

УДК 536.27

ТЕПЛОАЭРОДИНАМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ КАНАЛОВ С ВИХРЕВОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИЕЙ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА В ПЕРЕХОДНОЙ РЕЖИМНОЙ ОБЛАСТИ ТЕЧЕНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

В.Я. Васильев

Астраханский государственный технический университет; vassiliev@astu.org

Два способа генерации вихрей (при обтекании плохо обтекаемых тел и на диффузорно-конфузорных участках) в пристеночном слое течений в прямоугольных каналах реализованы в 10-ти пластинчато-ребристых рассечённых (ПРрс) и 31-ой трубчато-пластинчатой с попережными выступами и канавками (ТПвк) теплообменных поверхностях (ТП) с целью определения закономерностей осуществления рациональной интенсификации конвективного теплообмена (РИКТ). Результаты экспериментальных исследований теплоаэродинамических характеристик 19-ти групп из ограниченного числа (4...6) ПРрс или ТПвк и одной, из 5-ти испытанных, гладкоканальной ТП ($L/d = 19.43$ – ПР_{2л} и $L/d = 10.50...15.62$ – ТП_{2л}) подтвердили реализацию процессов РИКТ и высокий уровень их оценок $(Nu/Nu_{2л})'_{max}$ при значении комплекса $(Nu/Nu_{2л})_{Re=idem}/(\zeta/\zeta_{2л})_{Re=idem} = 1$, показали вклад изменения значений геометрических параметров δ/d (0.0580...0.1138), l/d (0.65...3.24) ПРрс и d^/d (0.748...0.953), l/d (0.183...2.003) ТПвк ТП в величину оценок РИКТ. Предложена и, для исследованных групп ТП, реализована методика определения диапазонов изменения значений геометрических и режимного параметров, обуславливающих реализацию процесса РИКТ, упрощающая поиск рациональных решений при конструировании теплообменников. Специальные меры подготовки экспериментов позволили максимально исключить отрицательное влияние на результаты ряда побочных факторов.*

Ключевые слова

Рациональная интенсификация конвективного теплообмена, генерация вихрей, рассечённая поверхность теплообмена, дискретный турбулизатор, выступы и канавки

Условные обозначения

ПР_{гл} и ПР_{рс} – пластинчато-ребристые гладкоканальная и рассечённая ТП; РИКТ – рациональная интенсификация конвективного теплообмена; ТА – теплообменный аппарат; ТП – теплообменная поверхность; ТП_{гл} и ТП_{вк} – трубчато-пластинчатые гладкоканальная и с выступами и канавками ТП; А, В – коэффициенты в аппроксимирующих зависимостях; а – ширина плоскоооальной трубки, м; d и d* – эквивалентный диаметр канала ТП на гладком участке и в самом узком его сечении, м; d*/d – степень сужения сечения канала; Н – высота гофра ПР_{рс} и ПР_{гл} ТП, м; h – высота канала, м; L – глубина хода воздуха в каналах ТП, м; L/d – относительная глубина хода воздуха в каналах ТП; l – длина ребра ПР_{рс} или гладкого участка канала ТП_{вк} ТП, м; l/d – параметр рассечения ПР_{рс} ТП или относительная длина гладкого участка канала ТП_{вк} ТП; k, n – показатели степени в аппроксимирующих зависимостях; Nu, Nu_{гл} – критерий Нуссельта ТП соответственно гладкоканальных и с искусственной турбулизацией теплоносителя; R и r – наружный и внутренний радиусы округления угла при вершине сечения выступов и канавок ТП_{вк} ТП, м; Re – критерий Рейнольдса; s – шаг рёбер, м; t₁ и t₂ – шаги расположения плоскоооальных трубок, м; u – расстояние между рёбрами, м; u* – расстояние между выступами соседних рёбер, м; δ – толщина ребра, м; δ/d – относительная толщина ребра ПР_{рс} ТП; δ_v – высота выступа, м; $2\delta_v/d$ – относительная высота выступа ТП_{вк} ТП; $\delta_{п.т}$ – расстояние между вершинами двусторонних выступов ребра, м; $\delta_{п.т}$ – толщина плоскоооальной трубки, м; ϵ_t – коэффициент турбулентной вязкости, Па·с; ζ ;

$\zeta_{\text{гл}}$ или ξ , $\xi_{\text{гл}}$ – коэффициенты потерь давления на трение или суммарных (на вход, трение и выход) в каналах ТП гладкоканальных и с искусственной турбулизацией теплоносителя; $\lambda_{\text{т}}$ – коэффициент турбулентной теплопроводности, Вт/(м·К); ϕ – угол наклона поверхности выступа к направлению осреднённого потока воздуха, °; $(K_{\zeta})_{\text{Re=idem}}$ или $(K_{\xi})_{\text{Re=idem}}$ – комплекс $(\text{Nu}/\text{Nu}_{\text{гл}})_{\text{Re=idem}}/(\zeta/\zeta_{\text{гл}})_{\text{Re=idem}} \geq 1$ или $(\text{Nu}/\text{Nu}_{\text{гл}})_{\text{Re=idem}}/(\xi/\xi_{\text{гл}})_{\text{Re=idem}} \geq 1$, определяющий реализацию процесса РИКТ; «'» или «''» – указывают на конкретизацию значений параметров при условиях $(K_{\zeta}, \xi)_{\text{Re=idem}} = 1$ или $(K_{\zeta}, \xi)_{\text{Re=idem}} > 1$; idem – одинаковый; m, max, min – среднее, максимальное и минимальное значения величины.

ВВЕДЕНИЕ

В технике различают два важных подкласса пластинчато-ребристых ТА: конструкция типа «плоское ребро – плоское ребро» и конструкция типа «плоское ребро – труба» [1]. В данной работе ребристые ТП теплообменников первого подкласса определяются как пластинчато-ребристые гладкоканальные и рассечённые (рис. 1, а) [2]. ТП теплообменников второго подкласса определяются как трубчато-пластинчатые гладкоканальные и с периодически расположенными попарно сопряжёнными двумерными поперечными выступами и канавками или ТП периодического дросселирования потока теплоносителя (рис. 2, а) [3].

В теоретической и экспериментальной гидродинамике известны два способа генерации вихрей в пристеночном слое течений тепло- и хладоносителей в круглых и некруглых каналах: при обтекании плохо обтекаемых тел и на участках диффузно-конфузорных течений при соответствующих углах раскрытия диффузора. Первый способ искусственного вихреобразования реализуется в пластинчато-ребристых ТА применением рассечённых каналов вместо длинных гладких (рис. 1, а), второй – в трубчато-пластинчатых ТА применением вместо гладких профилированных охлаждающих пластин (рёбер) с периодически расположенными поперечными выступами и канавками (рис. 2, а). Конструкторы ТА с указанными ТП опираются исключительно на экспериментальные данные, в связи со сложностью аэродинамики и механизма теплообмена, не поддающимися пока анализу методами теории пограничного слоя [4, 5]. Результаты тщательно спланированных систематических экспериментальных исследований тепловых и аэродинамических характеристик прямоугольных каналов ПРрс и ТПвк ТП подтвердили [5, 6] реализацию в них процессов РИКТ с высоким уровнем достигаемых максимальных величин оценки $(\text{Nu}/\text{Nu}_{\text{гл}})'_{\text{max}}$. Однако анализ реализованного процесса РИКТ, традиционно основанный на графическом представлении трёх экспериментальных зависимостей $K_{\zeta} = f(\text{Re})$, $\text{Nu}/\text{Nu}_{\text{гл}} = f(\text{Re})$, $\zeta/\zeta_{\text{гл}} = f(\text{Re})$ [7], позволяет показать изменение этих функций только для реально испытанных нескольких (обычно 4...6) опытных ТА, не позволяя показать условия реализации процесса РИКТ и сделать определённые выводы для любых других значений варьировавшегося геометрического параметра внутри всего диапазона изменения его исследованных значений.

С целью сохранения преемственности в данной работе обозначения и номера ТП соответствуют основным публикациям [2, 3, 6] по теме настоящего исследования.

1. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения экспериментального исследования с целью определения закономерностей осуществления РИКТ двумя способами искусственной турбулизации потока теплоносителя в прямоугольных каналах были спроектированы и изготовлены одиннадцать пластинчато-ребристых (ПРрс ТП 1...6, 8...11 и ПРгл ТП 7) и тридцать пять трубчато-пластинчатых (ТПвк ТП 1...31 и ТПгл ТП 32...35) ТП. Гладкоканальные (ПРгл ТП 7 и ТПгл ТП 32...35) теплообменные насадки обеспечивали возможность оценки интенсификации теплообмена обоими способами [7].

1.1. Пластинчато-ребристые поверхности теплообмена

Опытные ТА состояли из рассечённых ТП (рис. 1, а) с прямоугольными каналами, припаянных к поверхностям плоских трубок (рис. 1, б).

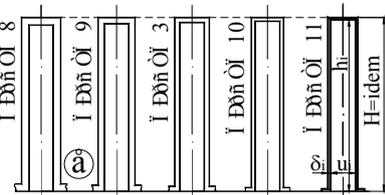
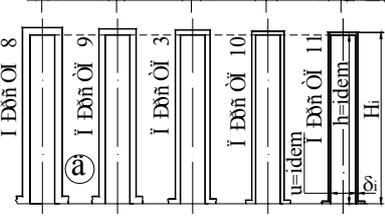
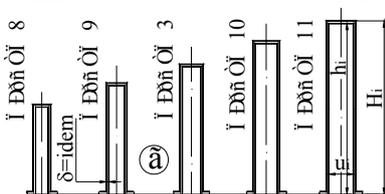
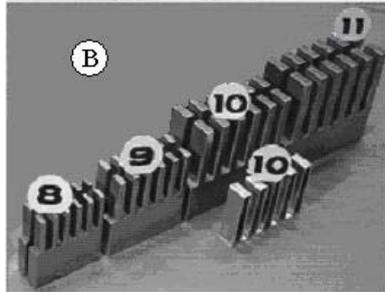
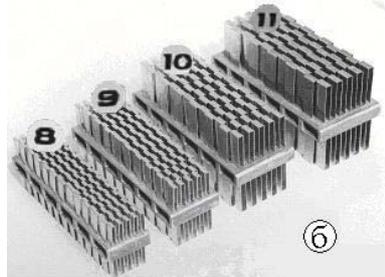
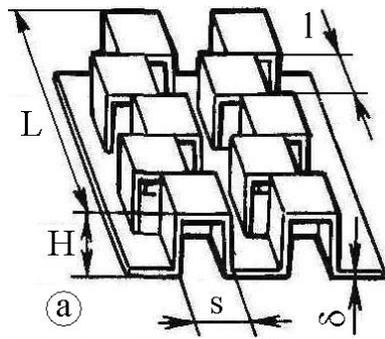


Рис. 1. Геометрические параметры – а, образцы опытных ТА (при $\delta = idem$) – б, матрицы, пуансоны, единственный гофр – в и варианты проектирования ПРрс ТП при: $\delta = idem$ – г; $h = idem$ и $u = idem$ – д; $H = idem$ – е

В работе [4] отмечается, что при изготовлении ТА рёбра получаются несколько изогнутыми или искривлёнными, имеет место неравномерность в их расположении на пластине (плоской трубке), лобовые кромки стенок каналов имеют скошенные края, причём углы скоса меняются. Использование при изготовлении всех объектов исследования матриц и пуансонов (рис. 1, в), а также отсутствие напряжений, характерных для конструкций ТА, выполненных по чётной или нечётной схемам методом спекания, позволили чётко выдержать постоянство заданных размеров и формы поперечных сечений каналов и не допустить искривлений и неравномерности расположения рёбер в теплообменных насадках. Из возможных вариантов изготовления объектов ПРрс ТП для исследования влияния геометрического параметра $\delta/d = variable$, суть которых поясняется рис. 1, г, д, е, предпочтение было отдано варианту, при котором изменение значения параметра δ/d достигается изменением величины эквивалентного диаметра d канала при неизменной толщине δ стенки ребра (рис. 1, г). Использование для изготовления рёбер алюминиевого сплава одной и той же твёрдости при условии $\delta = constant$ способствовало обеспечению идентичности состояния резаных лобовых кромок рёбер и эффекта генерации ими, как плохо обтекаемыми телами, вихревых структур во входных сечениях каналов. Обеспечение подобия лобовых кромок рёбер при их изготовлении из резаных лент даже одного и того же металла, но при $\delta = variable$ (рис. 1, д, е), представляется проблематичным.

1.2. Трубочато-пластинчатые поверхности теплообмена

Для получения оценок интенсификации конвективного теплообмена в прямоугольных каналах трубочато-пластинчатых теплообменных поверхностей с дискретными турбулизаторами было подготовлено систематическое экспериментальное исследование теплоаэродинамических характеристик тридцать одной ТПвк ТП с размерами сечений каналов $h \cdot u = 12 \cdot 6.9, 12 \cdot 5.9, 12 \cdot 4.9$ и $12 \cdot 3.9$ мм и плавно округлёнными двумерными поверхностями поперечных выступов и канавок соответственно с величинами $L/d = 10.50, 11.63, 13.22, 15.62$ и диапазонами изменения значений геометрических параметров $d^*/d = 0.748...0.953, l/d = 0.183...2.003$ и $h/u = 1.739...3.077$. Общий вид ТПвк ТП, с указанием основных размеров, показан на рис. 2, а. Для оценки уровня возможного процесса РИКТ в каналах ТПвк ТП 1...31 были исследованы также четыре ТПгл ТП 32...35 с величинами $L/d = 10.50, 11.63, 13.22$ и 15.62 .

Охлаждающие пластины с поперечными выступами и канавками для четырёхрядных трубчатопластинчатых опытных ТА изготавливались с помощью специальных наборных роторных матриц и пуансонов, обеспечивавших соблюдение необходимых размеров. Формующие элементы цилиндрических поверхностей парных роторов представлены волнообразными поперечными профилями, соответственно, с пуансонами и матричными отверстиями. Парные роторы для серийного изготовления шестирядных водо-воздушных радиаторов с ТПвк ТП показаны на рис. 2, б. Для экспериментального исследования были изготовлены из меди МЗ толщиной 0.1 мм двенадцать вариантов гофрированных пластин с соблюдением различных сочетаний размеров l и δ_v (рис. 2, а, в) и один вариант – гладких. Использование их при сборке ребристых теплообменных поверхностей с соблюдением 4-х значений шага ($s = 4; 5; 6; 7$ мм) позволило подготовить, соответственно, тридцать один типоразмер опытных ТА с дискретными турбулизаторами (ТПвк ТП 1...31) и четыре – гладкоканальных (ТПгл ТП 32...35). Конструктивный фронт по воздуху сердцевины каждого опытного ТА составлял $420 \cdot 150$ мм, а глубина хода воздуха в каналах $L = 92$ мм. Для определения влияния изменения величин основных геометрических параметров на изменение тепловых и аэродинамических характеристик все тридцать пять типоразмеров ТП были разбиты на семнадцать групп: восемь для испытаний при $l/d = \text{variable}$ и $d^*/d = \text{idem}$; девять – при $d^*/d = \text{variable}$ и $l/d = \text{idem}$. Все опытные ТА имели одинаковые значения шагов установки плоскоовальных трубок (из меди МЗ толщиной 0.15 мм и неизменными габаритными размерами сечения $a = 18$ мм и $\delta_{п.т} = 3$ мм) по глубине $t_1 = 23$ мм и ширине $t_2 = 15$ мм сердцевины ТА, расстояния по фронту между плоскоовальными трубками $h = 12$ мм и четыре значения шага s установки в опытных ТА гофрированных и гладких рёбер (рис. 2, а): 4 мм – ТП 1...11 и 32; 5 мм – ТП 12...21 и 33; 6 мм – ТП 22...25 и 34; 7 мм – ТП 26...31 и 35.

2. РИКТ ГЕНЕРАЦИЕЙ ВИХРЕЙ ПРИ ВХОДЕ В РАССЕЧЁННЫЕ КАНАЛЫ

Рассечение длинных гладких каналов приводит к разрушению пограничного слоя и повышению интенсивности теплоотдачи при тех же условиях движения газообразного теплоносителя. Чем меньше величина параметра l/d , тем чаще происходит искусственное возмущение пограничного слоя за счёт генерации в нём вихрей неудобнообтекаемой турбулизирующей входной кромкой канала, обуславливающее подвод дополнительной энергии к потоку в тонком пристеночном слое со слабой последующей диффузией вихрей в ядро потока, тем выше коэффициент теплоотдачи, хотя одновременно растёт коэффициент аэродинамического сопротивления. На небольшой длине l (по сравнению с L , см. рис. 1, а) короткого канала ПРрс ТП наибольшее входное значе-

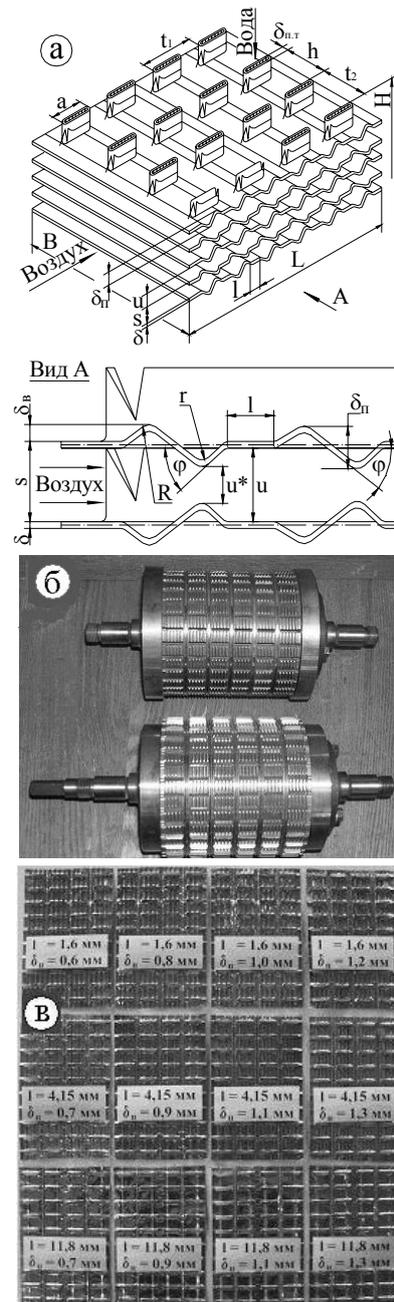


Рис. 2. Геометрические характеристики – а, роторные матрица и пуансон – б и образцы рёбер исследованных ТПвк ТП

ние критерия Nu снижается незначительно. Используя такую поверхность теплообмена, можно делать рёбра короткими ($l/d \ll L/d$) в направлении движения потока теплоносителя, а изменяя величину параметра δ/d управлять масштабом генерируемых вихрей, достигая весьма высоких средних значений коэффициента теплоотдачи при умеренном росте аэродинамического сопротивления ПРрс ТП.

2.1. Влияние на РИКТ изменения параметра рассеечения

Способ повышения теплоаэродинамической эффективности гладкоканальных ТП рассеением их длинных каналов связан со сложными структурами теплового и аэродинамического процессов, имеющими место в некруглых каналах ПРрс ТП. Решающим фактором, влияющим на интенсификацию конвективного теплообмена в каналах ПРрс ТП, является параметр l/d , причём, наибольший интерес представляют рассечённые теплообменные поверхности со значениями $l/d < (5...3)$ [2, 5, 6], так как генерируемые во входных сечениях каналов вихри, приводят к наиболее интенсивному росту коэффициента теплоотдачи. Данные аппроксимации степенными функциями вида $Nu = A \cdot Re^k$ и $\zeta = B \cdot Re^n$ экспериментальных зависимостей $Nu = f(Re)$ и $\zeta = f(Re)$ [2] позволили построить для выборочных значений критерия Рейнольдса зависимости $Nu/Nu_{гл} = f(l/d)$ и $\zeta/\zeta_{гл} = f(l/d)$, координаты точек пересечения которых определяют значения оценки $(Nu/Nu_{гл})'$ процесса РИКТ и параметра рассеечения $(l/d)'$, являющиеся, соответственно, наибольшими и наименьшими их значениями при $(K_\zeta)_{Re=idem} = 1$ [6]. Совокупность представленных на рис. 3, а результатов графических определений величин $(Nu/Nu_{гл})'$ и $(l/d)'$ для выборочных значений критерия Рейнольдса показывает, что для группы ПРрс ТП 1...6, отличающихся только величиной параметра $l/d = variable$ ($l/d = 0.65, 0.97, 1.30, 1.94, 2.77, 3.24$) при неизменных значениях остальных геометрических параметров $\delta/d = 0.0777$, $h/u = 6.93$, процесс РИКТ реализуется в достаточно широких пределах изменения значений режимного параметра $(Re'_{min} = 600) \leq Re \leq (Re'_{max} = 6000)$, причём значение $Re'_{min} = 600$ определяется нижней границей общего диапазона изменения значений критерия $Re = 600...10000$ проведённого исследования. На композиционном рис. 4, а представлены зависимости $K_\zeta = f(Re)$, $Nu/Nu_{гл} = f(Re)$, $\zeta/\zeta_{гл} = f(Re)$ и $(l/d)' = f(Re)$, последняя из которых совокупностью своих точек обуславливает величины определяющего геометрического параметра $1.23 \leq (l/d)' \leq 3.23$ и область значений режимного параметра $600 \leq Re' \leq 6000$, при которых с оценкой $(Nu/Nu_{гл})'$ и значением $(K_\zeta)_{Re=idem} = 1$ реализуется процесс РИКТ.

2.2. Влияние на РИКТ изменения параметра относительной толщины ребра

Рассмотрение вариантов зависимостей $\zeta/\zeta_{гл} = f(Re)$ и $Nu/Nu_{гл} = f(Re)$ при различных значениях $Re = idem$ и определение координат точек их пересечения (рис. 3, б), позволило построить зависимости $(\delta/d)' = f(Re)$ и $(Nu/Nu_{гл})' = f(Re)$ для диапазона значений критерия Re' при условии $(K_\zeta)_{Re=idem} = 1$ реализации процесса РИКТ. Совокупность представленных на рис. 3, б результатов графических определений величин $(Nu/Nu_{гл})'$ и $(\delta/d)'$ для выборочных значений критерия Рейнольдса показывает, что для группы ПРрс ТП 8, 9, 3, 10, 11, отличающихся только величиной геометрического параметра $\delta/d = variable$ ($\delta/d = 0.1138, 0.0912, 0.0777, 0.0658, 0.0580$) при неизменных значениях остальных геометрических параметров $(l/d)_m = 1.30$, $(h/u)_m = 6.95$, процесс РИКТ также реализуется в достаточно широких пределах изменения значений режимного параметра $(Re'_{min} = 600) \leq Re \leq (Re'_{max} = 4400)$.

Для оценки теплоаэродинамической эффективности исследованных ПРрс ТП 3, 8...11 на рис. 4, б приведены зависимости $\zeta/\zeta_{гл} = f(Re)$, $Nu/Nu_{гл} = f(Re)$ и $K_\zeta = f(Re)$, последняя из которых позволяет определить соблюдение условия РИКТ. Анализ этих ре-

зультатов показал, что влияние изменения значений параметра δ/d на теплоотдачу наиболее сильно проявляется в диапазоне значений критерия Рейнольдса от 550 до 3500, а на коэффициент общих потерь давления – в диапазоне значений от 1100 до 10000. При этом с уменьшением значений параметра δ/d в диапазоне значений $\delta/d = 0.058 \dots 0.1138$ для $(l/d)_m = (l/d)'_{\min} = 1.30$ при $Re = idem$ во всём исследованном диапазоне чисел $Re = 500 \dots 10000$, значения критерия Нуссельта увеличиваются, а значения коэффициента общих потерь давления уменьшаются. Отмеченное объясняется тем, что при меньших исследованных значениях параметра $\delta/d = 0.058 \dots 0.0777$ для условий проведённых экспериментов сгенерированные на острых кромках стенок коротких каналов вихри имеют относительно меньший масштаб и распространяются вдоль потока в основном только в области пристеночного слоя, увеличивая в нём турбулентные параметры потока λ_T и ε_T . В результате в рассмотренных ППрс ТП наиболее эффективно реализуется процесс интенсификации теплоотдачи при умеренных значениях коэффициента общих потерь давления, которые в основном определяются подводом дополнительной энергии к потоку теплоносителя в тонком пристеночном слое, не затрагивая ядра этого потока [2]. При значениях параметра $\delta/d > 0.0777$ внешняя граница отрывной зоны удаляется от стенки канала, увеличивая толщину рециркуляционной области отрыва. Поэтому в непосредственной близости от стенки канала в рециркуляционной зоне отрыва значения турбулентных параметров потока λ_T и ε_T уменьшаются, что приводит к уменьшению значений оценки интенсификации теплоотдачи. Кроме того, в области присоединения и последующего развития пограничного слоя значения турбулентных параметров потока λ_T и ε_T меньше в сравнении со случаем тонкого ребра, отвечающего значениям $\delta/d \leq 0.0777$. Отмеченное обстоятельство объясняется сравнительным уменьшением кинетической энергии присоединяющегося пограничного слоя и значений турбулентных пульсаций скорости в нём в области присоединения и, соответственно, в области последующего развития пограничного слоя. При этом масштаб сгенерированных во входных сечениях каналов вихрей увеличивается, а их распространение вдоль потока происходит как в области пристеночного слоя, так и в ядре потока. Причём область ядра потока теплоносителя, занятая распространяющимися вихрями, с увеличением значений параметра $\delta/d > 0.0777$ увеличивается. Как показано в работах [2, 5, 6], дополнительная энергия, подведённая к потоку на образование и распространение вихрей, расположенных за пределами пристеночного слоя, не способствует росту интенсификации конвективного теплообмена и приводит только к увеличению аэродинамического сопротивления.

Совместный анализ зависимостей $K_\zeta = f(Re)$, $(Nu/Nu_{грл})' = f(Re)$ и $(\delta/d)' = f(Re)$, построенных по результатам испытаний группы ППрс ТП 8, 9, 3, 10, 11 с параметрами $(l/d)_m = (l/d)'_{\min} = 1.30$, $(h/u)_m = 6.95$ и $\delta/d = variable$ ($\delta/d = 0.1138, 0.0912, 0.0777, 0.0658, 0.0580$) для условий проведённого экспериментального исследования, позволил установить предел рационального уменьшения параметра $(\delta/d)'_{\min} = 0.061$ и достигаемую при условии $(K_\zeta)_{Re=idem} = 1$ и значении $Re' = 4400$ величину $(Nu/Nu_{грл})'_{\max} = 2.78$. Дальнейшее уменьшение величины параметра δ/d не отвечает условию РИКТ. Приведённые зависимости $K_\zeta = f(Re)$, $(Nu/Nu_{грл})' = f(Re)$ и $(\delta/d)' = f(Re)$ позволяют при проектировании ТА определять величины $(Nu/Nu_{грл})'_{\max}$ и Re' при любой задаваемой в диапазоне значений от 0.061 до 0.0787 величине параметра δ/d , отличной от частных значений, имевших место в эксперименте при соблюдении условия $(K_\zeta)_{Re=idem} = 1$. Идентичные приведённым на рис. 3, б графические решения с использованием величины δ/d могут быть получены при использовании параметров в виде d/δ и d^*/d [см. зависимости $(d/\delta)' = f(Re)$ и $(d^*/d)' = f(Re)$ на рис. 4, б].

3. РИКТ ГЕНЕРАЦИЕЙ ВИХРЕЙ ДИСКРЕТНЫМИ ТУРБУЛИЗАТОРАМИ

На участках диффузорных канальных течений ТПвк ТП осуществляется генерация вихрей в пристеночном слое течений теплоносителей. Важно отметить, что масштаб и интенсивность генерируемых вихрей, обуславливающие значения турбулентных параметров потока теплоносителя в пристеночном слое в области повторного присоединения и развития пограничного слоя, определяются режимным и многими геометрическими параметрами, среди которых наиболее важным является высота δ_b плавно округлённых профилей дискретных турбулизаторов потока – поперечных выступов. Влияние величины δ_b на изменение значений теплоаэродинамических характеристик ТПвк ТП обычно оценивается геометрическим параметром d^*/d . Рассмотрим влияние изменения величины этого параметра на условия реализации процесса РИКТ на примере четырёх групп ТПвк и ТПгл ТП: 12...15 и 33; 16...19 и 33; 22...25 и 34; 26...28 и 35.

Результаты аппроксимации полученных экспериментальных зависимостей $Nu = f(Re)$ и $\xi = f(Re)$ степенными функциями вида $Nu = A \cdot Re^k$ и $\xi = B \cdot Re^n$ [3] позволили для всех групп ТПвк ТП, в каналах которых реализуется процесс РИКТ, построить графические зависимости $Nu/Nu_{гл} = f(d^*/d)$ и $\xi/\xi_{гл} = f(d^*/d)$ при $Re = idem$, координаты точек пересечения которых для каждой выбранной величины критерия Рейнольдса (см. рис. 3, в для группы ТПвк ТП 22...25) определяют наибольшее значение оценки $(Nu/Nu_{гл})'$ процесса РИКТ и наименьшее значение параметра степени сужения сечения канала $(d^*/d)'$ [6]. Совокупность представленных на рис. 3, в вариантов графических определений величин $(Nu/Nu_{гл})'$ и $(d^*/d)'$ при $Re = idem$ показывает, что для группы ТПвк ТП 22...25, отличающихся только величиной параметра $d^*/d = variable$ ($d^*/d = 0.942; 0.917; 0.892; 0.867$) при $l/d = 0.202 = idem$, $h/u = 2.034 = idem$, $L/d = 11.63 = idem$, процесс РИКТ реализуется в достаточно широких пределах изменения значений режимного параметра $(Re'_{min} = 800) \leq Re \leq (Re'_{max} = 3000)$.

Идентичное графическое решение может быть получено при использовании симплекса $d/2 \cdot \delta_b$ [зависимости $Nu/Nu_{гл} = f(d/2 \cdot \delta_b)$ и $\xi/\xi_{гл} = f(d/2 \cdot \delta_b)$ при $Re = idem$] или обратной величины $2 \cdot \delta_b/d$ [зависимости $Nu/Nu_{гл} = f(2 \cdot \delta_b/d)$ и $\xi/\xi_{гл} = f(2 \cdot \delta_b/d)$ при $Re = idem$]: приведённые в [6] графические решения показали, что использование симплекса $d/2 \cdot \delta_b$, наряду с параметром d^*/d , приводит к совпадающим с удовлетворяющей инженерную практику точностью (не хуже чем $\pm 2\%$) результатам.

На композиционном рис. 4, д представлены зависимости $K_\xi = f(Re)$, $Nu/Nu_{гл} = f(Re)$, $(\delta_b/d)' = f(Re)$, $(d/\delta_b)' = f(Re)$ и $(d^*/d)' = f(Re)$, последние три из которых совокупностью своих точек обуславливают диапазоны значений определяющих геометрических безразмерных характеристик в виде $0.063 \leq (2 \cdot \delta_b/d)' \leq 0.109$, $9.155 \leq (d/2 \cdot \delta_b)' \leq 15.820$, $0.896 \leq (d^*/d)' \leq 0.941$ и режимного параметра $(Re'_{min} = 800) \leq Re' \leq (Re'_{max} = 3000)$, при которых с оценкой $(Nu/Nu_{гл})'$ и значением определяющего комплекса $K_\xi = 1$, реализуется процесс РИКТ.

Аналогичные построения для отличающихся только величиной параметра $d^*/d = variable$ групп ТПвк ТП 12...15 ($d^*/d = 0.925; 0.894; 0.862; 0.829$) при $l/d = 0.230 = idem$, $h/u = 2.45 = idem$, $L/d = 13.22 = idem$, ТПвк ТП 16...19 ($d^*/d = 0.909; 0.878; 0.846; 0.813$) при $l/d = 0.596 = idem$, $h/u = 2.45 = idem$, $L/d = 13.22 = idem$ и 26...28 ($d^*/d = 0.953; 0.913; 0.893$) при $l/d = 0.183 = idem$, $h/u = 1.74 = idem$, $L/d = 10.50 = idem$, зависимостей $Nu/Nu_{гл} = f(d^*/d)$ и $\xi/\xi_{гл} = f(d^*/d)$, а также $Nu/Nu_{гл} = f(d/2 \cdot \delta_b)$ и $\xi/\xi_{гл} = f(d/2 \cdot \delta_b)$ при $Re = idem$ (в данной статье не приводятся), позволили графически определить соответствующие друг другу величины $(Nu/Nu_{гл})'$ и $(d^*/d)'$, а также $(Nu/Nu_{гл})'$ и $(d/2 \cdot \delta_b)'$ для, соответственно, 7-ми, 11-ти и 10-ти выборочных значений критерия Re , и положить их в основу построения зависимостей $(2 \cdot \delta_b/d)' = f(Re)$, $(d/2 \cdot \delta_b)' = f(Re)$ и $(d^*/d)' = f(Re)$, приведённых на композиционных рис. 4, в, г, е.

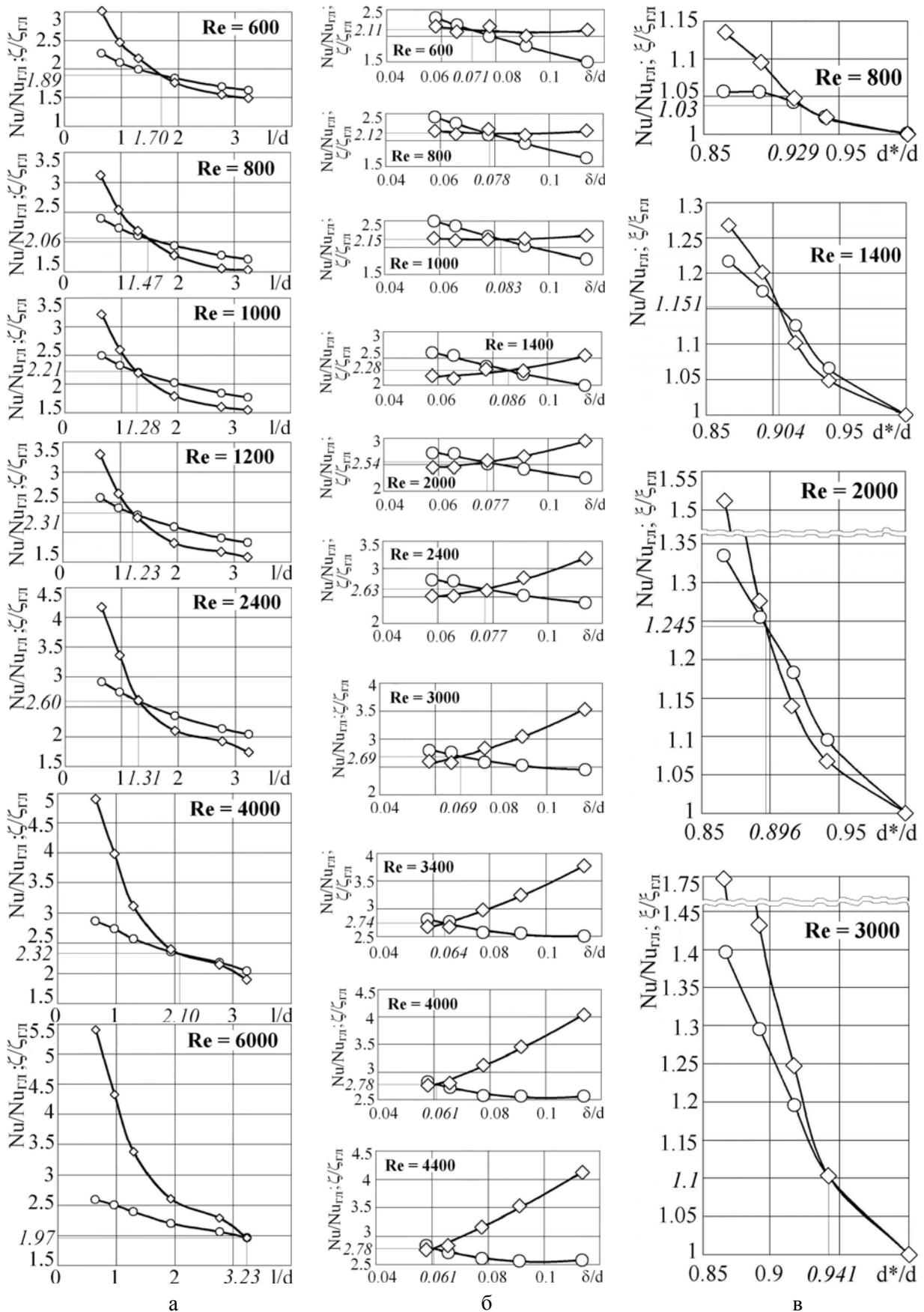


Рис. 3. Зависимости при $Re = idem$: $Nu/Nu_{гр} = f(l/d)$ и $\zeta/\zeta_{гр} = f(l/d)$ для ПРрс ТП 1...6 при $\delta/d = 0.0777$ – а; $Nu/Nu_{гр} = f(\delta/d)$ и $\zeta/\zeta_{гр} = f(\delta/d)$ для ПРрс ТП 3, 8...11 при $(l/d)_m = 1.30$ – б; $Nu/Nu_{гр} = f(d^*/d)$ и $\xi/\xi_{гр} = f(d^*/d)$ для ТПвк ТП 22...25 при $l/d = 0.202$ – в; \circ – $Nu/Nu_{гр}$; \diamond – $\zeta/\zeta_{гр}$ и $\xi/\xi_{гр}$

4. ФИЗИЧЕСКАЯ ОБЩНОСТЬ ПРОЦЕССА РИКТ, РЕАЛИЗУЕМОГО В ПРЯМОУГОЛЬНЫХ КАНАЛАХ ДВУМЯ РЕЗУЛЬТАТИВНЫМИ СПОСОБАМИ

Приведённые графические зависимости $(l/d)' = f(Re)$ для группы ПРрс ТП 1...6 (см. рис. 4, а) и $(d^*/d)' = f(Re)$ для групп ПРрс ТП 3, 8...11, ТПвк ТП 12...15, 16...19, 22...25, 26...28 (см. рис. 4, б...е) аналогичны по форме, характеризуются однотипными провалами в кривых и весьма близки по характерам протекания зависимостей $(\delta/d)' = f(Re)$ для ПРрс ТП и $(2\delta_B/d)' = f(Re)$ для ТПвк ТП [или $(d/\delta)' = f(Re)$ для ПРрс ТП и $(d/2\delta_B)' = f(Re)$ для ТПвк ТП].

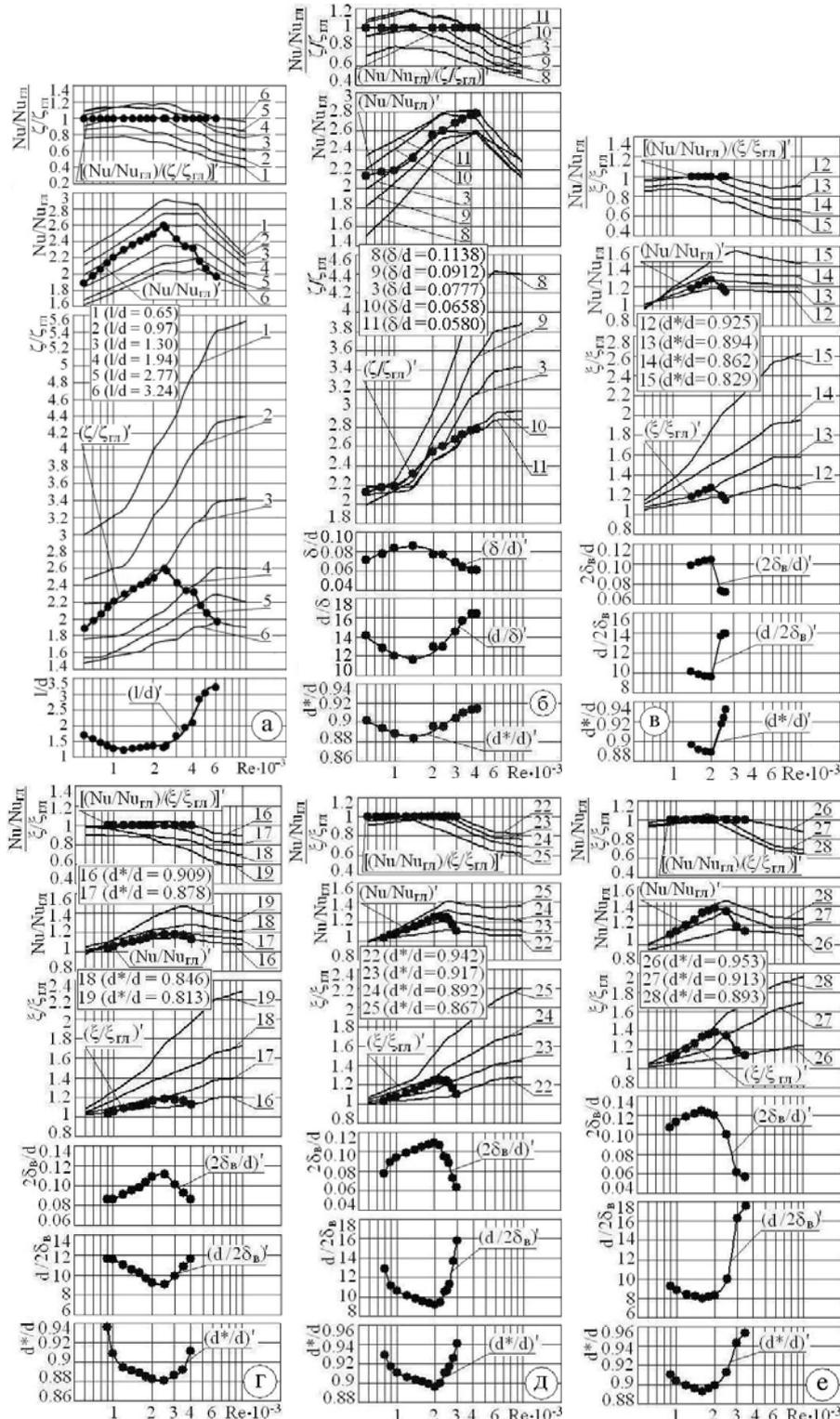


Рис. 4. Зависимости определяющего комплекса РИКТ $(Nu/Nu_{fm})/(zeta/zeta_{fm}) = f(Re)$ – а, б или $(Nu/Nu_{fm})/(xi/xi_{fm}) = f(Re)$ – в, г, д, е; относительных тепловых $Nu/Nu_{fm} = f(Re)$ – а, б, в, г, д, е и аэродинамических в виде $(zeta/zeta_{fm}) = f(Re)$ – а, б или $(xi/xi_{fm}) = f(Re)$ – в, г, д, е характеристик; определяющих безразмерных геометрических параметров $l/d = f(Re)$ – а; $\delta/d = f(Re)$, $d/\delta = f(Re)$ и $d^*/d = f(Re)$ – б; $2\delta_B/d = f(Re)$, $d/2\delta_B = f(Re)$ и $d^*/d = f(Re)$ – в, г, д, е; для ПРрс ТП 1...6 при $\delta/d = 0.0777$ и $l/d = \text{variable} = 0.65...3.24$ – а; для ПРрс ТП 8, 9, 3, 10, 11 при $l/d = 1.30$ и $\delta/d = \text{variable} = 0.1138...0.0580$; для ТПвк ТП 12...15 при $l/d = 0.230$ и $d^*/d = \text{variable} = 0.925...0.829$ – в; для ТПвк ТП 16...19 при $l/d = 0.596$ и $d^*/d = \text{variable} = 0.909...0.813$ – г; для ТПвк ТП 22...25 при $l/d = 0.202$ и $d^*/d = \text{variable} = 0.942...0.867$ – д; для ТПвк ТП 26...28 при $l/d = 0.183$ и $d^*/d = \text{variable} = 0.953...0.893$ – е; знак «'» указывает на соответствие значению комплекса РИКТ $(K_{zeta, xi})_{Re=idem} = 1$

Физическая общность процесса РИКТ, реализуемого обоими способами [2, 3] искусственной турбулизации потока теплоносителя, усматривается из рис. 5, иллюстрирующего все возможные варианты достигаемой интенсификации конвективного теплообмена.

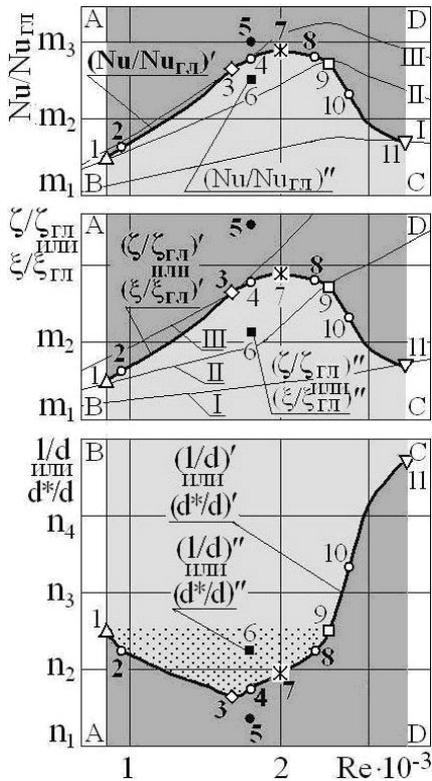


Рис. 5. Схематизация области изменения значений основных геометрических параметров, определяющих реализацию процесса РИКТ в прямоугольных каналах ПРрс и ТПвк ТП

Процесс по ниспадающей левой ветви 1-2-3 зависимостей $(l/d)' = f(Re)$ и $(d^*/d)' = f(Re)$ объясняется воздействием искусственной турбулизации на более толстый пристеночный пограничный слой в переходной области режима течения теплоносителя при наличии тенденции опережающего роста относительной тепловой характеристики $Nu/Nu_{GL} = f(Re)$ по сравнению с ростом относительных аэродинамических характеристик $\zeta/\zeta_{GL} = f(Re)$ для ПРрс ТП или $\xi/\xi_{GL} = f(Re)$ для ТПвк ТП и сопровождается уменьшением значений кривых $(l/d)' = f(Re)$ или $(d^*/d)' = f(Re)$ до наименьших значений $(l/d)'_{min} = (l/d)'_3$ или $(d^*/d)'_{min} = (d^*/d)'_3$, что равносильно уменьшению длины короткого ребра по ходу теплоносителя до значения $(l)'_{min}$ и увеличению высоты выступа до значения $(\delta_B)'_{max}$. Затем с ростом значений критерия Re и наступлением более развитого турбулентного режима прекращается опережающий рост отношения Nu/Nu_{GL} над ростом отношений ζ/ζ_{GL} или ξ/ξ_{GL} , соответственно, величина определяющего комплекса $(K_\zeta)_{Re=idem} > 1$ или $(K_\xi)_{Re=idem} > 1$ уменьшается и принимает при $Re'_{11} = Re'_{max}$ предельное для процесса РИКТ значение $(K_\zeta)_{Re=idem} = 1$ или $(K_\xi)_{Re=idem} = 1$.

При этом значение параметра возрастает до $(l/d)'_{11} = (l/d)'_{max}$ или $(d^*/d)'_{11} = (d^*/d)'_{max}$, что равносильно увеличению длины короткого ребра по ходу теплоносителя до $l'_{11} = l'_{max}$ или уменьшению высоты выступа до значения $(\delta_B)'_{11} = (\delta_B)'_{min}$ на правой границе области реализации процесса РИКТ. Следовательно, в области зарождающейся слаборазвитой турбулентности переходного режима течения, когда основное термическое сопротивление обусловлено более толстым пристеночным слоем, предпочтительно применение дискретных турбулизаторов с более интенсивным воздействием на поток теплоносителя (ПРрс ТП с меньшими значениями параметра l/d или l и ТПвк ТП с меньшими значениями параметра d^*/d или с большими значениями δ_B), чем при развитом турбулентном режиме.

Из рис. 5 видно, что зависимости $(l/d)' = f(Re)$ для ПРрс ТП или $(d^*/d)' = f(Re)$ для ТПвк ТП совокупностью своих точек обуславливают величины соответствующих геометрических параметров $(l/d)'$ или $(d^*/d)'$ и область значений критерия Re' , при которых с оценкой $(Nu/Nu_{GL})'$ и значением определяющего комплекса $(K_\zeta)_{Re=idem} = 1$ для ПРрс ТП или $(K_\xi)_{Re=idem}$ для ТПвк ТП реализуется процесс РИКТ.

Произвольно принятым значениям параметра $[(l/d)'_1 = (l/d)'_9] > [(l/d)^* = (l/d)'_2 = (l/d)'_8] > (l/d)'_3$ или $[(d^*/d)'_1 = (d^*/d)'_9] > [(d^*/d)^* = (d^*/d)'_2 = (d^*/d)'_8] > (d^*/d)'_3$ и критерия Рейнольдса $Re'_1 < (Re^* = Re_4) < Re'_9$, соответствует достигаемое значение оценки $(Nu/Nu_{GL})''_6 < (Nu/Nu_{GL})'_4$ процесса РИКТ при значении комплекса $(K_\zeta)_{Re=idem} > 1$ или $(K_\xi)_{Re=idem} > 1$. Зависимости $(l/d)' = f(Re)$ или $(d^*/d)' = f(Re)$ также отчетливо показывают (см. рис. 5), что при значении определяющего комплекса $(K_\zeta)_{Re=idem} > 1$ или $(K_\xi)_{Re=idem}$ в диапазоне значений $(l/d)'_1 \geq (l/d)^* > (l/d)'_3$ или $(d^*/d)'_1 \geq (d^*/d)^* > (d^*/d)'_3$ каждому

произвольному значению параметра $(l/d)^*$ или $(d^*/d)^*$ отвечают две пары значений $Re'_{2, (Nu/Nu_{гг})'_{2}}$ и $Re'_{8, (Nu/Nu_{гг})'_{8}}$, являющиеся координатами, соответственно, точки 2 на левой 1-2-3 и точки 8 на правой 3-4-7-8-9 ветвях (относительно точки 3) графической зависимости $(l/d)' = f(Re)$ или $(d^*/d)' = f(Re)$. Случаю $(l/d)^* = (l/d)'_{\min} = (l/d)'_3$ или $(d^*/d)^* = (d^*/d)'_{\min} = (d^*/d)'_3$ отвечает пара значений Re'_3 и $(Nu/Nu_{гг})'_3$.

В самом общем случае в диапазоне значений от $Re'_{\min} = Re'_1$ до $Re'_{\max} = Re'_{11}$ произвольному значению Re^* могут соответствовать три значения основного геометрического параметра: 1) $(l/d)'$ или $(d^*/d)'$ – реализуется процесс РИКТ при $(Nu/Nu_{гг})'_{Re^*=idem} = (\zeta/\zeta_{гг})'_{Re^*=idem}$ или $(Nu/Nu_{гг})'_{Re^*=idem} = (\xi/\xi_{гг})'_{Re^*=idem}$ (совокупность точек зависимости $(l/d)' = f(Re)$ или $(d^*/d)' = f(Re)$ – кривая 1-2-3-4-7-8-9-10-11); 2) $(l/d)'' > (l/d)'$ или $(d^*/d)'' > (d^*/d)'$ – реализуется процесс РИКТ при $(Nu/Nu_{гг})''_{Re^*=idem} > (\zeta/\zeta_{гг})''_{Re^*=idem}$ или $(Nu/Nu_{гг})''_{Re^*=idem} > (\xi/\xi_{гг})''_{Re^*=idem}$, причём $(Nu/Nu_{гг})''_{Re^*=idem} < (Nu/Nu_{гг})'_{Re^*=idem}$ (совокупность точек области 1-2-3-4-7-8-9-10-11-С-В-1 без точек кривой 1-2-3-4-7-8-9-10-11); 3) $l/d < (l/d)'$ или $d^*/d < (d^*/d)'$ – реализуется интенсификация теплообмена при $(Nu/Nu_{гг})_{Re^*=idem} < (\zeta/\zeta_{гг})_{Re^*=idem}$ или $(Nu/Nu_{гг})_{Re^*=idem} < (\xi/\xi_{гг})_{Re^*=idem}$, причём $(Nu/Nu_{гг})_{Re^*=idem} > (Nu/Nu_{гг})'_{Re^*=idem} > (Nu/Nu_{гг})''_{Re^*=idem}$ (совокупность точек области 1-2-3-4-7-8-9-10-11-Д-А-1 без точек кривой 1-2-3-4-7-8-9-10-11).

Произвольной величине критерия Re^* ($Re^* = Re_4$) в диапазоне значений ($Re'_{\min} = Re'_1$) $\leq Re^* \leq (Re'_{\max} = Re'_{11})$ будет отвечать процесс РИКТ при значении определяющего комплекса: $(K_{\zeta})_{Re^*=idem} = 1$ или $(K_{\xi})_{Re^*=idem} = 1$ и $(Nu/Nu_{гг})'_4$, если принимаемая величина геометрического параметра будет равна $(l/d)'_4$ или $(d^*/d)'_4$; $(K_{\zeta})_{Re^*=idem} > 1$ или $(K_{\xi})_{Re^*=idem} > 1$ и $(Nu/Nu_{гг})''_6 < (Nu/Nu_{гг})'_4$, если принимаемая величина геометрического параметра отвечает неравенству $(l/d)''_6 > (l/d)'_4$ для ПРрс ТП или $(d^*/d)''_6 > (d^*/d)'_4$ для ТПвк ТП. В этих случаях обеспечивается наиболее рациональное сокращение объёма ТА за счёт уменьшения длины L каналов ТП (при том же или уменьшенном конструктивном фронте).

Если же для ПРрс ТП или ТПвк ТП принимаемые величины параметров l/d или d^*/d отвечают неравенствам $(l/d)_5 < (l/d)'_4$ или $(d^*/d)_5 < (d^*/d)'_4$, то процесс РИКТ не реализуется, а интенсификация теплообмена определяется неравенствами $(Nu/Nu_{гг})_5 < (\zeta/\zeta_{гг})_5$ или $(Nu/Nu_{гг})_5 < (\xi/\xi_{гг})_5$. При этом сокращение объёма ТА может произойти также за счёт уменьшения длины L каналов ТП, но при неизбежном увеличении конструктивного фронта, что осложняет компоновку и неприемлемо в транспортных ТА [7].

ВЫВОДЫ

Результаты исследования в широком диапазоне изменения чисел Рейнольдса $600 \leq Re \leq 10000$ указывают на перспективность использованных способов искусственной турбулизации потока теплоносителя в прямоугольных каналах пластинчато-ребристых и трубчато-пластинчатых ТП с целью интенсификации конвективного теплообмена. Установлено, что процесс РИКТ, надёжно управляемый изменением значений основных геометрических параметров каналов, реализуется в широком диапазоне значений режимного параметра области переходного режима: $(Re'_{\min} = 600) \leq Re' \leq (Re'_{\max} = 6000)$ для ПРрс ТП; $[Re'_{\min} = (800 \dots 900)] \leq Re' \leq [(Re'_{\max} = (3000 \dots 4000))]$ для ТПвк ТП.

Для группы ПРрс ТП 1...6 с параметрами $\delta/d = 0.0777$, $h/u = 6.93$, $L/d = 19.43$ при $l/d = \text{variable}$ ($l/d = 0.65, 0.97, 1.30, 1.94, 2.77, 3.24$) установлены: значение оценки $[(Nu/Nu_{гг})'_{Re=2400}]_{\max} = 2.60$ при $(K_{\zeta})_{Re=2400} = 1$; условия реализации процесса РИКТ – $600 \leq Re' \leq 6000$ и $1.23 \leq (l/d)' \leq 3.23$; диапазоны значений оценок процесса РИКТ – $1.89 \leq (Nu/Nu_{гг})' \leq 2.60$ при $600 \leq Re' \leq 2400$ и $2.60 \leq (Nu/Nu_{гг})' \leq 1.97$ при $2400 \leq Re' \leq 6000$.

Для группы ТПвк ТП 26...28 с параметрами $l/d = 0.183$, $h/u = 1.74$, $L/d = 10.50$ при $d^*/d = \text{variable}$ ($d^*/d = 0.893, 0.913, 0.953$) установлены: значение оценки

$[(Nu/Nu_{гр})'_{Re=2000}]_{max} = 1.38$ при $(K_{\xi})_{Re=2000} = 1$; условия реализации процесса РИКТ – $900 \leq Re' \leq 3500$ и $0.893 \leq (d^*/d)' \leq 0.953$; диапазоны значений оценок процесса РИКТ – $1.10 \leq (Nu/Nu_{гр})' \leq 1.38$ при $900 \leq Re' \leq 2000$ и $1.38 \leq (Nu/Nu_{гр})' \leq 1.14$ при $2000 \leq Re' \leq 3500$.

Для расширенной в сторону меньших значений режимного критерия Re переходной области течения теплоносителя (вследствие искусственной турбулизации) имеет место провал в кривых графических зависимостей $(l/d)' = f(Re)$ и $(d^*/d)' = f(Re)$, указывающий на необходимость применения дискретных турбулизаторов с более интенсивным воздействием на поток теплоносителя (ПРрс ТП с меньшими значениями l или параметра l/d и ТПвк ТП с б'ольшими значениями δ_v или с меньшими значениями параметра d^*/d), чем при развитом турбулентном режиме.

Предложен графический метод надёжного определения необходимых при конструировании ТА значений основных геометрических параметров, определяющих условия реализации процесса РИКТ, на основании результата экспериментального исследования группы из весьма ограниченного числа (4...6) опытных теплообменников.

Информативность картины достигаемых результатов интенсификации конвективного теплообмена, традиционно отражаемых зависимостями $(K_{\zeta}) = f(Re)$ или $(K_{\xi}) = f(Re)$, $(Nu/Nu_{гр}) = f(Re)$, $(\zeta/\zeta_{гр}) = f(Re)$ или $(\xi/\xi_{гр}) = f(Re)$, существенно дополняется зависимостями $(l/d)' = f(Re)$ или $(d^*/d)' = f(Re)$, позволяющими определять и наблюдать непрерывное изменение значений оценки $(Nu/Nu_{гр})'$ и основных геометрических параметров в пределах всей области реализации процесса РИКТ при значении определяющего комплекса $(K_{\zeta})_{Re=idem} = 1$ или $(K_{\xi})_{Re=idem} = 1$.

Полученные экспериментальные результаты могут быть использованы при проектировании новых теплообменников различного назначения с использованием установленных диапазонов изменения значений режимного и основных геометрических параметров каналов исследованного типа, определяющих реализацию процесса РИКТ, а также при модернизации широко используемых в машиностроении трубчато-пластинчатых водяных и масляных радиаторов с гладкими прямоугольными каналами.

Л и т е р а т у р а

1. Справочник по теплообменникам: В 2-х т. Т. 2 / Пер. с англ. под ред. О.Г. Мартыненко и др. М.: Энергоатомиздат, 1987. 352 с.
2. Васильев В.Я. Экспериментальное исследование рациональной интенсификации конвективного теплообмена в прямоугольных рассечённых каналах пластинчато-ребристых теплообменных поверхностей // Теплоэнергетика. 2006. № 12. С. 58 – 67.
3. Васильев В.Я. Экспериментальное исследование рациональной интенсификации конвективного теплообмена в прямоугольных каналах трубчато-пластинчатых теплообменных поверхностей с поперечными выступами и канавками // Теплоэнергетика. 2007. № 8. С. 50 – 62.
4. Кэйс В.М., Лондон А.Л. Компактные теплообменники. – М.: Энергия, 1967. 224 с.
5. Воронин Г.И., Дубровский Е.В. Эффективные теплообменники. М.: Машиностроение, 1973. 96 с.
6. Vasilyev V. Mechanism of development of rational enhancement of convective heat transfer process in rectangular ducts for extended heat transfer surface // Enhanced Compact and Ultra-Compact Heat Exchangers: Science, Engineering and Technology, Potsdam, Germany, September 16-21, 2007 : proceedings of the 6th International Conference. 2007. P. 155 – 163.
7. Dubrovsky E.V, Vasiliev V.Yu. A Method for Relative Comparison of Thermohydraulic Efficiencies of Heat Transfer Surfaces and Heat Exchangers // Compact Heat Exchangers and Enhancement Technology for the Process Industries: Science, Engineering and Technology, Davos, Switzerland, July 1-6, 2001 : proceedings of the 3rd International Conference. 2001. P. 159 – 168.