

УДК 532.526

А. А. ЗУЕВ, Л. П. НАЗАРОВА, Е. В. ФАЛЬКОВА, Н. А. ДАНИЛОВ
Сибирский государственный университет науки и технологий
им. акад. М. Ф. Решетнева, Красноярск, Россия

ДИНАМИЧЕСКИ НЕСТАБИЛИЗИРОВАННЫЕ ТЕЧЕНИЯ В ПРОТОЧНЫХ ЧАСТЯХ ТУРБОНАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ

Рассматриваются динамически нестабилизированные течения, характерные для элементов проточных частей турбонасосных агрегатов жидкостных ракетных двигателей. С учетом различных степеней профиля распределения скорости в ламинарном и турбулентном потоках жидкости получены выражения для толщины пограничного слоя и скорости ядра потока при течении жидкости в сужающихся и расширяющихся каналах цилиндрического и прямоугольного поперечного сечения, а также в каналах полостей вращения переменного сечения.

Ключевые слова: участок динамически нестабилизированного течения, скорость, потери по длине, пространственный пограничный слой.

При исследовании агрегатов подачи жидкостных ракетных двигателей необходимо анализировать пространственные течения в элементах гидравлического тракта, который представляет собой совокупность каналов различной формы. Например, в турбонасосных агрегатах (ТНА), компрессорах и газовых турбинах это подводящее устройство турбин, полости вращения между ротором и стенкой газовой турбины, рабочим колесом и стенкой корпуса лопаточного нагнетателя, полости гидродинамических уплотнений. При этом жидкость движется по участкам и каналам цилиндрического и прямоугольного переменного сечения, также встречаются вращательные течения с неподвижными и вращающимися образующими. Такое разнообразие условий течения в проточных частях ТНА приводит к существенным различиям характерных параметров пограничного слоя и требует развития методик их расчета.

Аналізу течений в проточных частях посвящено значительное число исследований. При численных исследованиях потерь энергии в работе [1] использовались осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье – Стокса (RANS) в сочетании с моделью турбулентности переноса касательных напряжений (SST). В статьях [2, 3] численное моделирование на основе RANS, выполненное в сочетании с k - ω -моделью турбулентности, привело к результатам, соответствующим экспериментальным данным. Метод оптимизации конструкции многоступенчатого центробежного насоса на основе модели потерь энергии и расчетной гидродинамики (ELM/CFD) представлен в работе [4]. Авторы статей [5, 6] исследовали течение в ступенчатом микроканале, ана-

лизируя потери давления, профиль скорости, линии потока и коэффициент трения при различных условиях. Решения, связанные с применением численных методов, в том числе и [7, 8], требуют специализированного программного и аппаратного обеспечения и, как правило, не пригодны для инженерных расчетов на стадии эскизного проектирования.

В работе [9] в результате экспериментов установлена эмпирическая зависимость между коэффициентом трения и критерием Рейнольдса для ламинарного течения, которая может быть рекомендована только для ограниченного применения.

С целью достоверного определения параметров потока и гидравлических потерь на начальных динамически нестабилизированных участках, которые возникают в проточных частях ТНА, в представленной работе использованы профили скорости в пограничном слое, а также выражения касательных напряжений трения при ламинарном и турбулентном течениях для пластины [10], которые подставлялись в уравнение количества движения, предложенное Т. Карманом.

В результате математических преобразований получены выражения толщины пограничного слоя, толщины вытеснения и толщины потери импульса с учетом особенностей распределения скорости в ламинарном и турбулентном пограничном слое. Выполненные расчеты продемонстрировали, что толщины турбулентного пограничного слоя, полученные ранее Г. Шлихтингом [11], можно рассматривать как частный случай в рамках предлагаемой методики.

Также выведены формулы, позволяющие определять скорость ядра потока на разных расстояниях от начала участка динамически нестабилизированного течения в сужающихся и расширяющихся каналах цилиндрического и прямоугольного поперечного сечения, а также в каналах полостей вращения переменного сечения. Графики, построенные по полученным выражениям, хорошо согласуются с результатами иных авторов для ламинарного течения при степени профиля распределения скорости $m = 2$, а для турбулентного – при $m = 7$. В то же время в проточных частях ТНА значения степени профиля распределения скорости зависят от режима работы и могут быть иными.

Таким образом, в работе на основе учета особенности профилей распределения скорости в динамическом пограничном слое нестабилизированных течений получены выражения для определения его толщины в зависимости от координаты. Для характерных начальных участков элементов проточных частей ТНА получены выражения для оценки скорости потока в зависимости от длины канала и предложено выражение для оценки потерь. Выведенные формулы позволяют также оценить длину участка динамически нестабилизированного течения при ламинарном и турбулентном течениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Numerical research on the energy loss of a single-stage centrifugal pump with different vaned diffuser outlet diameters / F. Lai [et al.] // *Energy Procedia*. – 2019. – Vol. 158. – P. 5523–5528.

2 Numerical investigation of influence of the clocking effect on the unsteady pressure fluctuations and radial forces in the centrifugal pump with vaned diffuser / W. Jiang [et al.] // *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2016. – Vol. 71. – P. 164–171.

3 Efficient CFD evaluation of the NPSH for centrifugal pumps / M. Lorusso [et al.] // *Energy Procedia*. – 2017. – Vol. 126. – P. 778–785.

4 Optimal design of multistage centrifugal pump based on the combined energy loss model and computational fluid dynamics / C. Wang [et al.] // *Applied Energy*. – 2017. – Vol. 187. – P. 10–26.

5 **Bakhshan, Y.** Calculation of friction coefficient and analysis of fluid flow in a stepped micro-channel for wide range of Knudsen number using Lattice Boltzmann (MRT) method / Y. Bakhshan, A. Omidvar // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. – 2015. – Vol. 440. – P. 161–175.

6 Numerical study of laminar flow and friction characteristics in narrow channels under rolling conditions using MPS method / M. A. Basit [et al.] // *Nuclear Engineering and Technology*. – 2019. – Vol. 51, is. 8. – P. 1886–1896.

7 **Галактионов, А. Ю.** Численный расчет нестационарных аэродинамических характеристик цилиндрических моделей в условиях сверхзвукового ламинарного обтекания / А. Ю. Галактионов, А. И. Хлупнов // *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Машиностроение»*. – 2015. – № 5. – С. 4–13.

8 Расчетно-экспериментальное исследование аэродинамических характеристик биоратативного вентилятора с использованием различных программных комплексов / А. А. Мартиросян [и др.] // *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Машиностроение»*. – 2019. – № 2. – С. 115–130.

9 **Сабельников, В. А.** Численный расчет турбулентного течения на начальном участке плоского канала с острыми кромками методом дискретных вихрей / В. А. Сабельников, Е. А. Смирных // *Ученые записки ЦАГИ*, 1985. – Т. 16, № 4. – С. 59–64.

10 **Зуев, А. А.** Участки динамически нестабилизированных течений в характерных каналах проточных частей турбонасосных агрегатов жидкостных ракетных двигателей / А. А. Зуев, А. А. Арнгольд, В. П. Назаров // *Вестник Московского авиационного института*. – 2020. – Т. 27, № 3. – С. 167–185.

11 **Шлихтинг, Г.** Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. – М.: Наука, 1974. – 712 с.

A. A. ZUEV, L. P. NAZAROVA, E. V. FALKOVA, N. A. DANILOV

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia

DYNAMICALLY UNSTABILIZED FLOWS IN THE FLOW PATH OF TURBO-PUMP AGGREGATES

There are considered the dynamically unstabilized flows, which are typical for elements of the flow parts of turbopump aggregates of liquid-propellant rocket engines. Taking into account different degrees of the velocity distribution profile in laminar and turbulent fluid flows, there are obtained the expressions for the boundary layer thickness and the flow middle part velocity at fluid flow in narrowing and expanding channels of cylindrical and rectangular cross sections, as well as in channels of rotation cavities of variable cross section.

Keywords: section of dynamically unstabilized flow, velocity, losses along length, spatial boundary layer.

Получено 09.11.2021