал между двумя эталонными концентрациями, отличающимися на 10 % дробится (интерполируется) по цвету дополнительно еще на 10 цветовых участков. В результате эталонной становится цветовая гамма, соответствующая концентрациям с диапазоном дискретности 1%. Таким образом, существенно уменьшается громоздкость и стоимость экспериментальных исследований, повышается точность и достоверность полученных результатов.

## 5. Результаты исследований

Как было отмечено выше, исследование смешения осуществлялось для двух разнородных по цвету модельных жидкостей с одинаковыми реологическими свойствами. Пролитки смесительного устройства осуществлялись в диапазоне чисел Рейнольдса  $Re \sim 9 \cdot 10^3 \dots \sim 3 \cdot 10^4$ , отношение количества каналов втулки ( $n_1$ ) и корпуса ( $n_2$ ) составляло  $n_1 / n_2 = 0.375 \dots 2$ , при этом массовая концентрация находилась в диапазоне  $\dot{m}_1 / \dot{m}_2 = 0.5 \dots 2$ . Так как диапазон исследованных чисел Рейнольдса соответствовал сформировавшемуся развитому турбулентному режиму течения в АЦВТ [6], определение концентрации проб, взятых по длине тракта с использованием изложенной выше методики цветовой идентификации, позволило установить факт неравенства длины участка заверченного смешения длине начального участка, характеризующего протяженность гидродинамически неустановившегося течения в АЦВТ при всех значениях чисел Рейнольдса рассмотренного диапазона. Осевая протяженность смесеобразующего участка составила примерно 6 поясов скрещивания и может быть определена как:

$$\bar{l}_{см} = \frac{6d_3(\bar{\Phi} + \bar{\Delta}) \cdot \sin \beta_2}{\sin \psi}, \quad (4)$$

или в безразмерном виде:

$$\frac{\bar{l}_{нач}}{d_3} = \frac{6(\bar{\Phi} + \bar{\Delta}) \cdot \sin \beta_2}{\sin \psi}. \quad (5)$$

Зависимости справедливы в исследуемом диапазоне значений величин  $\psi = 0,272 \dots 2,59$  рад,  $\beta_1 = 0,272 \dots 0,839$  рад,  $\beta_2 = 0,272 \dots 0,567$  рад.

## Заключение

Полученные результаты позволяют сделать выводы о целесообразности использования АЦВТ в качестве устройств для смешения жидкостей.

Осевая длина устройств на базе АЦВТ, которая обеспечивает полное смешение растворимых жидкостей невелика, поэтому они могут применяться не

только в стационарных условия смешения, но и в объектах АКТ.

### Литература

1. Савостин А.С. Исследование характеристик пластинчатых поверхностей нагрева / А.Ф. Савостин, А.М. Тихонов // Теплоэнергетика. – 1970. – № 9. – С. 75-78.

2. Говард (С.Р. Novard) Характеристики теплопередачи и гидравлического сопротивления теплообменных поверхностей со скошенными каналами и поверхностей из стеклокерамики / Говард (С.Р. Novard) // Энергетические машины и установки: Тр. америк. об-ва инженер. механ. – 1965. – №1. – С. 85-101.

3. Мартиросян А.А. Экспериментальное исследование двухкомпонентных форсунок с компланарны-

ми каналами / А.А. Мартиросян, Ф.В. Пелевин // Процессы горения и охрана окружающей среды: сб. тр. Рос. науч. конф. – Ч. I. – Рыбинск, 1997. – С. 92-95.

4. Грушенко А.М. Определение потерь в цилиндрических вихревых трактах / А.М. Грушенко // Проблемы машиностроения. – 1987. – Вып. 28. – С. 96-98.

5. Завистовский Д.И. Приведенный коэффициент расхода для несимметричных цилиндрических вихревых трактов (НЦВТ) / Д.И. Завистовский // Авиационно-космическая техника и технология : сб. науч. тр.; Гос. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 2000. – Вып. 19. Тепловые двигатели и энергоустановки. – С. 133-135.

6. Завистовский Д.И. Методы расчета цилиндрических вихревых трактов ракетных и воздушно-реактивных двигателей: Дис... канд. техн. наук: 05.07.05 / Завистовский Д.И. – Х., 2003. – 174 с.

Поступила в редакцию 2.06.2009

**Рецензент:** д-р физ.-мат. наук, проф. А.В. Бастеев, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

### ВИЗНАЧЕННЯ ДОВЖИНИ СУМІШОУТВОРЮЮЧОЇ ДІЛЯНКИ В АСИМЕТРИЧНОМУ ЦИЛІНДРИЧНОМУ ВИХРОВОМУ ТРАКТІ

*О.М. Грушенко, О.Л. Кир'янчук*

Розглянуто задачу по визначенню довжини сумішоутворюючої ділянки при спільному плинні двох рідин через циліндричний вихровий тракт (ЦВТ). Представлено методіку експериментальних досліджень сумішоутворення при каналному плинні різнорідних рідин у ЦВТ. Запропонована методіка кількісної оцінки експериментальних даних по змішанню різнорідних рідин у проточних трактах із взаємно перехресними каналами, заснована на колірній ідентифікації складу суміші що утворилася, з використанням стандартних програмних продуктів, застосовуваних при обробці цифрових зображень. Визначено залежність довжини сумішоутворюючої ділянки ЦВТ від геометричних характеристик його проточної частини і режимних параметрів плинну рідин.

**Ключові слова:** сумішоутворююча ділянка, сумішоутворення, циліндричні вихрові тракти, взаємо перехресні канали, колірна ідентифікація, масообмін.

### DEFINITION OF FULL MIXTURE PART LENGTH IN ASYMMETRICAL CYLINDRICAL VERTICAL TRACTS

*A.M. Grushenko, A.L. Kiryanchuk*

The objective of full mixture part length in case of joint flow of two liquids through cylindrical vertical tracts (CVT) is considered. The principle of carburetion experimental investigation in case of channel flow of heterogeneous liquids through ACVT is represented. The principle of experimental data quantitative assessment of heterogeneous liquid carburetion in flowing tracts with mutually criss-cross canals based on color identification of formed mixture and realized with the use of standard software for digital images processing is proposed. The dependence of full mixture part length from CVT setting geometrical characteristic and operating conditions is defined.

**Key words:** full mixture part, carburetion, cylindrical vertical tracts, mutually criss-cross canals, color identification, mass exchange.

**Грушенко Александр Михайлович** – канд. техн. наук, доцент кафедры ракетных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: aagrushenko@mail.ru.

**Кирьянчук Александр Леонидович** – инженер кафедры ракетных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: kirya@ukr.net.