

УДК 532.5.013.12

Т. В. ДОНИК, канд. техн. наук; н.с. ИТТФ НАНУ; ассистент каф. «Физика энергетических систем», НТУУ «КПИ», Киев

ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ ЗАКРУТКИ ПОТОКА

Выполнено обобщение опубликованных экспериментальных данных по теплогидравлической эффективности и коэффициенту качества различных способов закрутки потока. Показано, что различные способы закрутки потока характеризуются общим механизмом интенсификации теплообмена и описываются единой кривой на диаграммах теплогидравлической эффективности. Предложенный критерий качества обеспечивает более обоснованное ранжирование и сравнение интенсификаторов теплообмена.

Ключевые слова: теплогидравлическая эффективность интенсификаторов теплообмена, коэффициент качества, закрутка потока.

Введение

Интенсификация теплообмена является главным направлением совершенствования теплообменного оборудования при разработке энергетических установок с высокими параметрами цикла, интенсивных технологических аппаратов, промышленных теплообменников, рекуператоров теплоты и химических реакторов. Для интенсификации теплообмена в каналах используются различные методы – закрутка потока, турбулизация потока, оребрение поверхности, выступы и углубления различной формы, а также некоторые другие методы [1]. Одним из эффективных и технологичных в исполнении методов интенсификации теплообмена является полная и частичная закрутка потока. Данные интенсификаторы характеризуются значительным повышением теплообмена при допустимом росте гидравлического сопротивления.

Интенсификация теплообмена всегда сопровождается ростом гидравлических потерь. Для оценки теплогидравлической эффективности интенсификаторов теплообмена используют ряд критериев, характеризующих соотношение роста теплообмена к сопутствующим потерям давления на прокачку теплоносителя [2].

Критерии теплогидравлической эффективности

Наиболее широкое применение получил фактор аналогии Рейнольдса (ФАР) в форме отношения [1, 3]:

$$\text{ФАР} = (\text{Nu}/\text{Nu}_0)/(f/f_0). \quad (1)$$

Как эталонные значения (с нулевым индексом) в уравнении (1) используются значения числа Нуссельта Nu_0 и коэффициента гидравлического сопротивления f_0 в плоском канале с гладкими стенками при одинаковых значениях числа Рейнольдса.

Фактор аналогии Рейнольдса характеризуется следующими неравенствами: $\text{ФАР} > 1,0$ означает опережающий рост теплообмена по сравнению с увеличением гидравлических потерь, что наблюдается только в области низких гидравлических потерь ($f/f_0 < 3,5$), это обусловлено специфической природой генерируемых вихрей; $\text{ФАР} < 1,0$ не означает ухудшение теплогидравлических свойств канала с интенсификаторами теплообмена, а лишь показывает невозможность улучшения теплогидравлических характеристик за счет данного метода интенсификации теплообмена при тех же значениях скорости потока и эквивалентного диаметра канала.

При использовании системы координат $\text{ФАР}-f/f_0$ экспериментальные данные по

© Т.В. Доник, 2015

фактору аналогії Рейнольдса розполагаються в узкій області между двумя ограничивающими линиями, характеризующими поверхности со сферическими углублениями при малых числах Рейнольдса и с оребрением при больших числах Рейнольдса [3].

Недостатком фактора аналогії Рейнольдса, как критерия теплогидравлической эффективности, является то, что при его использовании невозможно провести ранжирования интенсификаторов теплообмена при использовании в практических приложениях. Поэтому в работе [4] было предложено новое понятие – качество интенсификаторов теплообмена, благодаря которому можно провести сравнение различных интенсификаторов теплообмена, а также обеспечить ранжирование интенсификаторов теплообмена.

Коэффициент качества интенсификатора теплообмена отражает степень отличия фактора аналогії Рейнольдса для конкретного метода интенсификации теплообмена от того же фактора для поверхностных сферических углублений при низких числах Рейнольдса при $ff_0 = \text{const}$. Выражение для коэффициента качества интенсификатора теплообмена имеет следующий вид:

$$K^* = \frac{\left(\frac{Nu}{Nu_0}\right) / \left(\frac{f}{f_0}\right)_{\text{инт.}}}{\left(\frac{Nu}{Nu_0}\right) / \left(\frac{f}{f_0}\right)_{\text{сф. угл.}}}, \quad (2)$$

где числитель характеризует фактор аналогії Рейнольдса для конкретного интенсификатора теплообмена, а знаменатель – тот же фактор для поверхности со сферическими углублениями при малых числах Рейнольдса.

Использование данного критерия теплогидравлической эффективности позволяет ранжировать все известные способы интенсификации теплообмена в узкой области – лучшие из них характеризуются коэффициентом качества $K^* = 1,0$, а худшие имеют значение $K^* = 0,40-0,51$ в зависимости от величины отношения ff_0 [4].

Цель настоящей работы – выполнить анализ теплогидравлической эффективности различных способов закрутки потока и определить качество рассмотренных интенсификаторов теплообмена.

Анализ теплогидравлической эффективности

На рис. 1 в координатах ФАР и ff_0 представлены экспериментальные данные для интенсификаторов теплообмена, использующих принцип закрутки потока, которые включают полную (зона А) и частичную (зона Б, Г) закрутки потока. Для сравнения здесь же представлены опытные данные для интенсификаторов (зона В), которые характеризуются как закруткой потока, так и вихревым перемешиванием, отрывом потока.

Как видно из рисунка, рассмотренные интенсификаторы теплообмена закручивающего типа находятся в области между двумя ограничивающими линиями, характеризующими поверхности со сферическими углублениями при малых числах Рейнольдса (линия 2, рис. 1) и с оребрением при больших числах Рейнольдса (линия 1, рис. 1), при этом данные располагаются ближе к нижней кривой, что свидетельствует о среднем значении теплогидравлической эффективности.

Практически все экспериментальные данные для рассмотренных интенсификаторов теплообмена закручивающего типа располагаются около обобщающей линии 2, которая характеризуется уравнением

$$(Nu/Nu_0)/(ff_0) = 1,22 \cdot (ff_0)^{-0,72}. \quad (3)$$

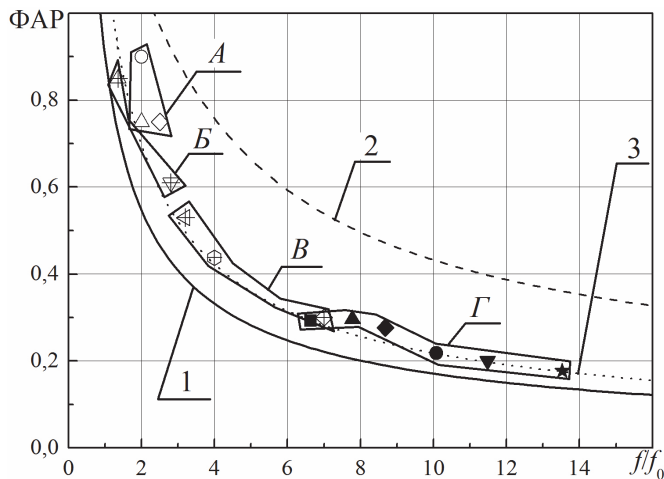


Рис. 1 – Фактор аналогії Рейнольдса в каналі з закруткою потоку: 1 – поверхнiстне оребрення при великих числах Рейнольдса; 2 – поверхнiсть со сферическими углублениями при низких числах Рейнольдса; 3 – обобщающая линия.

Зони А – змеевиковые трубчатые элементы [5];
 Б – проволочные спиральные турбулизаторы [5];
 В – спиральные и цилиндрические выступы [5];
 Г – крестообразные вставки с частичной закруткой потока [6]

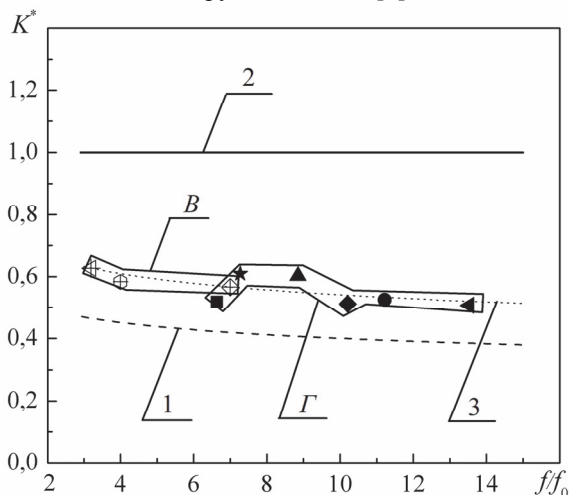


Рис. 2 – Коэффициент качества K^* интенсификаторов теплообмена закручивающего типа в круглом канале.

Обозначения на рис. 1

затруднительным из-за «крутого» поведения ограничивающих кривых 1 и 2 в этой области (рис. 1). В таком представлении линия 2 ($K^* = 1,0$) отражает сферические углубления при низких числах Рейнольдса, а линия 1 – поверхнiстне оребрення при великих числах Рейнольдса.

В области $ff_0 = 3,0 \dots 15,0$ абсолютное значение коэффициента качества интенсификатора теплообмена K^* для поверхнiстного оребрення при великих числах Рейнольдса изменяется от 0,47 до 0,40, а для сферических углублений при низких числах Рейнольдса – равняется 1,0. Эта является нижним пределом коэффициента качества для всех интенсификаторов.

Как видно из рисунка, интенсификаторы теплообмена закручивающего типа (обобщающая линия 3) характеризуются величиной коэффициента качества K^* ,

Данный результат свидетельствует о том, что рассмотренные интенсификаторы теплообмена закручивающего типа, различаясь по конструктивному оформлению, имеют достаточно общий механизм интенсификации теплообмена за счет закрутки потока (полной и частичной), вихревого перемешивания и локального отрыва потока и по этой причине обобщаются общей зависимостью.

Пользуясь полученными данными, можно при заданном отношении гидравлических потерь ff_0 выбрать способ интенсификации теплообмена, который характеризуется наилучшими показателями по теплообмену или для заданной интенсификации теплообмена Nu/Nu_0 выбрать метод, характеризующийся наименьшими потерями давления.

На рис. 2 представлены экспериментальные данные для коэффициента качества интенсификаторов теплообмена с частичной закруткой потока (зоны Г и В). На данном рисунке не представлены интенсификаторы теплообмена зон А и Б, так как определение коэффициента качества для данных завихрителей является

который изменяется от 0,63 при малых значениях ff_0 , до 0,50 в области $ff_0 = 15,0$. Как следует, рассмотренные интенсификаторы имеют коэффициент качества ниже среднего значения, так как располагаются ближе к нижней кривой.

Следует заметить, что коэффициент качества рекомендуется использовать для практических приложений при относительных гидравлических потерях не меньше 3,0, это связано с характером кривых для оребренных поверхностей при больших числах Рейнольдса и поверхностей со сферическими углублениями при низких числах Рейнольдса.

Выводы

1) На основе фактора аналогии Рейнольдса и коэффициента качества определена теплогидравлическая эффективность различных способов закрутки потока.

2) Показано, что интенсификаторы теплообмена, имеющие различную конструкцию, описываются единой кривой на диаграммах теплогидравлической эффективности, что обусловлено общим механизмом интенсификации теплообмена, а именно, закруткой потока, отрывами и вихревым перемешиванием.

3) Интенсификаторы теплообмена закручивающего типа характеризуются коэффициентом качества от 0,63 при малых значениях гидравлического сопротивления до 0,50 в области $ff_0 = 15,0$. В практических приложениях коэффициент качества рекомендуется использовать в области $ff_0 > 3,0$, что связано со сложностью определения предельных значений ограничивающих кривых.

Список литературы: 1. Халатов, А. А. Фактор аналогии Рейнольдса для интенсификаторов теплообмена различного типа [Текст] / А. А. Халатов, В. Н. Онищенко, Т. В. Доник, А. В. Окишев // Известия Российской Академии наук. Серия Энергетика. – Москва, 2011. – № 4. – С. 109–116. – ISSN 0002-3310. 2. Халатов, А. А. Тепломассообмен и теплогидравлическая эффективность вихревых и закрученных потоков [Текст] : в 10-ти т. Т. 5. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых / А. А. Халатов, И. И. Борисов, С. В. Шевцов. – Киев, 2005. – 500 с. – ISBN 966-02-3788-X. 3. Халатов, А. А. Аналогия переноса теплоты и количества движения в каналах с поверхностными генераторами вихрей [Текст] / А. А. Халатов, В. Н. Онищенко, И. И. Борисов // Доклады НАН Украины. – Киев, 2007. – № 6. – С. 70–75. 4. Халатов, А. А. Новый критерий теплогидравлической эффективности интенсификаторов теплообмена [Текст] / А. А. Халатов, Т. В. Доник // Доклады НАН Украины. – К., 2014. – № 7. – С. 82–85. 5. Сударев, А. В. Повышение эффективности и снижение металлоемкости газотурбинных трубчатых воздухоподогревателей на основе пассивных методов интенсификации теплообмена в их тракте [Текст] / А. В. Сударев, А. А. Халатов, В. Б. Сударев // Научные и прикладные вопросы промышленного газотурбостроения : сб. опубликованных статей в 2-х томах. – Киев, 2014. – Том 1. – 754 с. 6. 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. – Т. 34, № 2. – С. 28–32. – ISSN 0204-3602.

Bibliography (transliterated): 1. Khalatov, A. A., et al. "Faktor analogii Rejno'lsa dlja intensifikatorov teploobmena razlichnogo tipa." *Izvestija Rossijskoj Akademii nauk. Serija Jenergetika* 4 (2011): 109–116. ISSN 0002-3310. Print. 2. Khalatov, A. A., I. I. Borisov and S. V. Shevtsov. *Teploobmen i gidrodinamika v polyah tsentrobezhnyh massovyih sil (Teplomassoobmen i teplogidravlicheskaya effektivnost vihrevyih i zakruchennyih potokov)*. Vol. 5. 2005. ISBN 966-02-3788-X. Print. 3. Khalatov, A. A., V. N. Onishhenko and I. I. Borisov. "Analogija perenosa teploty i kolichestva dvizhenija v kanalakh s poverhnostnymi generatorami vihrej." *Doklady NAN Ukrainy* 6 (2007): 70–75. Print. 4. Khalatov, A. A., T. V. Donik. "Novyj kriterij teplogidravlicheskoj jeffektivnosti intensifikatorov teploobmena." *Doklady NAN Ukrainy* 7 (2014): 82–85. Print. 5. Sudarev, A. V., A. A. Khalatov and V. B. Sudarev. "Povyshenie jeffektivnosti i snizhenie metalloemkosti gazoturbinyh trubchatyh vozduhopodogrevatelej na osnove passivnyh metodov intensifikacii teploobmena v ih trakte." *Nauchnye i prikladnye voprosy promyshlennogo gazoturbostroenija. Sbornik opublikovannyh statej v 2-h tomah*. Vol. 1. 2014. Print. 6. Donik, T. V., and A. A. Khalatov. "Teploobmen i gidravlichesкое soprotivlenie v trube s krestooobraznoj vstavkoj i chastichnoj zakrutkoj potoka." *Promyshlennaja teplotehnika* 34.2 (2012): 28–32. ISSN 0204-3602. Print.

Поступила (received) 03.02.2015