

УСЛОВИЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССА РАЦИОНАЛЬНОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА В ПРЯМОУГОЛЬНЫХ КАНАЛАХ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

АННОТАЦИЯ

Способ генерации вихрей в пристеночном слое течений в каналах (при обтекании плохо обтекаемых тел) реализован в прямоугольных каналах пластинчато-ребристых рассеченных (ПРрс) теплообменных поверхностей (ТП) с целью осуществления рациональной интенсификации конвективного теплообмена (РИКТ). Результаты тщательно спланированного систематического экспериментального исследования теплоаэродинамических характеристик серии ПРрс ТП подтвердили реализацию процесса РИКТ и высокий уровень оценки $[(Nu/Nu_{г\text{л}})'_{\text{рикт}}]_{\text{max}}$ при значении определяющего комплекса $(Nu/Nu_{г\text{л}})_{\text{Re=idem}}/(\xi/\xi_{г\text{л}})_{\text{Re=idem}} = 1$. Впервые предложена и для исследованной серии ПРрс ТП реализована методика определения диапазонов изменения значений безразмерных геометрических и режимного параметров, обуславливающих реализацию процесса РИКТ, упрощающая поиск рациональных решений при конструировании теплообменников.

1. ВВЕДЕНИЕ

Два способа генерации вихрей в пристеночном слое течений теплоносителя в каналах (на диффузорно-конфузорных участках и при обтекании плохо обтекаемых тел), обладающие физической общностью, позволяют разрабатывать новые конструкции высокоэффективных ТП, в некруглых каналах которых реализуется процесс РИКТ, при котором рост относительных тепловых характеристик $Nu/Nu_{г\text{л}} = f(Re)$ опережает рост или равен росту относительных аэродинамических характеристик $\xi/\xi_{г\text{л}} = f(Re)$ в сравнении с идентичными по геометрии гладкими (то есть без турбулизаторов) каналами при условии $Re = idem$. Первый способ реализуется как в круглых каналах с периодическими диафрагменными пережатиями сечения, так и в некруглых каналах с периодически расположенными поперечными выступами и канавками, второй – в коротких некруглых каналах (рассечение длинных гладких каналов) с параметром рассечения $l/d < 3$, см. рис. 1. Конструкторы ТА с указанными теплообменными поверхностями опираются исключительно на экспериментальные данные в связи со сложностью аэродинамики и механизма теплообмена, не поддающимися пока анализу методами теории пограничного слоя. Для указанных способов при значении определяющего комплекса $(Nu/Nu_{г\text{л}})_{\text{Re=idem}}/(\xi/\xi_{г\text{л}})_{\text{Re=idem}} \cong 1$ получены оценки процесса РИКТ $[(Nu/Nu_{г\text{л}})'_{\text{рикт}}]_{\text{max}}$: 2.88 – круглые каналы с диафрагменными пережатиями ($d^*/d = 0.875$, $s/d = 0.496$, $L/d = 114$, $Re = 2000$) [1]; 2.15 – треугольные каналы ПРвк ТП ($d^*/d = 0.797$, $h/s =$

$= 1.52$, $L/d = 23.6$, $Re = 1700$); 1.45 – треугольные каналы ПРрс ТП ($\delta/d = 0.0287$, $h/s = 1.06$, $L/d = 20.1$, $Re = 1250$); оценка получена экстраполяцией опытных данных в сторону меньших значений параметра l/d [2]. Визуальными наблюдениями перехода от ламинарного течения теплоносителя к турбулентному в канале треугольной формы [3] было установлено, что вплоть до значения критерия $Re = 7500$ в угловых зонах существуют области устойчивого ламинарного режима течения теплоносителя. Следовательно, для каналов некруглого поперечного сечения значения критерия Nu и коэффициента ξ есть комплексные значения этих величин для ламинарного и турбулентного режимов течений, одновременно существующих в сечении канала. Поскольку отрицательное влияние угловых ламинаризованных зон на теплообмен тем больше, чем меньше угол между гранями канала, создание пластинчато-ребристых ТП с прямоугольными каналами, характеризующимися высоким значением параметра щелевидности h/u ($h = H - \delta$, $u = s - \delta$, см. рис. 1), и осуществление в них интенсификации теплообмена одним из указанных выше способов представляются весьма целесообразными.

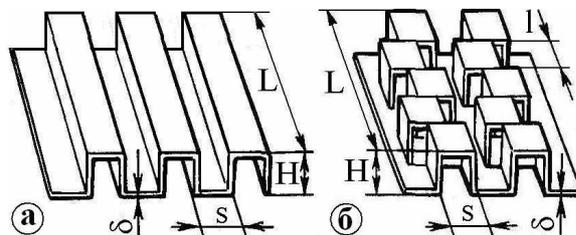


Рис. 1. Гладкоканальная (а) и рассечённая (б) насадки пластинчато-ребристых теплообменных аппаратов

Приведённые результаты позволяют предположить, что для ПРрс ТП с прямоугольными каналами вследствие меньшего отрицательного влияния на теплообмен угловых ламинаризованных зон значение оценки $[(Nu/Nu_{г\text{л}})'_{\text{рикт}}]_{\text{max}}$ РИКТ будет больше, чем для ТП с треугольными каналами, и меньше, чем для каналов круглой формы: $2.15 < [(Nu/Nu_{г\text{л}})'_{\text{рикт}}]_{\text{max}} < 2.88$.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССА РИКТ В ПРЯМОУГОЛЬНЫХ РАССЕЧЁННЫХ КАНАЛАХ

Результаты экспериментального исследования теплоаэродинамических характеристик серии из 6-ти ПРрс и 1-й ПРгл ТП с прямоугольными каналами (значения неизменных геометрических парамет-

ров: $d = 7.72$ мм, $h/u = 6.93$, $\delta/d = 0.0777$, $L/d = 19.43$ подтвердили реализацию процесса РИКТ и позволили получить при значении определяющего комплекса $(Nu/Nu_{гр})_{Re=idem}/(\zeta/\zeta_{гр})_{Re=idem} = 1$ значение оценки $[(Nu/Nu_{гр})'_{рикт}]_{max} = 2.60$ ($l/d = 1.31$; $Re = 2400$) [4, 5]. Систематические экспериментальные исследования позволяют определять влияние изменения значений отдельных параметров на изменение теплоаэродинамических характеристик, определять величину оценки $[(Nu/Nu_{гр})'_{рикт}]_{max}$ процесса РИКТ, диапазоны значений режимного параметра – критерия Рейнольдса – Re и определяющих безразмерных геометрических параметров, соответствующих области реализации процесса РИКТ с его оценками от $[(Nu/Nu_{гр})'_{рикт}]_{min}$ до $[(Nu/Nu_{гр})'_{рикт}]_{max}$ при значении определяющего комплекса $(Nu/Nu_{гр})_{Re=idem}/(\zeta/\zeta_{гр})_{Re=idem} = 1$.

Данные аппроксимации степенными функциями вида $Nu = A \cdot Re^m$ и $\zeta = B \cdot Re^n$ экспериментальных зависимостей $Nu = f(Re)$ и $\zeta = f(Re)$ [5] позволили построить зависимости $Nu/Nu_{гр} = f(l/d)$ и $\zeta/\zeta_{гр} = f(l/d)$ при $Re = idem$, координаты точек пересечения которых определяют значения оценки $(Nu/Nu_{гр})'_{рикт}$ процесса РИКТ и параметра рассеяния $(l/d)'_{рикт}$, являющиеся соответственно наибольшими и наименьшими их значениями при значении определяющего комплекса $(Nu/Nu_{гр})_{Re=idem}/(\zeta/\zeta_{гр})_{Re=idem} = 1$. Совокупность представленных на рисунке 2 вариантов графических определений соответствующих друг другу величин $(Nu/Nu_{гр})'_{рикт}$ и $(l/d)'_{рикт}$ показывает, что для серии ПРрс ТП 1...6, отличающихся только ве-

личной параметра рассеяния $l/d = variable$ ($l/d = 0.65, 0.97, 1.30, 1.94, 2.77, 3.24$), процесс РИКТ реализуется в достаточно широких пределах изменения значений режимного параметра от $(Re'_{рикт})_{min} = 600$ до $(Re'_{рикт})_{max} = 6000$, причём значение $(Re'_{рикт})_{min} = 600$ определяется нижней границей общего диапазона изменения значений критерия $Re = 600 \dots 10000$ проведённого исследования.

На композиционном рис. 3 представлены зависимости $(Nu/Nu_{гр})/(\zeta/\zeta_{гр}) = f(Re)$, $Nu/Nu_{гр} = f(Re)$, $\zeta/\zeta_{гр} = f(Re)$ и $(l/d)'_{рикт} = f(Re)$, последняя из которых совокупностью своих точек обуславливает значения определяющего безразмерного геометрического параметра рассеяния $(l/d)'_{рикт}$ и область значений режимного параметра – критерия Рейнольдса, при которых с оценкой $(Nu/Nu_{гр})'_{рикт}$ и значением определяющего комплекса $(Nu/Nu_{гр})_{Re=idem}/(\zeta/\zeta_{гр})_{Re=idem} = 1$ реализуется процесс РИКТ. Так, заданной величине Re^* в диапазоне значений от $(Re'_{рикт})_{min} = 600$ до $(Re'_{рикт})_{max} = 6000$ будет отвечать процесс РИКТ при значении определяющего комплекса: $(Nu/Nu_{гр})_{Re^*=idem}/(\zeta/\zeta_{гр})_{Re^*=idem} = 1$ и $[(Nu/Nu_{гр})'_{рикт}]_{Re^*=idem}$, если принимаемый для ПРрс ТП параметр рассеяния будет равен $(l/d)'_{рикт} = f(Re^*)$; $(Nu/Nu_{гр})_{Re=idem}/(\zeta/\zeta_{гр})_{Re=idem} > 1$ и $[(Nu/Nu_{гр})'_{рикт}]_{Re^*=idem} < [(Nu/Nu_{гр})'_{рикт}]_{Re^*=idem}$, если для ПРрс ТП принимаемое значение параметра рассеяния отвечает неравенству $[(l/d)'_{рикт}]_{Re^*} > [(l/d)'_{рикт}]_{Re}$.

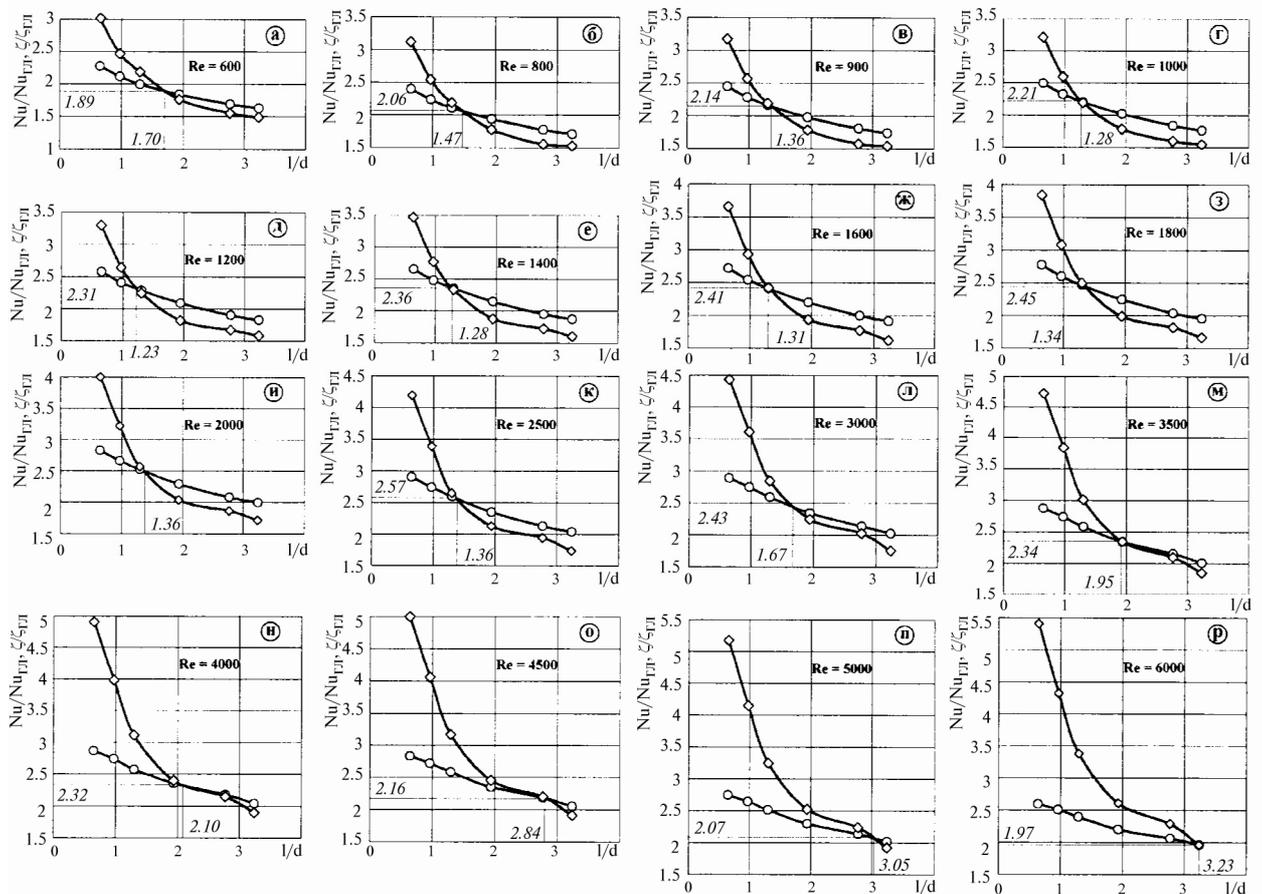


Рис. 2. Зависимости $Nu/Nu_{гр} = f(l/d)$ и $\zeta/\zeta_{гр} = f(l/d)$ при $Re = idem$ для ПРрс ТП 1... 6: $\circ - Nu/Nu_{гр}$; $\diamond - \zeta/\zeta_{гр}$

*

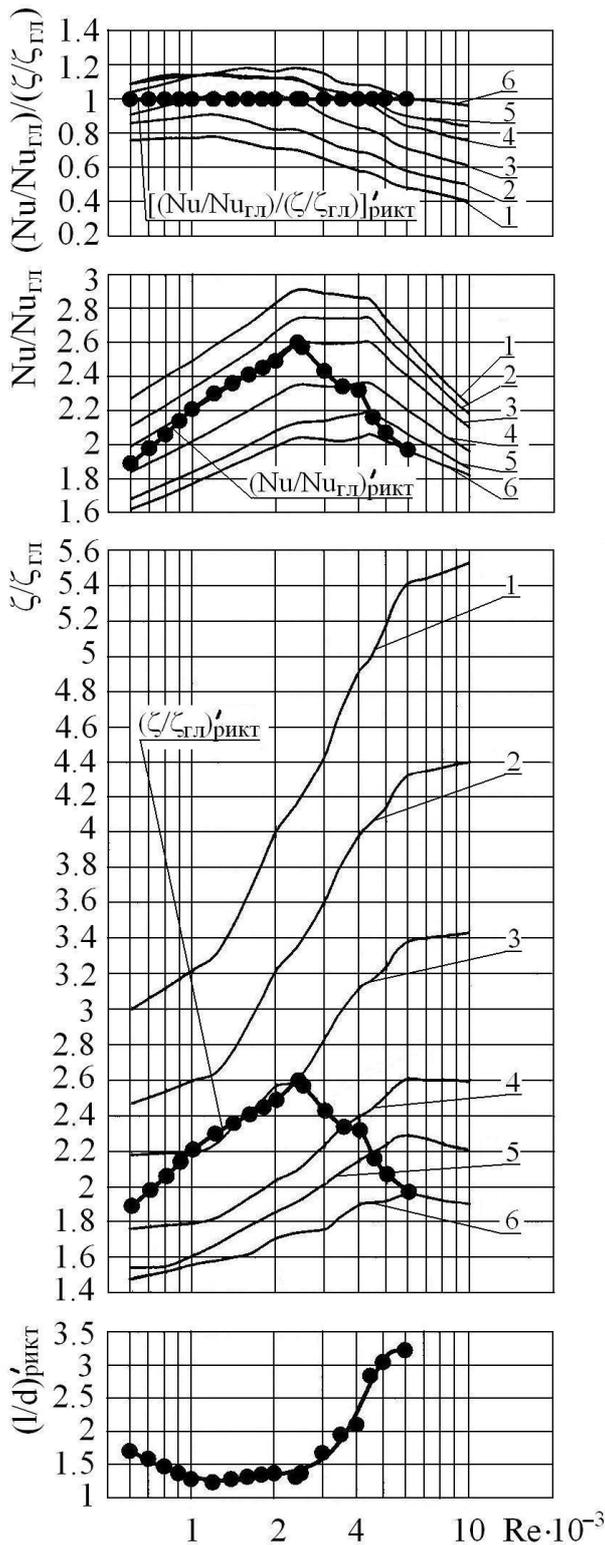


Рис. 3. Зависимости $(Nu/Nu_{гд})/(\zeta/\zeta_{гд}) = f(Re)$, $(Nu/Nu_{гд}) = f(Re)$, $(\zeta/\zeta_{гд}) = f(Re)$ и $(l/d)_{рикт} = f(Re)$ для ППрс ТП 1... 6

Если же для ППрс ТП принимаемое значение параметра l/d отвечает неравенству $(l/d)_{Re^*} < [(l/d)'_{рикт}]_{Re^*}$, то процесс РИКТ не реализуется, а интенсификация теплообмена определяется неравенством $(Nu/Nu_{гд})_{Re^*=idem} < (\zeta/\zeta_{гд})_{Re^*=idem}$.

Рассмотрение зависимости $(l/d)'_{рикт} = f(Re)$ позволяет выделить характерные точки I и II с коор-

динатами: I (1200, 1.23) – соответствует значению параметра рассеяния $[(l/d)'_{рикт}]_{min}$ в области реализации процесса РИКТ; II (2400, 1.31) – соответствует значению оценки процесса РИКТ $[(Nu/Nu_{гд})'_{рикт}]_{max} = 2.60$

Как это видно из рис. 3, значения достигаемых оценок процесса РИКТ увеличиваются в пределах от $[(Nu/Nu_{гд})'_{рикт}]_{min} = 1.89$ при $(l/d)'_{рикт} = 1.70$ до $[(Nu/Nu_{гд})'_{рикт}]_{max} = 2.60$ при $(l/d)'_{рикт} = 1.31$ для случая увеличения значений режимного параметра от $(Re'_{рикт})_{min} = 600$ до $Re_{II} = 2400$ и при его дальнейшем возрастании до $(Re'_{рикт})_{max} = 6000$ уменьшаются до $(Nu/Nu_{гд})'_{рикт} = 1.97$ при $(l/d)'_{рикт} = 3.23$. Это объясняется тем, что в каналах ППрс ТП в диапазоне значений критерия $Re = 600... 2550$ закон теплоотдачи соответствует переходному режиму течения теплоносителя со средним значением показателя степени $m \cong 0.48$ при Re в выражении $Nu = A \cdot Re^m$ для всех ППрс ТП 1... 6, а в диапазоне значений $Re = 2550... 10000$ – турбулентному со слабым увеличением значений m до 0.50... 0.62 (в зависимости от параметра $l/d = 0.65... 3.24$) [5]. В то же время в гладком канале закон теплоотдачи при значениях критерия $Re = 600... 2340$ соответствует ламинарному режиму течения ($m = 0.30$), что и обуславливает рост значений отношения $(Nu/Nu_{гд})'_{рикт}$. С наступлением в гладком канале закона теплоотдачи для переходного режима течения ($m = 0.51$) при значениях критерия $Re = 2340... 4380$, значение отношения $(Nu/Nu_{гд})'_{рикт}$ уменьшается с сохранением тенденции и при значениях $Re > 4380$ – для турбулентного ($m = 0.78$) режима течения [5].

Следует также отметить, что при изменении режимного параметра от $(Re'_{рикт})_{min} = 600$ до $Re_I = 1200$ величина параметра рассеяния уменьшается от $(l/d)'_{рикт} = 1.70$ до $[(l/d)'_{рикт}]_{min} = 1.23$. При дальнейшем увеличении режимного параметра от $Re_I = 1200$ до $(Re'_{рикт})_{max} = 6000$ величина параметра рассеяния возрастает сначала медленно от $[(l/d)'_{рикт}]_{min} = 1.23$ при $(Nu/Nu_{гд})'_{рикт} = 2.30$ до $(l/d)'_{рикт} = 1.31$ при $Re_{II} = 2400$ и $[(Nu/Nu_{гд})'_{рикт}]_{max} = 2.60$, а затем – резко до значения $[(l/d)'_{рикт}]_{max} = 3.23$ при $(Nu/Nu_{гд})'_{рикт} = 1.97$ на правой границе диапазона реализации процесса РИКТ по режимному параметру.

Графические зависимости $(l/d)'_{рикт} = f(Re)$ и $(Nu/Nu_{гд})'_{рикт} = f(Re)$ также отчётливо показывают (см. рис. 3), что при значениях определяющего комплекса $(Nu/Nu_{гд})_{Re=idem}/(\zeta/\zeta_{гд})_{Re=idem} = 1$ в диапазоне значений $(l/d)'_{рикт} = 1.70... 1.23$ каждому значению $(l/d)'_{рикт}$ отвечают две пары значений $Re_{л.в.}$, $[(Nu/Nu_{гд})'_{рикт}]_{л.в.}$ и $Re_{п.в.}$, $[(Nu/Nu_{гд})'_{рикт}]_{п.в.}$, соответствующие значениям Re на левой и правой ветвях графической зависимости $(l/d)'_{рикт} = f(Re)$ относительно точки I (1200, 1.23), за исключением случая при $[(l/d)'_{рикт}]_{min} = 1.23$, которому отвечает пара значений $Re_I = Re_{л.в.} = Re_{п.в.} = 1200$ и $[(Nu/Nu_{гд})'_{рикт}]_I = [(Nu/Nu_{гд})'_{рикт}]_{л.в.} = [(Nu/Nu_{гд})'_{рикт}]_{п.в.} = 2.30$. Следовательно, произвольно заданному значению параметра

рассечения $(l/d)^*$, отвечающему неравенству $1.23 < (l/d)^* < 1.70$, при $Re_{л.в} < Re^* < Re_{п.в}$ соответствует достигаемое значение оценки $[(Nu/Nu_{г.л})'_{рикт}]_{Re^*} < [(Nu/Nu_{г.л})'_{рикт}]_{Re^*}$ процесса РИКТ при значении определяющего комплекса $(Nu/Nu_{г.л})_{Re=idem}/(\zeta/\zeta_{г.л})_{Re=idem} > 1$. Так, в частности, параметру $(l/d)^* = 1.58$ при произвольном значении критерия $Re^* = 900$, удовлетворяющем неравенству $Re_{л.в} = 700 < Re^* = 900 < Re_{п.в} = 3000$ (см. зависимость $(l/d)'_{рикт} = f(Re)$ на рис. 3), соответствует достигаемое значение оценки $[(Nu/Nu_{г.л})'_{рикт}]_{Re^*=900} = 2.05 < [(Nu/Nu_{г.л})'_{рикт}]_{Re^*=900}$ процесса РИКТ (см. рис. 2, в).

В самом общем случае в диапазоне значений от $(Re'_{рикт})_{min} = 600$ до $(Re'_{рикт})_{max} = 6000$ произвольному значению Re^* могут соответствовать три значения параметра рассечения: 1) $(l/d)'_{рикт}$ – реализуется процесс РИКТ при $[(Nu/Nu_{г.л})'_{рикт}]_{Re^*=idem} = [(\zeta/\zeta_{г.л})'_{рикт}]_{Re^*=idem}$; 2) $(l/d)''_{рикт} > (l/d)'_{рикт}$ – реализуется процесс РИКТ при $[(Nu/Nu_{г.л})'_{рикт}]_{Re^*=idem} > [(\zeta/\zeta_{г.л})'_{рикт}]_{Re^*=idem}$, причём $[(Nu/Nu_{г.л})'_{рикт}]_{Re^*=idem} < [(Nu/Nu_{г.л})'_{рикт}]_{Re^*=idem}$; 3) $l/d < (l/d)'_{рикт}$ – реализуется интенсификация теплообмена при $(Nu/Nu_{г.л})_{Re^*=idem} < (\zeta/\zeta_{г.л})_{Re^*=idem}$, причём $(Nu/Nu_{г.л})_{Re^*=idem} > [(Nu/Nu_{г.л})'_{рикт}]_{Re^*=idem} > [(Nu/Nu_{г.л})'_{рикт}]_{Re^*=idem}$. В 1-м и 2-м случаях обеспечивается наиболее рациональное сокращение объёма ТА при неизменном или уменьшенном его конструктивном фронте за счёт уменьшения длины каналов ТП по ходу теплоносителя. В 3-м случае сокращение объёма ТА может произойти за счёт уменьшения длины каналов ТП по ходу теплоносителя при увеличении конструктивного фронта, что осложняет компоновку теплообменника и, как правило, неприемлемо для транспортных ТА [4].

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сложность аналитических решений задач конвективного теплообмена в некруглых интенсифицированных каналах пока по-прежнему приводит к необходимости опираться исключительно на экспериментальные данные при конструировании и расчётах теплообменных аппаратов.

Анализ литературных результатов исследований теплоаэродинамических характеристик каналов различной формы сечения показал перспективность использования пластинчато-ребристых теплообменных поверхностей для реализации в их прямоугольных каналах процесса РИКТ с вероятной оценкой $2.15 < [(Nu/Nu_{г.л})'_{рикт}]_{max} < 2.88$.

В результате систематического экспериментального исследования серии ПРрс ТП с параметрами $\delta/d = 0.0777$, $h/u = 6.93$, $L/d = 19.43$ и $l/d = variable$ ($l/d = 0.65, 0.97, 1.30, 1.94, 2.77, 3.24$) экспериментально установлены значения оценки процесса РИКТ $\{[(Nu/Nu_{г.л})'_{рикт}]_{Re=2400}\}_{max} = 2.60$ при $(Nu/Nu_{г.л})_{Re=2400}/(\zeta/\zeta_{г.л})_{Re=2400} = 1$ и определяющие условия реализации процесса РИКТ: $Re_{рикт} = 600 \dots 6000$; $(l/d)_{рикт} = 1.23 \dots 3.23$. Диапазоны дос-

тигаемых значений оценок реализуемого процесса РИКТ: $(Nu/Nu_{г.л})'_{рикт} = 1.89 \dots 2.60$ в области значений критерия $Re_{рикт} = 600 \dots 2400$; $(Nu/Nu_{г.л})'_{рикт} = 2.60 \dots 1.97$ – при $Re_{рикт} = 2400 \dots 6000$.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании ТА с использованием установленных диапазонов изменения значений режимного и основных безразмерных геометрических параметров каналов исследованного типа, определяющих реализацию процесса РИКТ.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ПР_{г.л}, ПР_{вк}, ПР_{рс} – пластинчато-ребристые гладкоканальная, с поперечными выступами и канавками и рассечённая ТП;

ТА – теплообменный аппарат;

d и d^* – эквивалентный диаметр канала ТП соответственно на гладком участке и в самом узком его сечении, м;

d^*/d – степень сужения сечения канала ПРвк ТП;

$Nu_{г.л}$, Nu – критерий Нуссельта ТП гладкоканальной и с искусственной турбулизацией потока теплоносителя в каналах;

Re – критерий Рейнольдса;

$\zeta_{г.л}$, ζ и $\xi_{г.л}$, ξ – коэффициенты потерь давления на трение и общих потерь давления (на вход, выход и трение) в каналах ТП соответственно гладкоканальных и с искусственной турбулизацией потока теплоносителя;

штрих и два штриха – конкретизируют отношение к процессам РИКТ при значениях определяющего комплекса

$(Nu/Nu_{г.л})_{Re=idem}/(\zeta/\zeta_{г.л})_{Re=idem} = 1$ и

$(Nu/Nu_{г.л})_{Re=idem}/(\zeta/\zeta_{г.л})_{Re=idem} > 1$.

Индекс:

рикт – указывает на отношение к процессам РИКТ при значениях определяющего комплекса $(Nu/Nu_{г.л})_{Re=idem}/(\zeta/\zeta_{г.л})_{Re=idem} \geq 1$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах. М.: Машиностроение, 1990. 208 с.
2. Интенсификация теплообмена. Успехи теплопередачи, 2 / Ю.В.Вилемас, Г.И.Воронин, Б.В.Дзюбенко и др.; Под ред. А.А.Жукаускаса, Э.К.Калинина. Вильнюс. 1988. 188 с.
3. Eckert E.R.G., Irvine N.F. Flow in corners with non-circular cross-sections// Trans. ASME, 1956. P. 709–718.
4. Dubrovsky E.V. and Vasiliev V.Yu. A Method for Relative Comparison of Thermohydraulic Efficiencies of Heat Transfer Surfaces and Heat Exchangers // Proceedings of the Third International Conference on Compact Heat Exchangers and Enhancement Technology for the Process Industries. Davos, Switzerland, 2001. P. 159–168.
5. Васильев В.Я. Эффективные методы рациональной интенсификации конвективного теплообмена в прямоугольных каналах пластинчато-ребристых и трубчато-пластинчатых теплообменных поверхностей. – CD (гос. рег. н-р 0320500321): Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках// Материалы второй Российской конференции, 15 – 17 марта 2005 г., Москва. М.: Издательство МЭИ, 2005. 15 с.