

УДК 532.593:541.24

А. В. ДАВЫДОВА

Днепропетровский национальный университет им. Олеса Гончара, Украина

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СЕТЧАТЫХ РАЗДЕЛИТЕЛЕЙ ФАЗ В НЕСТАЦИОНАРНОМ ЖИДКОСТНОМ ПОТОКЕ

В работе представлена методика выполнения и приведены результаты экспериментальных исследований коэффициента гидравлического сопротивления сетчатых разделителей фаз в нестационарном потоке жидкости на этапе включения двигателей космических летательных аппаратов. Экспериментально установлено, что коэффициент гидравлического сопротивления зависит от величины ускорения жидкостного потока. Предложена эмпирическая зависимость для определения коэффициента гидравлического сопротивления сетчатых разделителей фаз в зависимости от чисел Фруда и Рейнольдса. Эту зависимость предлагается использовать при проведении расчетов проектных параметров средств обеспечения сплошности топлива космических летательных аппаратов.

Ключевые слова: космические летательные аппараты, топливо, сетчатые разделители фаз, гидравлическое сопротивление.

Введение

Одним из основных конструктивных элементов системы подачи топлива космических летательных аппаратов (КЛА) различного назначения являются средства обеспечения сплошности топлива (СОСТ). Эти устройства должны обеспечивать поступление топлива из баков КЛА в сливную магистраль без газовых включений на протяжении всего времени полета летательного аппарата. Для выполнения этой задачи были разработаны и успешно эксплуатируются СОСТ разного принципа действия [1]. Поскольку требования к условиям работы СОСТ постоянно усложняются, то появляются их новые модификации [2]. Несмотря на большое разнообразие конструкций СОСТ, наиболее широко распространены капиллярные СОСТ [3].

Конструктивно капиллярные СОСТ представляют собой перегородки из тканой металлической сетки, которые ограничивают некоторый внутрибаковый объем перед сливной магистралью [4]. Эти перегородки называют сетчатыми разделителями фаз (СРФ). В качестве разделителей фаз используются также перфорированные пластины [5] и пористо-сетчатые материалы [7].

Одним из основных проектных параметров капиллярных СОСТ является потеря давления в потоке топлива, проходящем через СРФ [3]. Поэтому определение коэффициента гидравлического сопротивления (ГС) СРФ во время выполнения КЛА полетного задания представляет значительный инте-

рес.

Анализ литературных данных

Оптимизации проектных параметров капиллярных СОСТ посвящено значительное количество работ. Работа [8] посвящена влиянию на функционирование СРФ перемещения топлива вдоль сетчатой поверхности. В работе [7] исследуется влияние вибраций на работоспособность СРФ. Особенности перемещения топлива в баках КЛА с СРФ под действием внешних силовых импульсов изучаются в работе [9]. В указанных выше публикациях предлагаются методики выбора оптимальных значений параметров СРФ.

Коэффициент ГС СРФ в указанных выше публикациях рассчитывается по зависимостям, которые учитывают среднюю скорость топлива, проходящего через сетчатую поверхность или пористо-сетчатые материалы. Однако в условиях быстрого роста расхода топлива, характерного для запуска двигательной установки, влияние ускоренного движения топлива через СРФ на значение текущих потерь давлений может быть существенно. Рост потери давления на СРФ при запуске ракетного двигателя может привести к пластической деформации СРФ вплоть до полного их механического разрушения. Следовательно, необходимо уточнение расчета коэффициента гидравлического сопротивления СРФ в условиях существенно нестационарного движения топлива.

Для определения ГС СРФ обычно используется принцип квазистационарности, т. е. ГС СРФ в слу-

чае ускоренного течения жидкости считается таким же, как и в стационарном потоке, имеющим скорость, равную мгновенной скорости жидкости нестационарного течения. В тоже время, квазистационарное приближение оказывается достаточно точным только в случае малых ускорений потока жидкости. В работе [10] проведен теоретический анализ влияния на коэффициент ГС СРФ нестационарности жидкостного потока, и предложена уточненная зависимость для расчета коэффициента ГС СРФ. Однако в [10] отмечается, что теоретическая зависимость нуждается в экспериментальной проверке.

Цель и задачи исследований

Анализ литературных данных, приведенный выше, показывает, что в настоящее время отсутствует экспериментально подтвержденная методика расчета коэффициента ГС СРФ в существенно нестационарном потоке жидкости. Поэтому целью данной работы является экспериментальное изучение влияния на величину ГС СРФ ускорения потока жидкости, проходящего через поверхность СРФ, и получение экспериментально подтвержденной зависимости для расчета ГС СРФ.

Описание экспериментальной установки

Для исследования значения коэффициента ГС СРФ в нестационарном потоке жидкости была разработана экспериментальная установка (ЭУ), основные элементы которой представлены на рис. 1, а общий вид - на рис. 2.

Установка состоит из расходного блока, блока проливки и заправочно-сливной системы. Расходный блок включает реверсивный двигатель постоянного тока 6, который соединяется через редуктор 5 с поршнем 4. Электродвигатель подключен к специальному блоку питания 10, который осуществляет регулировку скорости вращения вала двигателя. Расходный блок установлен на металлической опоре, изолированной от остальной установки. Через тройник поршень стыкуется при помощи гибких трубопроводов с блоком проливки и с заправочно-сливной системой.

Блок проливки (см. рис. 1) представляет собой цилиндрическую емкость, изготовленную из оргстекла высотой 500 мм и внутренним диаметром 10 мм. Блок состоит из двух частей, которые соединяются между собой при помощи винтов. В области стыковки частей блока существует особое расширение для установки чувствительного кольца. На кольцо устанавливается исследуемый образец СРФ. Более подробно речь об этом будет идти ниже.

В верхней части проливочного блока размещен

штуцер 3 для сообщения внутренней полости с атмосферой. В нижней части проливочного блока расположен штуцер 11 для связи его через гибкий трубопровод с расходным блоком. Блок проливки устанавливается строго вертикально при помощи специального регулировочного столика.

Заправочно-сливная система состоит из сливной емкости 8, которая через гибкий трубопровод и вентиль 9 сообщается с установкой.

Основным чувствительным элементом установки является кольцо 1 (см. рис. 1), принципиальная схема которого показана на рис. 3, а общий вид - на рис. 4. Опорная кольцевая пластина 2 (см. рис. 3) изготовлена из нержавеющей стали. К этому кольцу при помощи винтов крепится стальная рамка с СРФ 1. К рамке посредством пайки прикрепляется исследуемый образец СРФ диаметром 10 мм.

Измерение текущего перепада давления на кольце производится системой тензодатчиков 3 – 10, приклеенных в меридиональных плоскостях, на нижней и верхней поверхностях кольца 2. Через специальный герметичный разъем тензодатчики сообщаются с тензоусилителем и далее со светолучевым осциллографом.

Главной регистрируемой при проведении экспериментов величиной является текущий перепад давлений на СРФ. Расход жидкости определяется при помощи датчика перемещений, который регистрирует смещение поршня в зависимости от времени.

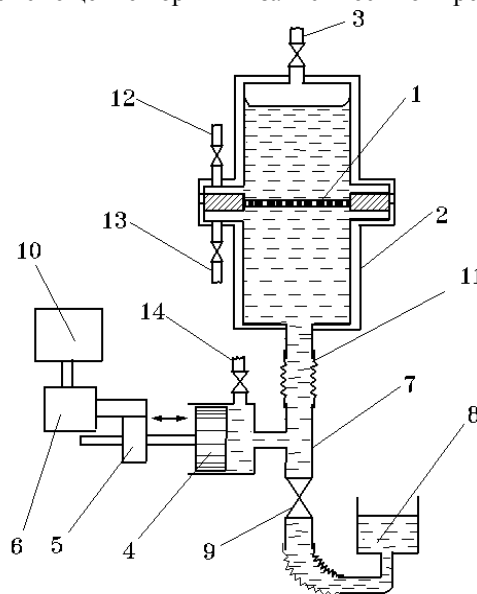


Рис. 1. Принципиальная схема ЭУ по исследованию ГС СРФ в нестационарном жидкостном потоке: 1 - кольцо с СРФ; 2 - модельная жидкость; 3 - штуцер; 4 - поршень; 5 - редуктор; 6 - электродвигатель; 7 - сливная магистраль; 8 - заправочная емкость; 9 - вентиль; 10 - блок питания; 11 - сливной штуцер; 12, 13, 14 - дренажные штуцеры



Рис. 2. Общий вид ЭУ по исследованию ГС СРФ в нестационарном жидкостном потоке

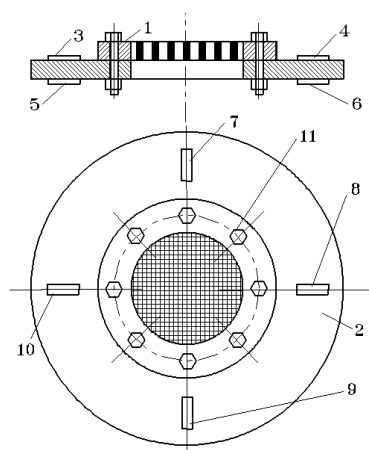


Рис. 3. Тензометрическое металлическое кольцо с исследуемым образцом СРФ: 1 - рамка с СРФ; 2 - опорная пластина; 3 - 10 - тензодатчики; 11 - винты крепления

Методика проведения экспериментов

Исследуемый образец СРФ закрепляется на опорном кольце и происходит сборка проливочного блока. Измерительный блок проливки устанавливается на подставку, которая регулировочными винтами приводится в строго горизонтальное положение. Гибкими трубопроводами проливочный блок соединяется с расходным блоком и заправочно-сливной системой. Все штуцеры установки находятся в открытом положении.

После этого открывается вентиль 9 (см. рис. 1) и производится заправка установки рабочей жидко-

стью. Расходный блок заполняется жидкостью полностью, а проливочный - до заданного уровня над СРФ. Для полного удаления газа из системы предусмотрены дренажные штуцеры 12-14. После заполнения системы жидкостью вентиль 9 закрывается. Подается напряжение на двигатель 6. После срабатывания концевого выключателя происходит обратное перемещение поршня в исходное положение. На двигатель подается новое значение напряжения, и эксперимент повторяется снова уже при другом уровне расхода. Нестационарный расход жидкости через СРФ происходит при включении и раскрутке двигателя 6 до постоянной частоты вращения.

Основными выходными величинами, получаемыми в ходе экспериментов, являлись коэффициент ГС СРФ ξ число Рейнольдса Re и число Фруда Fr , которые имеют вид

$$\xi = \frac{\Delta p_e}{(\rho V_e^2 / 2)}, \quad (1)$$

$$Re = \frac{V_e d_{\text{я}}}{\nu}, \quad (2)$$

$$Fr = \frac{V_e^2}{A_e d_{\text{я}}}, \quad (3)$$

где Δp_e - регистрируемый перепад давлений, кг/м²;

V_e - текущая скорость жидкости, м/с;

A_e - текущее ускорение жидкости, м/с².

Перепад давления на СРФ определялся при помощи чувствительного кольца, конструкция которого описывалась выше. При этом

$$\Delta p_e = L_1 \chi \tau, \quad (4)$$

где L_1 - координата выходного сигнала на осциллограмме, м;

χ - коэффициент чувствительности тензометрического моста, определяемый эмпирически, н/м³;

τ - коэффициент усиления.

Изменение координаты свободной поверхности жидкости, как функции времени, выражается формулой

$$L_2 = l_n K \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2, \quad (5)$$

где L_2 - относительная координата свободной поверхности жидкости в проливочном блоке, как функция времени, м;

l_n - координата поршня, как функция времени, м;

K - коэффициент преобразования выходного сигнала;

D_1 - внутренний диаметр поршня, м;

D_2 - внутренний диаметр блока проливки, м.

Соответственно скорость V_e и ускорение жидкости A_e определяются как первая и вторая производные от функции L_2 .

Методика обработки результатов измерений

Коэффициент ГС СРФ в нестационарном жидкостном потоке можно представить в виде

$$\xi = \xi_n + \xi_c, \quad (6)$$

где ξ_n - нестационарная составляющая коэффициента ГС ξ , которая определяется по уравнению [10]

$$\xi_n = \frac{\gamma}{Fr} + \frac{\delta}{\sqrt{Fr Re}}, \quad (7)$$

γ, δ - постоянные коэффициенты, подлежащие экспериментальному определению;

ξ_c - стационарная составляющая коэффициента ГС СРФ, которая определяется по уравнению

$$\xi_c = \alpha + \frac{\beta}{Re}. \quad (8)$$

Коэффициент ξ_c и постоянные α и β в (8) определяются при исследовании выбранного образца СРФ при стационарном расходе. Коэффициент ξ в (6) определяется при проведении проливки СРФ на переменном расходе. Затем определяется ξ_n как разность между ξ и ξ_c .

После численного расчета текущей средней скорости жидкости V_e , ускорения A_e определяются текущие значения чисел Рейнольдса Re и Фруда Fr .

После определения экспериментальных значений чисел Рейнольдса и Фруда, а также коэффициента гидравлического сопротивления СРФ при различных стационарных уровнях расхода с помощью методов регрессивного анализа, определялись коэффициенты α и β .

На следующем этапе аналогично находились значения γ и δ для аппроксимации нестационарной составляющей коэффициента ГС СРФ.

Результаты экспериментов

Эксперименты проводились на СРФ трех типов, основные геометрические параметры которых представлены в табл. 1.

В качестве рабочей жидкости использовался эталонный гексан с плотностью $\rho=660\text{кг/м}^3$ и кинематической вязкостью $\nu=0,430 \cdot 10\text{м}^2/\text{с}$. Технические характеристики реверсивного двигателя СД-150 допускали изменение стационарной скорости жидкости в блоке проливки от 0,2 до 1,3 м/с. Время t_c выхода двигателя на установившийся режим работы равнялось приблизительно 0,15с. Стационарное значение расхода жидкости определяется уровнем подаваемого на электродвигатель напряжения. Поскольку значение t_c практически не зависит от подаваемого напряжения, то возникает возможность создания на неустановившемся этапе работы двигателя

различных значений ускорения жидкостного потока в блоке проливки. При проведении экспериментов среднее ускорение жидкостного потока при выходе на стационарный режим варьировалось в диапазоне от 2,5 м/с² до 6,5 м/с².

Таблица 1

Основные геометрические характеристики исследовавшихся СРФ

п/п	Тип плетения	Диаметр проволоки плетения, мкм		Размер ячейки СРФ, мкм
		Основа	Уток	
1	полотно	50	50	80
2	полотно	36	36	50
3	фильтр	64	32	-

Перед проведением экспериментов по изучению ГС СРФ в нестационарном режиме была проведена серия экспериментов по определению коэффициента ГС СРФ в стационарном жидкостном потоке. Аппроксимирующие графические зависимости коэффициента ГС ξ_c от числа Рейнольдса Re_c по зависимости (8) и экспериментальные данные представлены на рис. 4.

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод, что зависимость коэффициента ГС СРФ любого типа плетения ξ_c от числа Рейнольдса достаточно точно описывается формулой (8).

Для СРФ №3 фильтрового типа плетения коэффициент β практически на два порядка превосходит соответствующий коэффициент для СРФ полотняного типа плетения, что объясняется особенностями внутренней геометрии таких СРФ.

Результаты экспериментов по определению ГС СРФ в нестационарном жидкостном потоке позволяют сделать следующие выводы. В функциональной зависимости (7) безразмерный комплекс $\frac{1}{\sqrt{Re Fr}}$ не оказывает значимого влияния на ГС СРФ в нестационарном жидкостном потоке. Во всяком случае, влияние этого слагаемого на величину ξ при исследованном диапазоне ускорений жидкостного потока и для указанных выше типов СРФ установлено не было. Кроме того, численное значение параметра γ в (7) существенным образом зависит от абсолютной величины ускорения жидкостного потока и от типа СРФ, что не учитывается зависимостью (7).

Используя метод показателей Релея [11], зависимость коэффициента ξ_n от числа Фруда можно представить в виде

$$\xi_n = \frac{C}{Fr^\lambda}, \quad (9)$$

где C, λ - постоянные коэффициенты.

При обработке результатов экспериментов по

методу наименьших квадратов для функциональной зависимости (9) было установлено, что для СРФ №1 и №2 $C=4,0 \cdot 10^3$, $\lambda=1,0$, а для СРФ №3 - $C=3,4 \cdot 10^3$, $\lambda=0,6$.

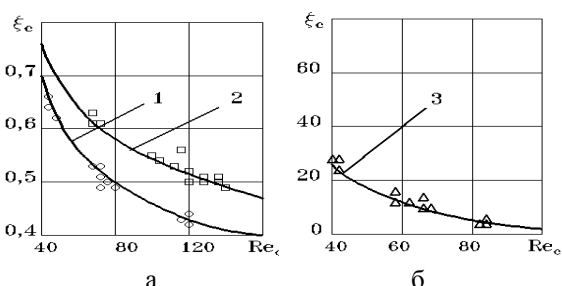


Рис. 4. Зависимость коэффициента ГС СРФ в стационарном жидкостном потоке ξ_c от числа Рейнольдса Re_c . Рабочая жидкость – гексан: а) 1, 2 - аппроксимирующие кривые по уравнению (8). Для кривой 1: $\alpha=0,3$; $\beta=6,1$. Для кривой 2: $\alpha=0,4$; $\beta=4,9$; \circ, \square - экспериментальные данные для СРФ №1 и №2, соответственно; б) 3 - аппроксимирующая кривая по уравнению (8) при $\alpha=8,9$; $\beta=392$; Δ - экспериментальные данные для СРФ №3

Аппроксимирующая кривая (9) и экспериментальные значения нестационарной составляющей коэффициента ГС $\xi_{н}$ представлены на рис. 5.

Таким образом, подводя итог проведенным экспериментальным исследованиям необходимо отметить следующее. Инженерная оценка потерь давления на СРФ при существенно нестационарном уровне расхода топлива должна выполняться с использованием зависимости

$$\xi = \alpha + \frac{\beta}{Re} + \frac{C}{Fr^\lambda}, \quad (10)$$

где α , β , C и λ - эмпирические постоянные, зависящие от типа используемого СРФ.

Для достоверной оценки потерь давления в стационарном и нестационарном потоке жидкости следует непосредственно определять входящие в зависимость (10) эмпирические коэффициенты для используемого СРФ по методике, изложенной выше. Подстановка в формулы коэффициентов взятых из справочной литературы может привести к существенным погрешностям при выполнении проектных расчетов.

Заключение

Экспериментальные исследования течения жидкости через СРФ, которые представлены выше, показывают, что ускорение жидкостного потока существенно влияет на величину коэффициента ГС СРФ. Установлено, что в зависимость для расчета

величины коэффициента ГС в нестационарном потоке жидкости должно входить, кроме числа Рейнольдса, также и число Фруда.

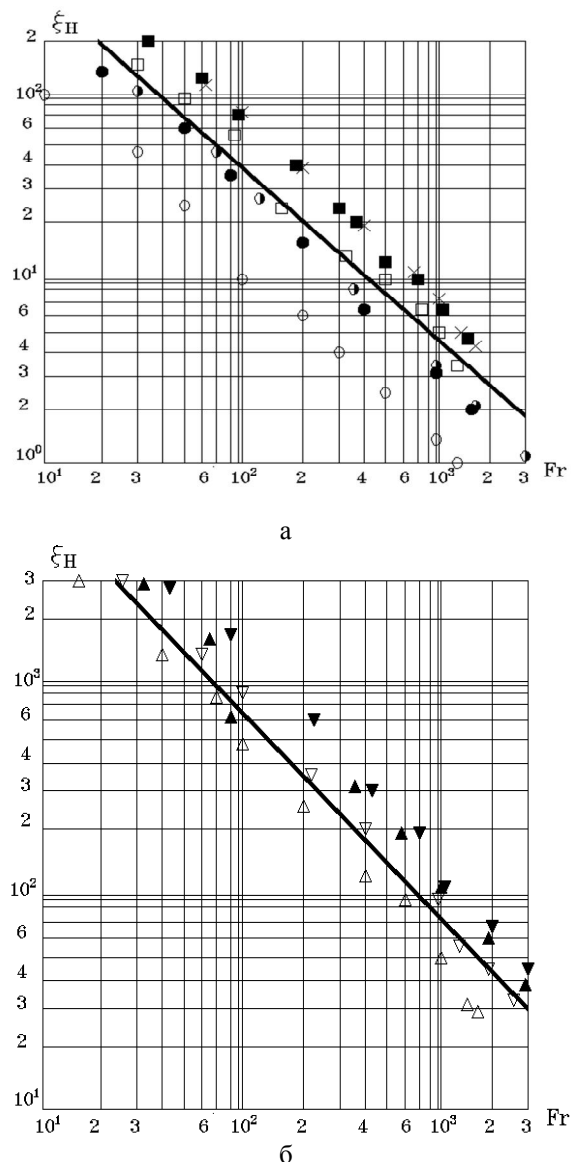


Рис. 5. Зависимость нестационарной составляющей коэффициента ГС $\xi_{н}$ СРФ от числа Фруда жидкостного потока Fr : а) эмпирические данные и аппроксимирующая кривая для СРФ №1 и №2: СРФ №1: \circ - $a_c = 2,67 \text{ м/с}^2$; \bullet - $a_c = 4,47 \text{ м/с}^2$; \ominus - $a_c = 6,53 \text{ м/с}^2$; СРФ №2: \square - $a_c = 4,40 \text{ м/с}^2$; \blacksquare - $a_c = 4,87 \text{ м/с}^2$; \times - $a_c = 5,20 \text{ м/с}^2$; б) эмпирические данные и аппроксимирующая кривая для СРФ №3: Δ - $a_c = 3,00 \text{ м/с}^2$; ∇ - $a_c = 4,40 \text{ м/с}^2$; \blacktriangle - $a_c = 5,00 \text{ м/с}^2$; \blacktriangledown - $a_c = 6,20 \text{ м/с}^2$

При проектировании сетчатых СОСТ КЛА нужно учитывать величину ускорения потока топлива при включении двигательной установки. Гидравлическое сопротивление СРФ в этих условиях может значительно превосходить ГС СРФ при работе двигателей КЛА на номинальном режиме.

Литература

1. Беляев, Н. М. Расчет пневмогидравлических систем ракет [Текст] / Н. М. Беляев. – М. : Машиностроение, 1983. – 219 с.
2. Пат. № 2458827 Россия. Топливная система летательных аппаратов [Текст] / Дмитриев А. И., Кликодуев Н. Г., Кучеренко Ю. С., Мищенко А. П. (Россия). – заявл. 27.05.2012; опубл. 20.08.2012.
3. Капиллярные системы отбора жидкости из баков космических летательных аппаратов [Текст] / В. В. Багров, А. В. Курпатенков, В. М. Поляев и др. ; под. ред. В. М. Поляева. – М. : УНПЦ «ЭНЕРГОМАШ», 1997. – 328 с.
4. Rollins, J. R. Twenty-three years of surface tension propellant management system design, development, manufacture, test and operation [Text] / J. R. Rollins, R. Grove, Jr. D. Jaekle // 21st Joint Propulsion Conference. – 1985. – № 833. – P. 9. doi:10.2514/6.1985-1199.
5. Tegart, J. R. Double perforated plate as a capillary barriers [Text] / J. R. Tegart, N. T. Wright // 19th Joint Propulsion Conference. – 1983. – № 1379. – P. 7. doi:10.2514/6.1983-1379.
6. Наземная отработка капиллярных фазоразделителей на основе комбинированных пористо-сетчатых материалов для топливных баков жидкостных ракетных двигателей верхних ступеней ракет-носителей, разгонных блоков и космических аппаратов [Текст] / В. Б. Сапожников, В. И. Крылов, Ю. М. Новиков, Д. А. Ягодников // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – Вып. 4. – С. 1–15.
7. Tegart, J. R. Effect of vibration on retention characteristics of screen acquisition systems [Text] / J. R. Tegart, A. C. Park // NASA CR. – № 135264. – 1977. – 165 p.
8. Давыдов, С. А. Расчет снижения удерживающей способности средств обеспечения сплошности раздела фаз [Текст] / С. А. Давыдов // Вісник Національного технічного університету «ХПИ» : збірник наукових праць. Нові рішення в сучасних технологіях. – 2010. – № 57. – С. 96–100.
9. Горелова, К. В. Моделирование динамики топлива в баках летательных аппаратов с учетом сетчатых фазоразделителей [Текст] / К. В. Горелова // Вісник Дніпропетровського університету : серія “Механіка”. – 2013. – Вип. 17, Т. 1. – С. 147–155.
10. Давыдова, А. В. Гидравлическое сопротивление сетчатых разделителей фаз в нестационарном потоке жидкости [Текст] / А. В. Давыдова // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 4/7 (70). – С. 25–29.
11. Шарп, Дж. Гидравлическое моделирование [Текст] / Дж. Шарп ; пер. с англ. Л. А. Яскина. – М. : Мир, 1984. – 280 с.

Поступила в редакцию 20.05.2015, рассмотрена на редколлегии 17.06.2015

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КОЕФІЦІЕНТУ ГІДРАВЛІЧНОГО ОПОРУ СІТЧАСТИХ РОЗДІЛЮВАЧІВ ФАЗ В НЕСТАЦІОНАРНОМУ РІДИННОМУ ПОТОЦІ

А. В. Давыдова

У роботі представлено методику виконання й наведено результати експериментальних досліджень коефіцієнта гідравлічного опору сітчастих розділювачів фаз у нестационарному потоці рідини на етапі включення двигунів космічних літальних апаратів. Експериментально встановлено, що коефіцієнт гідравлічного опору залежить від величини прискорення рідинного потоку. Запропоновано емпіричну залежність для визначення коефіцієнта гідравлічного опору сітчастих розділювачів фаз залежно від чисел Фруда й Рейнольдса. Цю залежність пропонується використати при проведенні розрахунків проектних параметрів засобів забезпечення суцільності палива космічних літальних апаратів.

Ключові слова: космічні літальні апарати, паливо, сітчасті розділювачі фаз, гідравлічний опір.

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF THE HYDRAULIC RESISTANCE COEFFICIENT OF THE MESH PHASES DELIMITERS IN UNSTEADY LIQUID FLOW

A. V. Davydova

The paper presents the method of implementation and the results of experimental investigations of the hydraulic resistance coefficient of the mesh phases delimiters in unsteady fluid flow on the stage turn on the spacecraft engines. It was established experimentally that the hydraulic resistance coefficient depends on the magnitude of the acceleration of the liquid flow. It was proposed the empirical correlation to determine the hydraulic resistance coefficient of the mesh phases delimiters depending on the Froude and Reynolds numbers. This dependence is proposed to use in the calculations of the design parameters of continuity ensure means of fuel spacecraft

Keywords: spacecraft, fuel, net phase delimiter, hydraulic resistance.

Давыдова Анжелика Владимировна – канд. техн. наук, доцент кафедры технологии производства физико-технического факультета, Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара, Днепропетровск, Украина, e-mail: serg_davydov@mail.ru.