

*Досліджено теплообмін в трубі з хрестоподібною вставкою, яка встановлена з зазором до поверхні труби  $\delta=0...16$  мм. Збільшення зазору призводить до незначного росту теплообміну з максимальним значенням при  $\delta=8$  мм*

*Ключові слова: теплообмін, хрестоподібні вставки, інтенсифікація*

*Исследован теплообмен в трубе с крестообразной вставкой, установленной с зазором к поверхности трубы  $\delta=0...16$  мм. Увеличение зазора приводит к незначительному росту теплообмена с максимальным значением при  $\delta=8$  мм*

*Ключевые слова: теплообмен, крестообразные вставки, интенсификация*

*Heat transfer of studied in a tube with crusiform insert, which is installed with a gap  $\delta = 0 \dots 16$  mm. The increase of the gap leads to a slight increase the heat transfer with the maximum value when  $\delta = 8$*

*Key words: heat transfer, crusiform insert, intensification*

## ТЕПЛООБМЕН ПРИ ТЕЧЕНИИ ВОЗДУХА В КРУГЛОЙ ТРУБЕ С КРЕСТООБРАЗНОЙ ВСТАВКОЙ

**Т. В. Доник**

Аспирантка\*

Контактный тел.: (044) 456-93-02

E-mail: doniktv@uk.net

**А. А. Халатов**

Доктор технических наук, профессор, член-корресподент НАН Украины, заведующий отделом\*

Контактный тел.: (044) 456-93-02

E-mail: khalatov@vortex.org.ua

**И. И. Борисов**

Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник\*

Контактный тел.: (044) 453-28-53

E-mail: borisov@vortex.org.ua

\*Отдел высокотемпературной термогазодинамики  
Институт технической теплофизики НАН Украины  
ул. Желябова, 2а, г. Киев, Украина, 03057

### Введение

Проблема интенсификации теплообмена в трубах круглого поперечного сечения продолжает привлекать внимание исследователей в связи с разработкой новых энергетических установок, интенсивных технологических аппаратов, промышленных теплообменников, рекуператоров теплоты, химических реакторов. Для внутренней интенсификации теплообмена широко используются шнеки и скрученные ленты, аксиально-лопаточные завихрители, продольная и поперечная накатка трубы, углубления различной формы, турбулизация потока, оребрение поверхности.

Особый интерес представляет интенсификация теплообмена за счет установки в трубе сменных крестообразных вставок, которые технологичны в изготовлении и просты в использовании.

В настоящее время в литературе имеются ограниченные данные по теплообмену в трубе круглого сечения при установке крестообразных вставок [1, 2].

Цель настоящей работы – поиск новых форм крестообразных вставок с более высокими теплогидравлическими характеристиками. Для исследования выбран экспериментальный метод.

### Экспериментальная установка и методика проведения экспериментов

Схема экспериментальной установки для исследования теплообмена (газодинамический контур открытого типа) приведена на рис. 1. Поток воздуха от вентилятора 1 высокого давления ВВД - 5 проходил через заслонку 2 для регулирования расхода, расходомер Вентури 3, и далее поступал в экспериментальный участок 4 с внешним омическим нагревом, после чего выбрасывался в атмосферу.

Экспериментальный участок представляет собой стальную трубу с внутренним диаметром  $d = 0,066$  м и длиной  $l = 0,40$  м, с внешней стороны которой расположен электрический нагреватель с наружной теплоизоляцией. Длина обогреваемого участка трубы составляла 0,37 м. Перед входом в экспериментальный участок располагался предвключенный адиабатный участок с внутренним диаметром, равным диаметру обогреваемой трубы, и относительной длиной  $l/d=10$ .

Для интенсификации теплообмена в экспериментальный участок устанавливались 5 вариантов крестообразных вставок (рис. 2), отличающихся зазором  $\delta$  между вставкой и поверхностью трубы. Значение  $\delta$  составляло величину: 0 (плотный контакт вставки

с трубой); 2; 4; 8; 16 мм. Вставки изготавливались из стального листа толщиной 1 мм. Их длина соответствовала длине обогреваемого участка канала. Контроль зазора обеспечивался плотным контактом посадочных элементов с поверхностью трубы (рис. 2, б).

время выхода на стационарный режим при проведении экспериментов составляло 1,5 часа.

**Тестовые эксперименты**

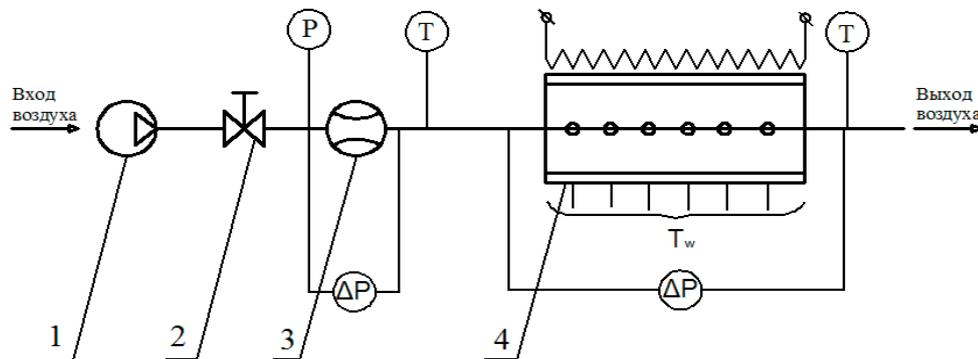


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – вентилятор ВВД-5; 2 – заслонка; 3 – расходомер Вентури; 4 – экспериментальный участок

В экспериментах измерялись расход воздуха с помощью расходомера Вентури, температура воздуха на входе в рабочий участок и на выходе из него, температура внутренней стенки трубы в семи точках хромель-алюмелевыми термопарами, электрические параметры нагревателя (ток и напряжение). Напряжение на клеммах омического нагревателя измерялось вольтметром Щ4313, а ток в спирали – с помощью шунта и цифрового милливольтметра В7–46/1.

Время выхода на стационарный режим при проведении экспериментов составляло 1,5 часа.

Метод №1 основан на использовании уравнения:

$$\bar{\alpha} = \frac{GC_p(\bar{T}_{\text{вых}} - T_{\text{вх}})}{F\Delta T_n}$$

где  $\bar{T}_{\text{вых}}$  – среднemasовая температура на выходе из экспериментального участка, К;  $T_{\text{вх}}$  – температура на входе в экспериментальный участок, К;  $F$  – площадь поверхности экспериментального участка, м<sup>2</sup>;  $\Delta T_n = \bar{T}_{\text{вых}} - T_{\text{вх}}$  – средний температурный напор, К;  $\bar{T}_w$  – средняя температура стенки, определяемая на основе измерений температуры в семи точках экспериментального участка.

Среднemasовая температура на выходе определялась на основе измерения профиля скорости и температуры [3],

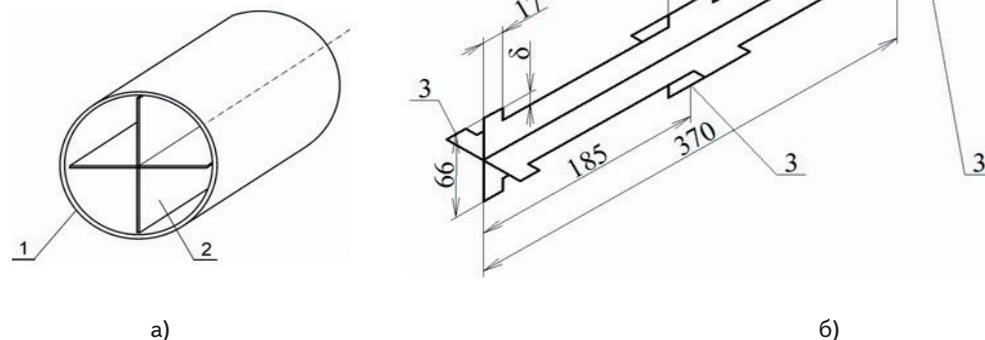


Рис. 2. Расположение крестообразной вставки в экспериментальном участке (а), общий вид крестообразной вставки с зазором и основные размеры, мм (б): 1 – стенка экспериментального участка; 2 – крестообразная вставка; 3 – посадочные элементы

Условия теплообмена были близки к закону  $q_w = \text{const}$ . Для измерения среднemasовой температуры на выходе из экспериментального участка использовалось смесительное устройство.

Диапазон изменения расхода воздуха в экспериментах составлял 0,034...0,089 кг/с, число Рейнольдса, вычисленное по диаметру трубы, изменялось от  $4 \cdot 10^4$  до  $9 \cdot 10^4$ , что соответствовало развитому турбулентному режиму течения. Температура воздуха на входе в канал составляла 21...28<sup>0</sup>С. Экспериментальный участок имел достаточно высокую теплоемкость, поэтому

для чего использовались трубка полного напора и хромель-алюмелевая термопара, закрепленная на координатном устройстве. Далее определялось среднее число Нуссельта  $\bar{Nu}_d = \frac{\bar{\alpha} \cdot d}{\lambda}$  и число Рейнольдса  $Re_d = \frac{4G}{\mu \pi d}$ .

Метод №2. Из интегрального уравнения теплового пограничного слоя [4] для условий эксперимента

$$\bar{T}_{\text{вых}} = \frac{2\pi \int_0^R \rho T_w r dr}{2\pi \int_0^R \rho w r dr}$$

( $q_w = \text{const}$ ) следует выражение, для числа  $Re_{T|x=1}^{**}$  на выходе из экспериментального участка

$$Re_{T|x=1}^{**} = \frac{(Nu_d)_{x=1}}{Pr} \cdot \frac{1}{d}, \quad (1)$$

где  $Re_{T|x=1}^{**} = \frac{w_\infty \cdot \delta_T^{**}}{\nu}$ ;  $\delta_T^{**} = \int_0^R \frac{w}{w_\infty} (1 - \frac{T - T_w}{T_f - T_w}) \frac{r}{R} dy$ ; - толщина потери энергии при  $x=1$ ;  $w_\infty$  - скорость в ядре потока и температура стенки  $T_w$  при  $x=1$ .

Из этого уравнения после измерения радиального профиля скорости и температуры можно определить значение  $\delta_T^{**}$ ,  $Re_{T|x=1}^{**}$ , локальное число Нуссельта  $Nu_d$  в выходном сечении экспериментального участка и далее средний коэффициент теплоотдачи  $\bar{Nu}_d$  по уравнению  $\bar{Nu}_d \approx 1,25 \cdot (Nu_d)_{x=1}$ .

**Метод №3.** Определение коэффициента теплоотдачи аналогично методу №1, с той разницей, что среднемассовая температура потока определялась с помощью смесительного устройства. Смесительное устройство представляет собой систему последовательных перегородок кольцевой и дисковой формы, в котором происходит перемешивание потока. Для измерения среднемассовой температуры использовалась хромель-алюмелевая термопара.

На рис. 3 представлены результаты тестовых экспериментов с обработкой опытных данных по трем указанным методам. Для сравнения использовалось уравнение Б.С. Петухова [5] и решение интегрального уравнения теплового пограничного слоя при  $q_w = \text{const}$  с учетом предвключенного адиабатного участка длиной  $x/d = 10$  [4]:

$$\bar{Nu}_d = 0,038 \cdot Re_d^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot \left(\frac{1}{d}\right)^{-0,2}.$$

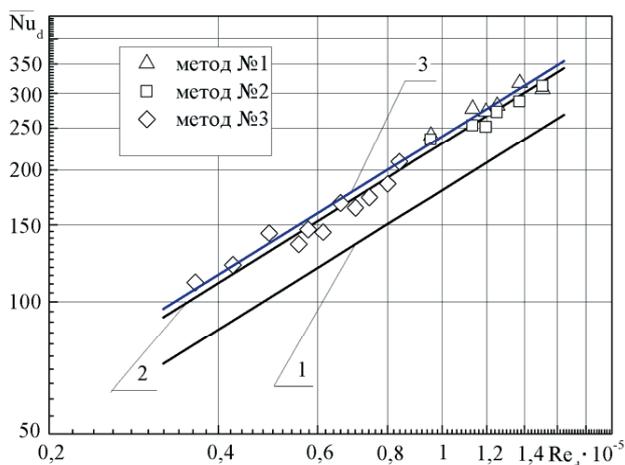


Рис. 3. Результаты тестовых экспериментов, проведенных тремя методами: 1 – стабилизированное турбулентное течение в трубе [6]; 2 – теплообмен в трубе с предвключенным адиабатным участком [4]; 3 – уравнение Б.С. Петухова [5]

Влияние длины предвключенного адиабатного участка учитывалось величиной скорости в ядре потока в пределах экспериментального участка (число  $Re_d$ ). На рис. 3 также приведено уравнение для средне-

го теплообмена на участке стабилизированного теплообмена.

Как видно из рисунка, данные тестовых экспериментов с погрешностью  $\pm 7\%$  согласуются с уравнением Б.С. Петухова и зависимостью для теплообмена в трубе с предвключенным адиабатным участком.

Как следует, результаты тестовых экспериментов с использованием трех методов хорошо согласуются с известными зависимостями [4] и [5]. Это свидетельствует о том, что установка и система измерений позволяют получать надежные результаты. Учитывая, что при использовании крестообразной вставки профили скорости и температуры имеют сложный трехмерный характер, в качестве метода определения средней теплоотдачи в дальнейших исследованиях выбран метод, основанный на применении смесительного устройства.

### Результаты экспериментов и их анализ

Результаты определения среднего теплообмена от нагретой трубы к воздушному потоку при установке вставки с различной величиной зазора в зависимости от числа  $Re_d$  представлены на рис. 4. Как следует, в области  $\delta = 0 \dots 8$  мм имеет место незначительное (7...25%) увеличение теплообмена по сравнению со случаем теплообмена в трубе без крестообразной вставки. При дальнейшем увеличении зазора от 8 до 16 мм происходит снижение теплообмена.

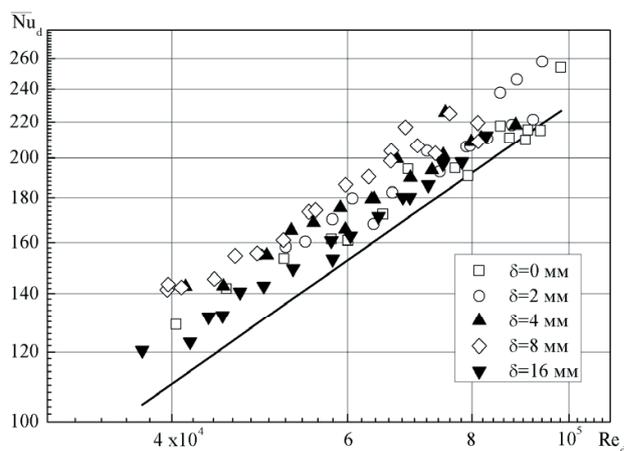


Рис. 4. Зависимость среднего теплообмена в трубе от числа Рейнольдса для различной величины зазора  $\delta$ : линия – уравнение для теплообмена в трубе с предвключенным адиабатным участком [4]

На рис. 5 представлена зависимость фактора интенсификации теплообмена  $\bar{Nu}_d / \bar{Nu}_0$  ( $\bar{Nu}_0$  – среднее число Нуссельта в трубе без вставки) от относительной величины зазора  $\delta/R$ . Как следует, максимальное увеличение среднего теплообмена наблюдается в области  $\delta/R$  от 0,2 до 0,3. Предположительно увеличение теплообмена в области  $\delta/R \leq 0,25$  связано с уменьшением влияния вихрей в угловых зонах крестообразной вставки. Уменьшение теплообмена в области  $\delta/R > 0,25$  объясняется постепенным переходом к течению в трубе без крестообразной вставки.

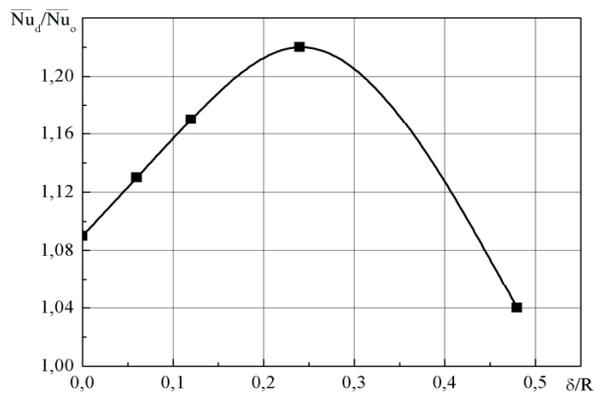


Рис. 5. Зависимость отношения  $\overline{Nu}_d/\overline{Nu}_0$  от относительной величины зазора  $\delta/R$

### Выводы

Выполнено экспериментальное исследование в трубе с крестообразной вставкой при различной величине зазора.

Показано, что максимальная интенсификация теплообмена в трубе с крестообразной вставкой достигается при  $\delta/R = 0,2 \dots 0,3$  и составляет 1,22.

Дальнейшая работа будет посвящена определению теплогидравлической эффективности в канале с крестообразной вставкой при различных значениях  $\delta$ .

Для уточнения физической структуры потока будет выполнено численное моделирование гидродинамики в канале с крестообразной вставкой при различных значениях  $\delta$ .

### Литература

1. Борисов И.И. Теплообмен и сопротивление при течении воздуха в трубе со вставками с интенсификаторами на их поверхности / И.И. Борисов, А.А. Халатов, Б.С. Сорока // Промышленная теплотехника. – 2009. – Т. 31, № 3. – С. 7-12.
2. Исаченко В. П. Теплопередача: учебник для вузов – 3-е изд., перераб. и доп. / В. П. Исаченко, В.А. Осипова, А. С. Сукомел. - М.: Энергия. - 1975. - 488 с.
3. Калинин Э. К. Интенсификация теплообмена в каналах / Э. К. Калинин, Г.А. Дрейцер, С.А. Ярхо. - М.: Машиностроение. - 1972. – 220 с.
4. Кутателадзе С.С. Теплообмен и трение в турбулентном пограничном слое / С.С. Кутателадзе, А.И. Леонтьев. -М.: Энергия. - 1972. – 344 с.
5. Петухов Б.С. Теплообмен в ядерных энергетических установках: учеб. пособие для вузов / Б.С. Петухов, Л.Г. Генин, С.А. Ковалев; под ред. Б.С. Петухова. - М.: Атомиздат. - 1974. – 408 с.
6. Михеев М.А. Краткий курс теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. - Ленинград: Госэнергоиздат. - 1960. – 208 с.