



УДК 532.516

Академик НАН України **А. А. Халатов, Т. В. Доник**

## **Новый критерий теплогидравлической эффективности интенсификаторов теплообмена**

*Предложен новый критерий теплогидравлической эффективности, который обеспечивает более обоснованное ранжирование и сравнение интенсификаторов теплообмена. Показано, что в области  $f/f_0 < 16$  коэффициент качества всех известных интенсификаторов теплообмена изменяется от 0,4...0,48 до 1,0.*

Интенсификация теплообмена является главным направлением совершенствования теплообменного оборудования в различных отраслях промышленности. Для оценки качества интенсификаторов теплообмена в настоящее время используют ряд критериев теплогидравлической эффективности, характеризующих соотношение роста теплообмена к сопутствующим потерям давления на прокачку теплоносителя [1]. Их главным недостатком является трудность ранжирования интенсификаторов теплообмена при использовании в практических приложениях.

В работе [2] показано, что в координатах ФАР- $f/f_0$  экспериментальные данные по фактору интенсификации теплообмена для всех известных способов интенсификации теплообмена располагаются в узкой области между двумя ограничивающими линиями, характеризующими поверхности со сферическими углублениями при малых числах Рейнольдса и с оребрением при больших числах Рейнольдса (рис. 1). Здесь ФАР =  $(Nu/Nu_0)/(f/f_0)$  — фактор аналогии Рейнольдса;  $Nu$ ,  $f$  — число Нуссельта и коэффициент гидравлического сопротивления при интенсификации;  $Nu_0$ ,  $f_0$  — то же без интенсификации при том же числе Рейнольдса. Как следует, опережающий рост теплообмена по сравнению с увеличением гидравлических потерь (ФАР > 1,0) наблюдается только в области низких гидравлических потерь ( $f/f_0 < 3,5$ ), что обусловлено специфической природой генерируемых вихрей.

Таким образом, интенсификаторы теплообмена на основе поверхностных углублений (рис. 1, линия 2б) могут считаться наиболее совершенным методом интенсификации теплообмена и использоваться в качестве верхнего предела при сравнении различных интенсификаторов. Эти выводы позволяют предложить новый критерий теплогидравлической эффективности — коэффициент качества интенсификатора теплообмена, отражающий степень отличия фактора аналогии Рейнольдса для конкретного метода интенсификации теплообмена от того же фактора для поверхностных сферических углублений при низких

---

© А. А. Халатов, Т. В. Доник, 2014

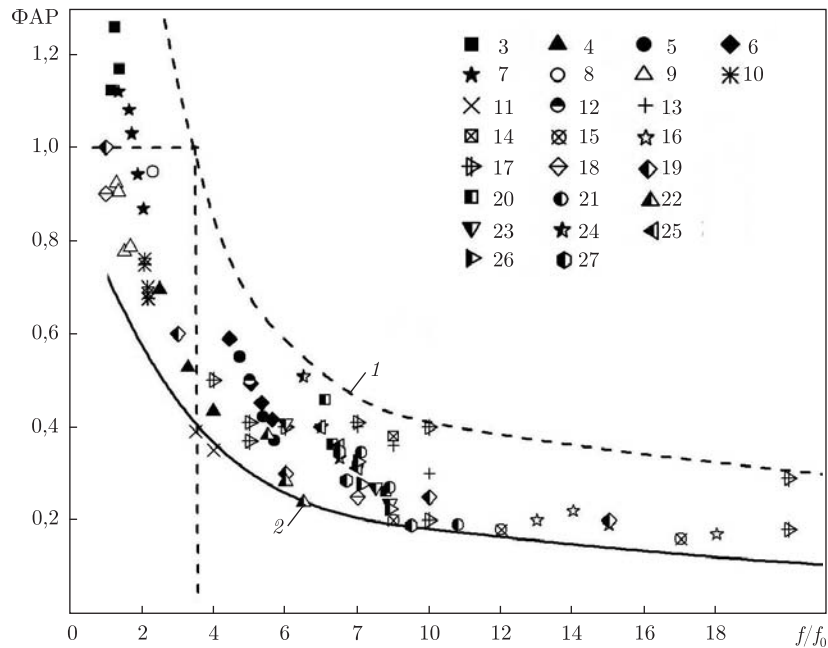


Рис. 1. Фактор аналогии Рейнольдса в каналах с интенсификаторами теплообмена, выступающими в поток [2]:

1 — поверхность со сферическими углублениями при низких числах Рейнольдса; 2 — поверхностное оребрение при больших числах Рейнольдса; 3 — кольцевые поперечные выступы, труба; 4 — спиральные выступы, труба; 5 — выступы скошенные, неразрезные, квадратный канал; 6 — выступы скошенные, разрезные, квадратный канал; 7 — сферические выступы, прямоугольный канал; 8 — сферические выступы и углубления, труба; 9 — мелкие сферические выступы, труба; 10 — сферические выступы, прямоугольный канал; 11 — внутренние канавки; 12 — сферические выступы на плоской поверхности; 13 — 60° сплошные и разрезные ребра; 14 — 90° разрезные ребра; 15 — чередующиеся сферические выступы-углубления; 16 — внутренние спиральные канавки; 17 — “плотный” контакт выступов с противоположной стенкой; 18 — проволочные спиральные вставки (ПСВ) в круглом канале; 19 — ПСВ в круглом канале; 20 — дельтаобразные генераторы вихрей, расположенные навстречу потоку; 21 — сплошные V-образные ребра (60°); 22 — сплошные ребра перпендикулярные потоку (90°); 23 — дельтаобразные генераторы вихрей, направленные вдоль по потоку; 24 — V-образные ребра, разрезные (60°); 25 — 60° разрезные ребра; 26 — 90° разрезные ребра; 27 — сплошные ребра под углом 60° к потоку

числах Рейнольдса при  $f/f_0 = \text{const}$ . Выражение для коэффициента качества интенсификатора теплообмена имеет следующий вид:

$$K^* = \frac{(\text{Nu}/\text{Nu}_0)/(f/f_0)_{\text{инт}}}{(\text{Nu}/\text{Nu}_0)/(f/f_0)_{\text{сф. угл}}},$$

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

В качестве примера на рис. 2 представлены экспериментальные данные по коэффициенту качества интенсификаторов теплообмена закручивающего типа [3]. В таком представлении линия 1 ( $K^* = 1,0$ ) отражает сферические углубления при низких числах Рейнольдса, а линия 2 — поверхностное оребрение при больших числах Рейнольдса.

В области  $f/f_0 = 2,0 \dots 16,0$  абсолютное значение коэффициента качества интенсификатора теплообмена  $K^*$  для поверхностного оребрения при больших числах Рейнольдса изме-

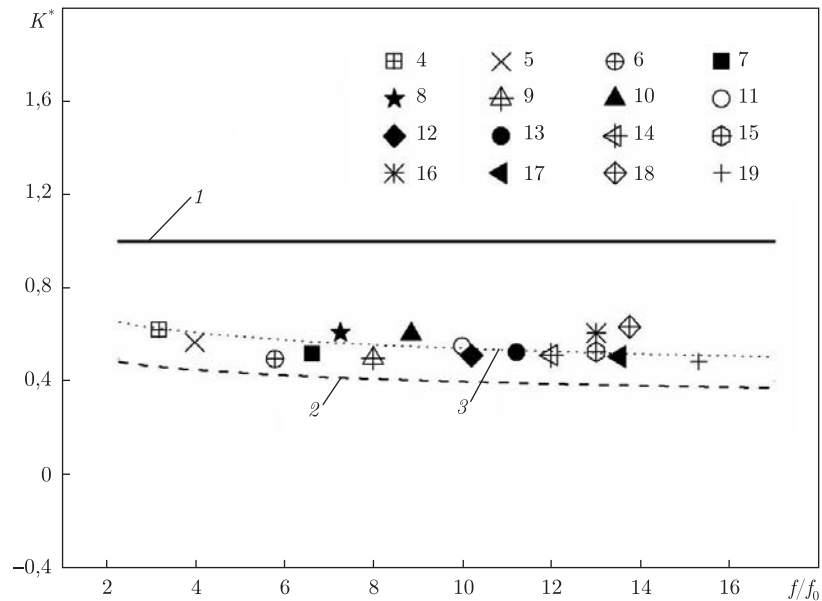


Рис. 2. Коэффициент качества  $K^*$  интенсификаторов теплообмена закручивающего типа в круглом канале [3]:

1 — поверхностные сферические углубления при низких числах Рейнольдса; 2 — поверхностное оребрение при больших числах Рейнольдса; 3 — интенсификаторы теплообмена закручивающего типа (обобщающая линия); 4 — спиральные выступы; 5 — цилиндрические штырьки; 6 — крестообразная вставка: сферические углубления на поверхности; 7 — частичная закрутка потока:  $\varphi = 15^\circ$ ; 8 —  $\varphi = 25^\circ$ ; 9 — проволочные спиральные вставки; 10 — частичная закрутка потока:  $\varphi = 30^\circ$ ; 11 — наклонно-тангенциальная закрутка течения в трубе с поворотом на потоке (2 тангенциальных завихрителя); 12 — частичная закрутка потока:  $\varphi = 35^\circ$ ; 13 —  $\varphi = 40^\circ$ ; 14 — чередующиеся сферические выступы; 15 — тангенциальная закрутка с тангенциальным выходом потока; 16 — внутренние спиральные канавки; 17 — частичная закрутка потока:  $\varphi = 45^\circ$ ; 18 — крестообразная вставка: сферические углубления и ребра на поверхности вставки; 19 — наклонно-тангенциальная закрутка в трубе с поворотом потока на выходе

няется от 0,48 до 0,40. Это является нижним пределом коэффициента качества для всех интенсификаторов. Таким образом, использование нового критерия теплогидравлической эффективности позволяет ранжировать все известные способы интенсификации теплообмена — лучшие из них характеризуются коэффициентом качества  $K^* = 1,0$ , а худшие имеют значение  $K^* = 0,40 \div 0,48$  в зависимости от величины отношения  $f/f_0$ .

Интенсификаторы теплообмена закручивающего типа (обобщающая линия 3) характеризуются величиной коэффициента качества  $K^*$ , который изменяется от 0,62 при малых значениях  $f/f_0$  до 0,50 в области  $f/f_0 = 16,0$ . Как следует, такие интенсификаторы имеют коэффициент качества ниже среднего значения.

Таким образом, новый критерий теплогидравлической эффективности — коэффициент качества обеспечивает более обоснованный выбор, ранжирование и сравнение различных интенсификаторов теплообмена.

1. Халатов А. А., Онищенко В. Н., Борисов И. И. Аналогия переноса теплоты и количества движения в каналах с поверхностными генераторами вихрей // Доп. НАН України. — 2007. — № 6. — С. 70–75.
2. Халатов А. А., Онищенко В. Н., Доник Т. В., Ожигиев А. В. Фактор аналогии Рейнольдса для интенсификаторов теплообмена различного типа // Изв. РосАН. Сер. Энергетика. 2011. — № 4. — С. 109–116.

3. Доник Т. В. Теплообмін та гідродинаміка в трубі з завихрювачем часткової закрутки потоку на основі хрестоподібної вставки: Автореф. дис. ... канд. техн. наук 05.14.06 "Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика". – ИТТФ НАН України. – Київ, 2013. – 22 с.

*Институт технической теплофизики  
НАН Украины, Киев*

*Поступило в редакцию 03.03.2014*

Академік НАН України **А. А. Халатов, Т. В. Доник**

### **Новий критерій теплогідравлічної ефективності інтенсифікаторів теплообміну**

*Запропоновано новий критерій теплогідравлічної ефективності, який забезпечує більш обґрунтоване ранжування і порівняння інтенсифікаторів теплообміну. Показано, що в області  $f/f_0 < 16$  коефіцієнт якості всіх відомих інтенсифікаторів теплообміну змінюється від 0,4...0,48 до 1,0.*

Academician of the NAS of Ukraine **A. A. Khalatov, T. V. Donyk**

### **A new criterion of thermal-hydraulic efficiency for heat intensifiers**

*A new criterion of thermal-hydraulic efficiency, which provides a more reasonable ranking and comparison of heat intensifiers is proposed. It is shown that, for  $f/f_0 < 16$ , the quality factor of the known heat transfer intensifiers varies from 0.4...0.48 to 1.0.*