

использования более детализированных моделей элементов двигателя.

Основные сложности заключаются в стыковке моделей узлов ГТД различной детализации между собой и автоматизации процесса проектирования с использованием многоуровневой модели.

Применение результатов данной работы на этапе концептуального проектирования позволит существенно сократить временные затраты и трудоёмкость при небольшом увеличении потребных вычислительных ресурсов в условиях неопределённости исходных проектных данных.

Поскольку результаты, полученные на данном этапе проектирования, используются в дальнейшем в качестве исходных данных

для более детализированного эскизного проектирования, то основное дальнейшее развитие многоуровневой модели заключается во включении в неё моделей вычислительной гидродинамики и прочностных моделей узлов ГТД, в том числе нестационарных, и более детализированных моделей систем управления двигателем.

Вторым направлением развития многоуровневой модели является использование нейронных сетей для сбора и анализа статистических данных. Использование нейронной сети позволит более обоснованно задавать параметры, имеющие высокий уровень неопределённости. Также это может позволить сократить номенклатуру используемых моделей элементов ГТД.

УДК 536.24

## ОСОБЕННОСТИ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА В КОРОТКИХ КАНАЛАХ ПРЕДЕЛЬНОЙ ШЕРОХОВАТОСТИ

©2018 А.И. Щелоков, И.В. Макаров, Ю.И. Рахимова

Самарский государственный технический университет

## CONVECTIVE HEAT-EXCHANGE FEATURES IN SHORT CHANNELS WITH ULTIMATE ROUGHNESS

Shchelokov A.I., Makarov I.V., Rakhimova Y.I. (Samara State Technical University, Samara, Russian Federation)

*Augmentation heat transfer by convection created in channel made by impacted rings screw-shaped spiral of tubing. Results were obtained to calculate the coefficients of hydraulic friction in the Reynolds number range from 5000 to 50000.*

Создание искусственной шероховатости поверхности нагрева является одним из наиболее эффективных методов интенсификации теплообмена.

Особенностью поверхности теплообмена в цилиндрических каналах из плотно сжатых витков винтовых змеевиков, является то обстоятельство, что в широком диапазоне изменения чисел Рейнольдса не возникает развитого дополнительного вихреобразования, а интенсификация теплообмена происходит за счёт развития поверхности и её конструктивных особенностей - чередования выступов межвитковых и впадин при поперечном обтекании витков змеевиковой поверхности, что приводит к дополнительной турбулизации потока, а также

увеличению степени черноты межвитковых впадин.

Группой авторов (Ибрагимов М.Х., Субботин В.И. и др. [1]) предложено выражение для расчёта коэффициента сопротивления трению шероховатой трубы в следующем виде:

$$\xi_{ш} = \xi_{гЛ} + \left(\frac{D}{S}\right) \cdot N \int_{F_6} \varphi(\gamma) \cdot \left[\frac{U(y)}{U}\right]^2 \cdot dF / F. \quad (1)$$

Как следует из этого выражения, общий (суммарный) коэффициент сопротивления состоит из двух слагаемых:

первое -  $\xi_{гЛ}$  - гидравлическое сопротивление гладкой трубы;

второе -  $\Delta_{ш}$  - превышение коэффициента гидравлического сопротивления шеро-

ховатой трубы  $\xi_{ш}$  над коэффициентом сопротивления гладкой трубы при том же числе Рейнольдса.

Тогда

$$\Delta_{ш} = \left(\frac{D}{S}\right) \cdot N \int_{F_6} \varphi(\gamma) \cdot \left[\frac{U(y)}{U}\right]^2 \cdot \frac{dF}{F}. \quad (2)$$

Здесь  $N$  - число элементов шероховатости на участке трубы длиной, равной продольному шагу  $S$ , т.е., в данном случае –  $N=1$ ;  $D$  - диаметр гладкой трубы. Для вычисления  $\xi_{ш}$  необходимо знать профиль скорости  $U(y)$  в пристеночной зоне, где располагаются элементы шероховатости, что в условиях неустановившегося потока в коротком канале ( $L/D < 5$ ) и внешних воздействий (химическое реагирование, неизотермичность потока, стесненное пространство) не поддается строгому математическому описанию.

Выступы шероховатостей увеличивают поверхность теплообмена, т.к. по сравнению с гладкой цилиндрической топкой обтекаемая поверхность витка возрастает в 3,14 раза на такой же длине топки. Возрастание теплообмена и сопротивления проявляются одновременно при достижении определённых значений чисел Рейнольдса, когда выступы и впадины омываются потоком теплоносителя и включаются в интенсивный теплообмен.

Таким образом, выявлено влияние шероховатости канала на конвективный теплообмен, численное значение которого определяется коэффициентом гидравлического трения, полученным опытным путём.

В силу указанных обстоятельств принимаем, что коэффициенты трения гладкого и шероховатого каналов описываются степенными зависимостями вида [2]:

$$\xi_{гг} = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} \quad (3)$$

(формула Блазиуса, гладкий канал),

$$\text{и } \xi_{ш} = 0,11 \left(\frac{\delta}{D}\right)^{0,25} \quad (4)$$

(формула Б.Л. Шифринсона, шероховатый канал).

Отсюда после преобразований с учётом (1) и (2) получим

$$\frac{\xi_{сум}}{\xi_{гг}} = 1 + \frac{\xi_{ш}}{\xi_{гг}} = 1 + \frac{0,11 \cdot \left(\frac{\delta}{D}\right)^{0,25}}{0,3164} \cdot Re^{0,25}, \quad (5)$$

или

$$\begin{aligned} \frac{\xi_{сум}}{\xi_{гг}} &= 1 + 0,348 \cdot \left(\frac{\delta \cdot W}{\nu}\right)^{0,25} = \\ &= 1 + 0,348 \cdot \left(\frac{k}{D} \cdot Re\right)^{0,25}. \end{aligned} \quad (6)$$

Выражение в скобках показывает влияние относительной шероховатости и динамических свойств потока. Так как профиль скорости неустановившегося течения в коротком канале при наличии химически реагирующего потока и внешних воздействий неизвестен, принимаем в качестве определяющей величины среднерасходную скорость в сечении цилиндрического канала.

Экспериментально показано, что определяемой видом шероховатости  $\Delta$  является величиной постоянной,  $\xi_{гг} = f(Re)$  – величиной переменной, убывающей с возрастанием числа  $Re$ , а коэффициент теплообмена (конвективного) может быть определён через критерий Стентона  $\alpha = \frac{\xi}{8} \cdot C_p \cdot \rho \cdot w$ .

#### Библиографический список

1. Структура турбулентного потока и механизм теплообмена в каналах [Текст] / [М.Х. Ибрагимов, В.И. Субботин, В.П. Бобков и др.]. – М.: Атомиздат, 1978. - 296 с.
2. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: Справочник / Под общ. ред. чл.-кор. РАН А.В. Клименко и проф. В.М. Зорина – М.: Изд-во МЭИ - 2001- 564 с. (Теплоэнергетика и теплотехника; Кн.2).