

УДК 532.516

Т. В. ДОНИК, канд. техн. наук; н.с. ИТТФ НАНУ, Киев;

О. В. ШИХАБУТИНОВА, канд. техн. наук; с.н.с. ИТТФ НАНУ, Киев

ФАКТОРЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА В ТРУБЕ С ЗАВИХРИТЕЛЕМ ЧАСТИЧНОЙ ЗАКРУТКИ ПОТОКА

Определены факторы, влияющие на интенсификацию теплообмена в трубе с завихрителем частичной закрутки потока, которые включают скорость и угол закрутки потока в пристеночной области, интенсивность турбулентности и вихревое перемешивание. Результаты исследования показали, что основной вклад в интенсификацию теплообмена оказывает вихревое перемешивание, величина которого превышает фактор 2,0. Факторы закрутки потока и турбулентности соизмеримы между собой и составляют около 1,2. Фактор снижения скорости около поверхности канала составляет около 0,6.

Ключевые слова: завихритель, частичная закрутка потока, факторы интенсификации теплообмена.

Введение

Проблема интенсификации теплообмена в каналах продолжает привлекать внимание исследователей и инженеров в связи с разработкой новых энергетических установок, интенсивных технологических аппаратов, промышленных теплообменников, рекуператоров теплоты и химических реакторов.

Для интенсификации внутреннего теплообмена в настоящее время широко используются: закрутка потока и его турбулизация, оребрение поверхности, ребра, выступы и углубления различной формы, а также некоторые другие методы [1, 2]. Одним из эффективных и простых в исполнении методов интенсификации теплообмена является закрутка потока, в частности частичная закрутка, которая в ряде случаев позволяет снизить гидравлические потери, улучшить теплогидравлические характеристики и регулировать интенсивность теплообмена при постоянном расходе теплоносителя.

Анализ выполненных исследований

В работе [3] выполнен подробный анализ и сделано обобщение экспериментальных и теоретических исследований в области теплообмена и гидродинамики внутренних закрученных потоков. Этот анализ показал, что для различных способов и законов начальной закрутки потока в круглых трубах фактор интенсификации теплообмена монотонно увеличивается с ростом угла закрутки завихрителя. Экспериментальное исследование теплообмена, выполненное в работах [4, 5], позволило заключить, что при использовании завихрителя частичной закрутки потока на основе крестообразной вставки, зависимость фактора интенсификации среднего теплообмена в круглом канале с начальным адиабатным участком от угла закрутки имеет немонотонный характер, с локальным максимумом и минимумом (рис. 1, линия 1). Компьютерный анализ структуры частично закрученного потока показал [6], что такой характер изменения фактора интенсификации теплообмена обусловлен одновременным влиянием нескольких факторов, среди которых угол закрутки и скорость потока около поверхности канала, интенсивность турбулентности и вихревое перемешивание.

Цель настоящей работы – определить степень влияния отдельных факторов, влияющих на интенсификацию среднего теплообмена в трубе с завихрителем

© Т.В. Доник, О.В. Шихабутинова, 2014

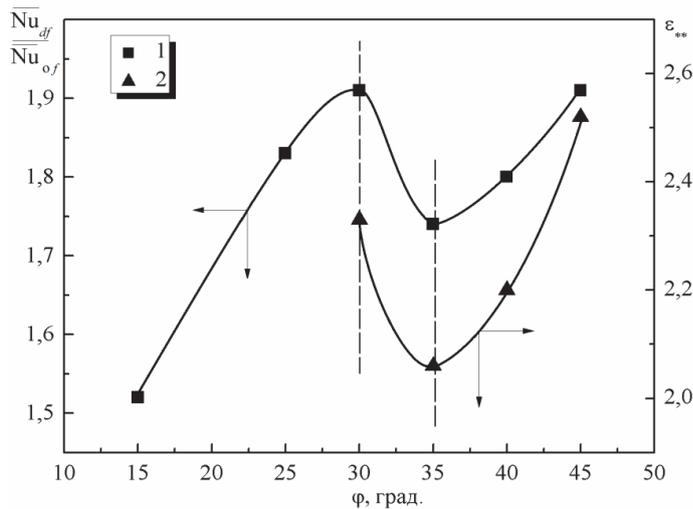


Рис. 1 – Зависимость фактора интенсификации среднего теплообмена (1) и функции вихревого перемешивания (2) от геометрического угла закрутки потока φ

частичной закрутки потока на основе крестообразной вставки и на этой основе объяснить немонотонный характер поведения фактора интенсификации теплообмена в зависимости от угла закрутки завихрителя.

Результаты исследования

Компьютерное моделирование гидродинамики показало [4], что геометрическое значение угла отгиба элементов (угла закрутки завихрителя φ) не соответствует действительному значению среднего угла закрутки потока $\bar{\varphi}$, поэтому дальнейший анализ выполнен с учетом

действительных значений угла закрутки потока. Обработка результатов моделирования позволила получить следующие средние значения действительного угла закрутки потока: $\bar{\varphi} = 27^\circ$ (φ = 30°), $\bar{\varphi} = 33^\circ$ (φ = 35°), $\bar{\varphi} = 37^\circ$ (φ = 45°). Как следует, действительное значение угла закрутки не соответствует геометрическому значению при всех значениях угла закрутки. Это обусловлено «недокруткой» потока, которая особенно заметно проявляется при больших углах закрутки потока.

Для определения влияющих факторов воспользуемся основами теории винтовой линии [3]. В качестве определяющих параметров используем суммарную скорость потока V_Σ и длину винтовой линии тока $x_{\text{эф}}$ около стенки трубы, а в качестве базового – уравнение подобия для осевого потока в начальном участке трубы при постоянном тепловом потоке на стенке канала. После подстановки определяющих параметров получим уравнение подобия для турбулентного локального теплообмена в трубе с закруткой потока:

$$\text{Nu}_{x_{\text{эф}}} = 0,0308 \text{Re}_{x_{\text{эф}}}^{0,8} \text{Pr}_f^{0,4}, \quad (1)$$

где $\text{Nu}_{x_{\text{эф}}} = \alpha x_{\text{эф}} / \lambda_f$, $\text{Re}_{x_{\text{эф}}} = V_\Sigma x_{\text{эф}} / \nu$ – эффективное число Нуссельта и число Рейнольдса на основе эквивалентной длины винтовой линии $x_{\text{эф}}$ и суммарной скорости потока; $x_{\text{эф}} = x(1 + \text{tg}^2 \varphi_w)^{0,5}$ – эквивалентная длина линии тока, м; x – продольная координата, м; $V_\Sigma = V_{1x}(1 + \text{tg}^2 \varphi_w)^{0,5}$ – средняя абсолютная скорость потока около стенки трубы, м/с; V_{1x} – средняя осевая скорость около стенки трубы, м/с; $\text{tg} \varphi_w$ – тангенс среднего угла закрутки потока на стенке канала, который является отношением поверхностных касательных напряжений трения в тангенциальном и осевом направлениях; λ_f – коэффициент теплопроводности потока, Вт/(м·К); ν – кинематический коэффициент вязкости потока, м²/с.

После подстановки и соответствующих преобразований уравнение (1) принимает следующий вид

$$\text{Nu}_{xf} = 0,0308 \text{Re}_{xf}^{0,8} \text{Pr}_f^{0,4} \varepsilon_\varphi, \quad (2)$$

где $\text{Nu}_{xf} = \alpha x / \lambda_f$, $\text{Re}_{xf} = V_{1x} x / \nu$ – число Нуссельта и число Рейнольдса по продольной координате x ; $\varepsilon_\varphi = x \left(1 + \text{tg}^2 \varphi_w\right)^{0,3}$ – фактор закрутки потока.

Поскольку закрученное течение характеризуется повышенным значением турбулентности и сложной вихревой структурой у поверхности теплообмена, то с учетом принципа суперпозиции отдельных воздействий [7] уравнение (2) запишется в следующем виде:

$$\text{Nu}_{xf} = 0,0308 \text{Re}_{xf}^{0,8} \text{Pr}_f^{0,4} \varepsilon_\varphi \varepsilon_{\text{Tu}} \varepsilon^{**}, \quad (3)$$

где $\varepsilon_{\text{Tu}}, \varepsilon^{**}$ – факторы, характеризующие влияние турбулентности и вихревого перемешивания.

Для определения фактора турбулентности ε_{Tu} используется зависимость, которая характеризует влияние внешней турбулентности на средний теплообмен около пластины при турбулентном режиме течения [8]:

$$\varepsilon_{\text{Tu}} = 1 + 3\text{Tu}_x - 6\text{Tu}_x^2,$$

где $\text{Tu}_x = \frac{\sqrt{\overline{V_x'^2} + \overline{V_y'^2} + \overline{V_z'^2}}}{\overline{V}} \cdot 100\%$ – степень турбулентности, %; $\overline{V_x'^2}$, $\overline{V_y'^2}$, $\overline{V_z'^2}$ – компоненты квадратичных пульсаций скорости по осям x , y , z , m^2/c^2 .

Считается, что течение в трубе с завихрителем частичной закрутки потока условно делится на течение в канале закрутки, которая образуется системой прямоугольных струй у стенки трубы, и в центральной области вставки осевым течением.

Тогда после преобразований при использовании в качестве определяющей средней скорости потока на входе в канал и учитывая влияние начального адиабатного участка, получим:

$$\overline{\text{Nu}}_{df} = \overline{\text{Nu}}_{of} \varepsilon_V \varepsilon_\varphi \varepsilon_{\text{Tu}} \varepsilon^{**}. \quad (4)$$

Здесь $\overline{\text{Nu}}_{of} = 0,038 \text{Re}_{df}^{0,8} \text{Pr}_f^{0,4} (l/d)^{-0,2}$ – средний теплообмен в трубе с учетом предвключенного адиабатного участка при осевом течении потока; l/d – относительная длина канала с завихрителем; $\overline{\text{Nu}}_{df} = \overline{\alpha} d / \lambda_f$, $\text{Re}_{df} = \overline{V} d / \nu$ – среднее число Нуссельта и число Рейнольдса по диаметру трубы d ; \overline{V} – средняя скорость на входе в трубу с завихрителем; ε_V – фактор, характеризующий величину скорости потока около поверхности канала, который определяется формулой

$$\varepsilon_V = \left(\frac{V_{1x}}{\overline{V}} \right)^{0,8}.$$

Отношение скоростей V_{1x} / \overline{V} определяется из равенства потерь статического давления в канале закрутки потока и в канале осевого течения:

$$\frac{V_{1x}}{\overline{V}} = \frac{\cos \varphi}{4 \left(\frac{G_2}{G_1} + 1 \right) \frac{a}{d} \left(1 - \frac{a}{d} \right)},$$

где $\frac{G_2}{G_1} = \frac{\left(1 - 2\frac{a}{d}\right)^{24/9} \left(1 + \operatorname{tg}^2\varphi\right)^{14/18} \cos\varphi}{2\left(1 - \frac{a}{d}\right)\left(2\frac{a}{d}\right)^{15/9}}$ – отношение расходов воздуха в каналах

закрутки и осевого течения; параметры a, d – высота отгибного элемента завихрителя и диаметр трубы, м. Для рассматриваемого завихрителя отношение $a/d = 0,145$, геометрический угол закрутки потока $\varphi = 30^\circ, 35^\circ$ и 45° .

Поскольку величина отдельных факторов может быть определена из вышеприведенных уравнений, то фактор вихревого перемешивания ε_{**} может быть найден из уравнения (4) исключением вклада в средний теплообмен закрутки потока, турбулентности и скорости потока около поверхности канал. Для этого используются опытные данные по среднему теплообмену в трубе с завихрителем частичной закрутки и предвключенным адиабатным участком [4–6].

В таблице приводятся результаты расчета факторов $\varepsilon_V, \varepsilon_\varphi, \varepsilon_{Tu}$ и ε_{**} для исследованных условий при различных значениях угла закрутки потока, а на рис. 2 представлены графические зависимости этих функций.

Таблица

Факторы закрутки, скорости потока, турбулентности и вихревого перемешивания потока

$\varphi/\bar{\varphi}$, град	Эксперимент $\frac{\overline{Nu}_{df}}{\overline{Nu}_{of}}$	Скорость у поверхности, ε_V	Закрутка потока, ε_φ	Турбулентность, ε_{Tu}	Вихревое перемешивание, ε_{**}
30 / 27	1,91	0,65 / 0,67	1,09 / 1,07	1,18	2,33 / 2,30
35 / 33	1,74	0,61 / 0,62	1,13 / 1,11	1,25	2,06 / 2,05
45 / 37	1,91	0,52 / 0,59	1,23 / 1,14	1,21	2,52 / 2,38

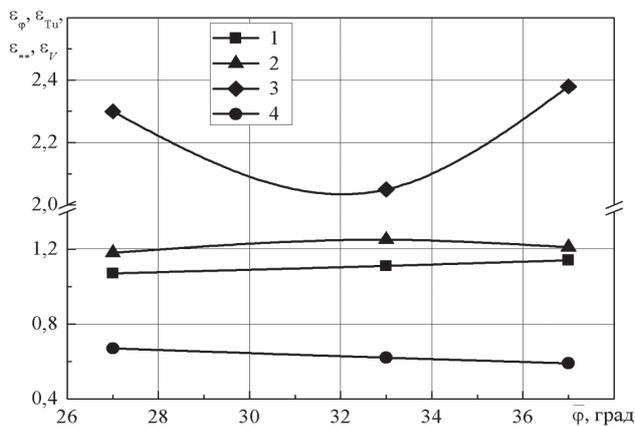


Рис. 2 – Факторы закрутки (1), турбулентности (2), вихревого перемешивания потока (3) и скорости около поверхности канала (4) для действительного значения угла закрутки $\bar{\varphi}$ при $a/d = 0,145$

Как видно, изменение фактора вихревого перемешивания (рис. 2, линия 3) для всех углов закрутки является преобладающим и характеризуется кривой с минимумом при $\bar{\varphi} \approx 32^\circ$, которому соответствует значение $\varepsilon_{**} = 2,05$. Максимальные значения фактора вихревого перемешивания составляют $\varepsilon_{**} = 2,33$ при $\bar{\varphi} = 27^\circ$ и $\varepsilon_{**} = 2,38$ при $\bar{\varphi} = 37^\circ$. Факторы закрутки потока (рис. 2, линия 1) и турбулентности (рис. 2, линия 2) соизмеримы между собой и составляют около 1,2. Фактор, характеризующий скорость потока около поверхности канала

(рис. 2, линия 4) составляет около 0,6, т.е. эта скорость составляет 60 % от скорости на входе в канал.

Таким образом, основной вклад в интенсификацию теплообмена при использовании данного типа завихрителя частичной закрутки оказывает вихревое перемешивание потока. Снижение фактора интенсификации теплообмена в области

$\varphi > 30^\circ$ и последующее его увеличение в области $\varphi > 35^\circ$ обусловлено соответствующим поведением фактора вихревого перемешивания (рис. 1, линия 2). При этом разница между максимальным и минимальным значениями среднего теплообмена и фактора вихревого перемешивания примерно одинакова.

Выводы

1) Определены факторы закрутки потока, турбулентности, вихревого перемешивания и снижения скорости около поверхности канала, характеризующие средний теплообмен в трубе с завихрителем частичной закрутки на основе крестообразной вставки.

2) Показано, что основной вклад в интенсификацию теплообмена в трубе с завихрителем частичной закрутки рассматриваемого типа оказывает вихревое перемешивание потока, величина которого превышает фактор 2,0.

3) Факторы закрутки потока и турбулентности соизмеримы между собой и составляют около 1,2. Фактор снижения скорости около поверхности канала составляет около 0,6.

4) Объяснен характер поведения кривой фактора интенсификации среднего теплообмена от угла закрутки потока в трубе с завихрителем частичной закрутки потока. Наличие максимума и минимума на кривой фактора интенсификации обусловлено соответствующим поведением фактора вихревого перемешивания.

Список литературы: 1. Исаченко, В. П. Теплопередача [Текст] / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – изд. 3-е перераб. и доп. – М.: Энергия, 1975. – 488 с. 2. Калинин, Э. К. Интенсификация теплообмена в каналах [Текст] / Э. К. Калинин, Г. А. Дрейцер, С. А. Ярхо. – М.: Машиностроение, 1972. – 220 с. 3. Халатов, А. А. Теория и практика закрученных потоков [Текст] / А. А. Халатов. – К.: Наукова думка, 1989. – 200 с. 4. Доник, Т. В. Теплообмен при течении воздуха в круглой трубе с крестообразной вставкой [Текст] / Т. В. Доник, А. А. Халатов, И. И. Борисов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Современные технологии в газотурбостроении. – 2011. – № 3/10(51). – С. 21–24. 5. Доник, Т. В. Теплообмен и гидравлическое сопротивление в трубе с крестообразной вставкой и частичной закруткой потока [Текст] / Т. В. Доник, А. А. Халатов // Промышленная теплотехника. – 2012. – № 2. – С. 28–32. – ISSN 0204-3602. 6. Donyk, T. The numeral simulation of an air flow structure with partial swirl [Текст] / T. Donyk, A. Khalatov, A. Zinchenko // Proceedings the Fifth world congress «Aviation in the XXI-st century». – 2012. – Vol. 1. – P. 1.12.8–1.12.13. 7. Кутателадзе, С. С. Теплообмен и трение в турбулентном пограничном слое [Текст] / С. С. Кутателадзе. – М.: Энергия, 1972. – 344 с. 8. Дыбан, Е. П. Теплообмен и гидродинамика турбулентных потоков [Текст] / Е. П. Дыбан, Э. Я. Эпик. – К.: Наукова думка, 1985. – 296 с.

Bibliography (transliterated): 1. Isachenko, V. P., V. A. Osipova and A. S. Sukomel. *Teplotperedacha*. Moscow: Jenergija, 1975. Print. 2. Kalinin, Je. K., G. A. Drejcer and S. A. Jarho. *Intensifikacija teploobmena v kanalah*. Moscow: Mashinostroenie, 1972. Print. 3. Halatov, A. A. *Teorija i praktika zakruchennyh potokov*. Kiev: Naukova dumka, 1989. Print. 4. Donik, T. V., A. A. Halatov and I. I. Borisov. "Teploobmen pri techenii vozduha v krugloj trube s krestoobraznoj vstavkoj." *Vostochno-Evropskij zhurnal peredovyh tehnologij. Sovremennye tehnologii v gazoturbostroenii* 3/10(51) (2011): 21–24. Print. 5. Donik, T. V., and A. A. Halatov. "Teploobmen i gidravlichesкое soprotivlenie v trube s krestoobraznoj vstavkoj i chastichnoj zakrutkoj potoka." *Promyshlennaja teplotehnika* 2 (2012): 28–32. ISSN 0204-3602. Print. 6. Donyk, T., A. Khalatov and A. Zinchenko. "The numeral simulation of an air flow structure with partial swirl." *Proceedings the Fifth world congress «Aviation in the XXI-st century*. Vol. 1. 2012. 1.12.8–1.12.13. Print. 7. Kutateladze, S. S. *Teploobmen i trenie v turbulentnom pograničnom sloe*. Moscow: Jenergija, 1972. Print. 8. Dyban, E. P., Je. Ja. Jepik. *Teploobmen i gidrodinamika turbulentnyh potokov*. Kiev: Naukova dumka, 1985. Print.

Поступила (received) 04.02.2014