

РАЦИОНАЛЬНАЯ ИНТЕНСИФИКАЦИЯ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА РАССЕЧЕНИЕМ ДЛИННЫХ ГЛАДКИХ КАНАЛОВ

ВАСИЛЬЕВ Виктор Яковлевич, доцент Астраханского государственного технического университета, к.т.н. 414000, Астрахань, ул. Урицкого, дом 5, кв. 16; тел. +7 8512 394455 (дом), +7 9054819933 (моб), +7 8512 614156 (раб), e-mail - vasiliev@mail.ru.

VASILYEV Victor Ya., candidate (philosophy doctor) of technical sciences, principal lecturer - Astrakhan State Technical University.

В аэродинамической трубе разомкнутого типа выполнено систематическое экспериментальное исследование интенсификации конвективного теплообмена в прямоугольных рассечённых каналах. Показано, что в исследованных рассечённых каналах реализуется процесс рациональной интенсификации конвективного теплообмена (РИКТ), определяющийся условием $[(Nu/Nu_{г\lambda})/(\zeta/\zeta_{г\lambda})]_{Re = idem} \geq 1$ и надёжно управляемый изменением значений основных безразмерных геометрических параметров. Предложены графические зависимости, позволяющие определять и наблюдать интересующее конструкторов теплообменных аппаратов (ТА) непрерывное изменение оценки и основных параметров процесса РИКТ во всей области его реализации по числам Re. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании интенсифицированных ТА различного назначения.

Regular experimental research is executed for enhancement of convective heat exchange in rectangular dissected ducts in aerodynamic tube of interrupted type. It is shown that the process for rational enhancement of convective heat exchange (RECH) is realized and it is determined by the condition $[(Nu/Nu_{г\lambda})/(\zeta/\zeta_{г\lambda})]_{Re = idem} \geq 1$ and is reliably governed by the change of values of basic dimensionless parameters. Graphic dependences are offered allowing to define and observe continuous change of values and key parameters of RECH process in all area of its realization on number Re which is interested the designers of heat transfer apparatus (HTA). The received results can be used at designing of enhanced HTA for various purposes.

Ключевые слова: пластинчато-ребристый, гладкоканальная поверхность, параметр рассечения, турбулизация, рациональная интенсификация конвективного теплообмена.

Key words: plate-and fin, smooth duct surface, parameter of dissection, turbulization, rational enhancement of convective heat transfer.

Введение

В некруглых каналах PR_{rc} ТП (объяснения аббревиатур см. в конце статьи) с искусственной турбулизацией потока теплоносителя в определённых условиях реализуется процесс РИКТ, при котором рост тепловой характеристики $Nu/Nu_{г\lambda}$ опережает рост (или равен росту) аэродинамической характеристики $\zeta/\zeta_{г\lambda}$ по отношению к соответствующим характеристикам гладкого канала при идентичных геометрии профилей поперечных сечений каналов и режимах течения потока теплоносителя в них.

Реализация процесса РИКТ в некруглых каналах PR_{rc} ТП обусловлена отрывом потока теплоносителя при его натекании на острые прямоугольные входные кромки рёбер множества коротких каналов с образованием пристеночных вихрей, имеющих масштаб, соизмеримый с толщиной пристеночного слоя, в котором срабатывается весь или

почти весь градиент поля скоростей и температур [1–5]. Генерация вихрей, на внешней границе которых происходит основная выработка турбулентности, обуславливает в некруглых каналах PR_{rc} ТП отрыв потока теплоносителя с последующим присоединением и повторным развитием пограничного слоя с резко возросшими и сравнительно медленно затухающими турбулентными параметрами потока теплоносителя. Поэтому область присоединения и повторного развития пограничного слоя обуславливает основной вклад в искусственную турбулизацию потока теплоносителя в тонком пристеночном слое и, следовательно, в процесс интенсификации конвективного теплообмена. Таким образом, при реализации процесса РИКТ в некруглых каналах PR_{rc} ТП дополнительная энергия подводится к потоку теплоносителя практически только в области пристеночного слоя, в котором в гладком

канале значения турбулентных параметров потока малы или не существуют.

Объекты исследования с гладкими и рассечёнными прямоугольными каналами

Для проведения экспериментального исследования тепловых и аэродинамических характеристик пластинчато-ребристых ТП были спроектированы и изготовлены опытные теплообменники, состоявшие из плоской трубки и гладкоканальной или рассечённых пластинчато-ребристых ТП с прямоугольным поперечным сечением каналов. Общие виды ПРгл и ПРрс ТП приведены на рис. 1, а, б.

С целью более полного исключения влияния побочных факторов на характеристики исследованных ТП, при их изготовлении использовались специальные приспособления — матрицы и пуансоны, показанные на рис. 1, в, позволившие чётко выдержать постоянство заданных геометрических размеров и формы поперечных сечений каналов (рис. 1, з, д, е). ПРрс ТП № 1—6 и 8—11 представлены размещёнными на плоских трубках рядами рёбер (единичных гофров), следующих друг за другом без зазора и со смещением на величину, равную половине шага рёбер (рис. 1, ж). Для оценки процесса РИКТ в каналах ПРрс ТП была изготовлена и испытана ПРгл ТП № 7 [6].

Условия реализации процесса РИКТ при изменении параметра рассечения каналов

Влияние изменения значений параметра рассечения каналов l/d на теплоаэродинамические характеристики ПРрс ТП получены при испытании поверхностей № 1—6, характеризовавшихся одинаковыми значениями параметров шероховатости каналов $h/u = 6,93$ и относительной толщины ребра $\delta/d = 0,0777$ и различавшихся только величинами параметра рассечения $l/d = \text{variable}$ ($l/d = 0,65; 0,97; 1,30; 1,94; 2,77; 3,24$). Все результаты испытаний представлялись в виде зависимостей $Nu = f(Re)$ и $\zeta = f(Re)$, которые аппроксимировались степенными функциями $Nu = A \cdot Re^m$ и $\zeta = B \cdot Re^n$. Значения коэффициентов A и B , а также показателей степени m и n , определялись методом наименьших квадратов отклонений соответствующих функций Nu и ζ [7].

В теплообменных аппаратах (ТА) суммарные потери давления $\Delta p_{\text{общ}}$ воздуха складываются из потерь на трение $\Delta p_{\text{тр}}$ в каналах ТП и потерь при входе $\Delta p_{\text{вх}}$ в ТА и выходе $\Delta p_{\text{вых}}$ из него, причём доля двух последних тем выше, чем больше толщи-

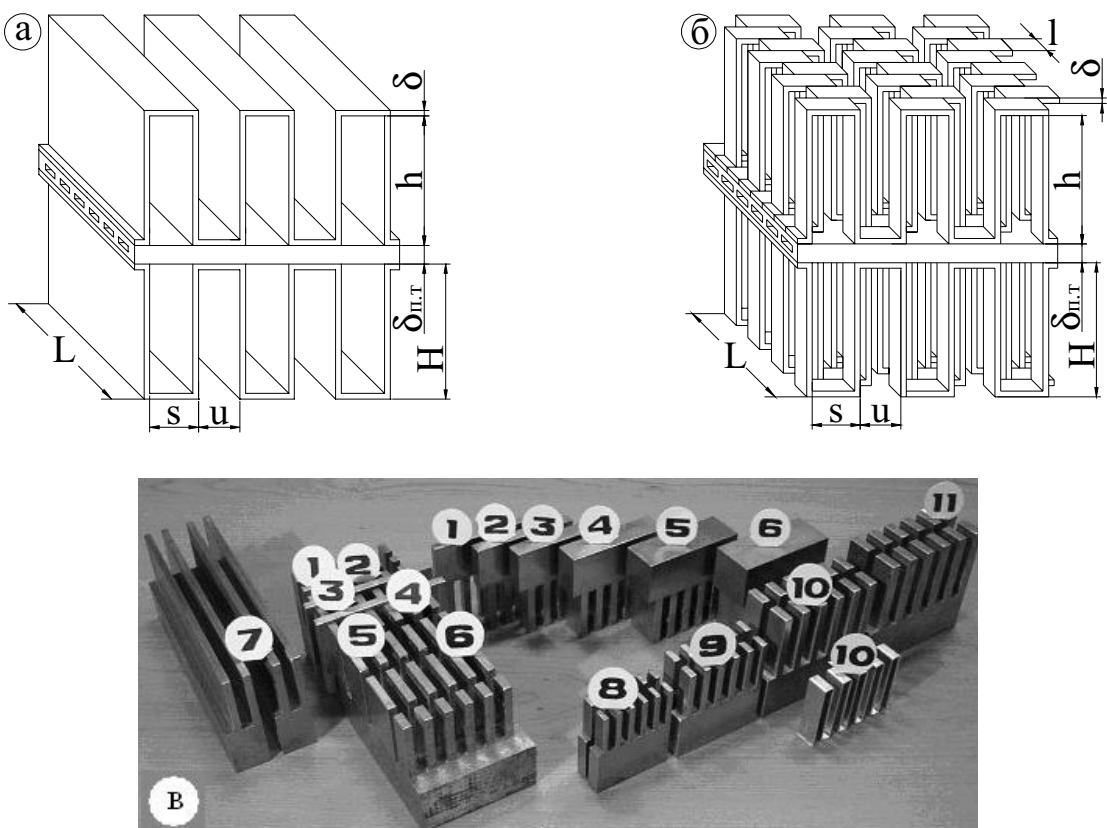


Рис. 1 (начало)

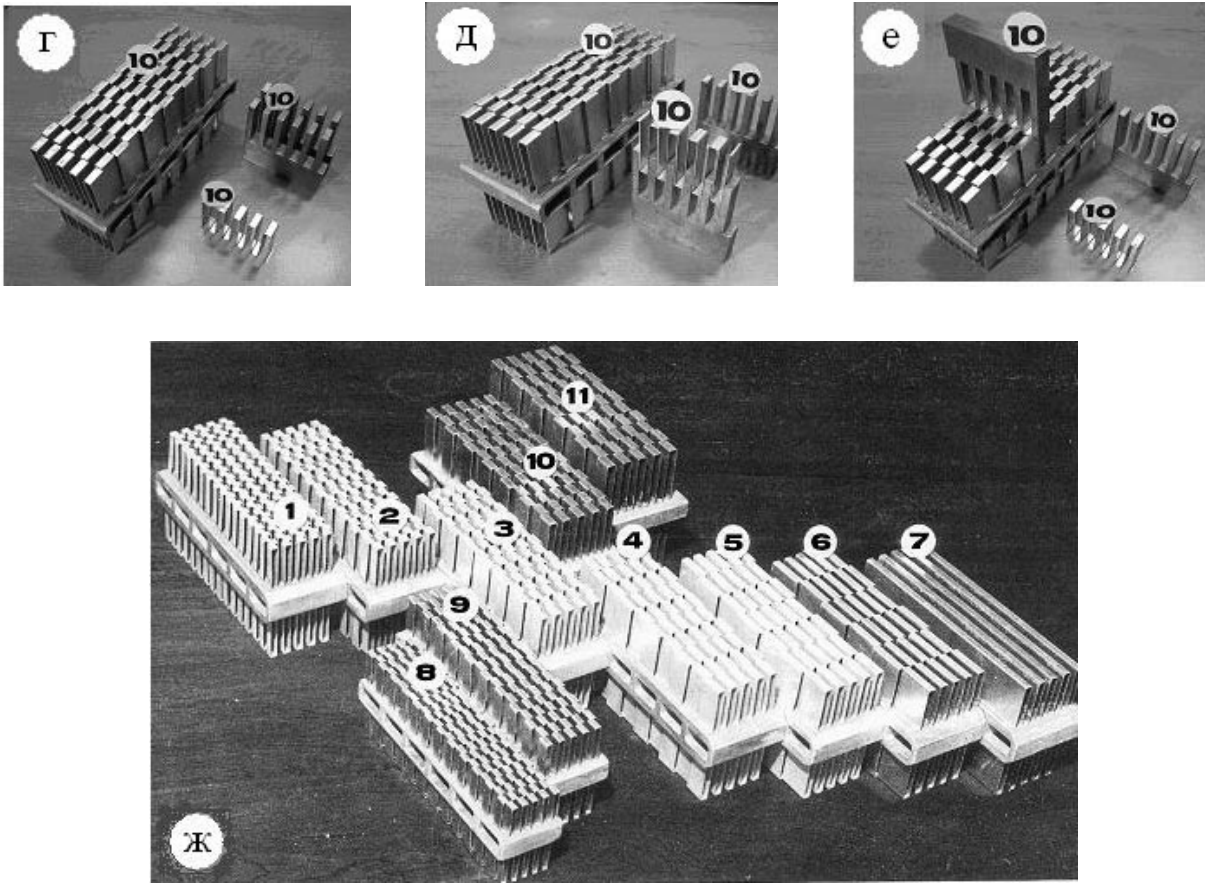


Рис. 1. Геометрические характеристики ПРгл ТП (а) и ПРрс ТП (б); матрицы и пуансоны для изготовления ПРрс ТП 1—6, 8—11 и ПРгл ТП № 7, единственный гофр ПРрс ТП № 10 (справа) (в); ПРрс ТП № 10, единственный гофр, матрица, пуансон (г); ПРрс ТП № 10, единственный гофр в матрице, пуансон (д); пуансон в гофре ПРрс ТП № 10, единственный гофр, матрица (е); образцы исследованных ПРрс ТП № 1—6, 8—11 и ПРгл ТП № 7 (ж)

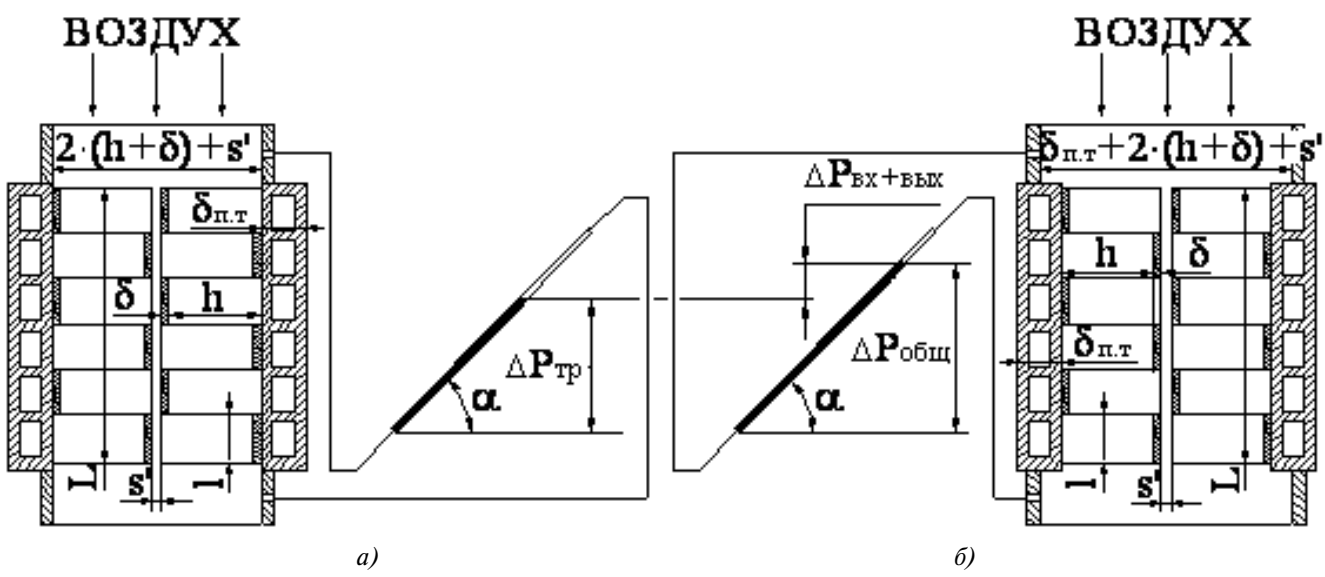


Рис. 2. Схемы установки опытных теплообменников с ПРгл ТП и ПРрс ТП в экспериментальном участке аэродинамической трубы при испытаниях:

слева — без учёта влияния толщины плоской трубки $\delta_{п.т}$ теплообменника; справа — с учётом влияния

на $\delta_{п.т}$ плоской многоканальной трубки (чем больше в ТА высота гофра ТП со стороны второго теплоносителя) и меньше длина ТП по ходу воздуха L .

Схема расположения исследуемых ТП в рабочем участке аэродинамической трубы, приведённая на рис. 2, а, позволила надёжно определить потери давления воздуха на трение $\Delta p_{тр}$ в каналах всех рассечённых № 1—6 и гладкоканальной № 7 ТП и эффективность воздействия механизма генерации вихрей в каналах ПРрс ТП на условия реализации и достигаемую величину оценки $[(Nu/Nu_{гл})_{Re=idem}]'_{max}$ процесса РИКТ при значении определяющего комплекса $[(Nu/Nu_{гл})/(\zeta/\zeta_{гл})]_{Re=idem} = 1$.

Конструкция рабочего участка аэродинамической трубы позволяла также определять коэффициент суммарного аэродинамического сопротивления ξ ТА (см. рис. 2, б).

На рис. 3 приведены зависимости $\zeta/\zeta_{гл} = f(Re)$, $Nu/Nu_{гл} = f(Re)$ и $(Nu/Nu_{гл})/(\zeta/\zeta_{гл}) = f(Re)$, последняя из которых позволяет определить соблюдение условия РИКТ [6, 8, 9]. Изменения функций $\zeta/\zeta_{гл} = f(Re)$ в диапазоне чисел Рейнольдса от 550 до 840—1640 характеризуется постепенным увеличением их значений, что объясняется генерацией в этой зоне слабо развитой турбулентности. С ростом критерия Рейнольдса в рассечённых каналах происходит быстрый рост интенсивности турбулентности и площади поперечного сечения канала, охваченного турбулентным течением потока теплоносителя. В то же время в гладком канале турбулентность имеет сравнительно низкий уровень интенсивности и охватывает меньшую площадь поперечного сечения канала. В результате в диапазоне чисел Рейнольдса от 840—1640 до 6000 происходит существенный рост значений отношения $\zeta/\zeta_{гл}$, причём указанное отношение растёт тем быстрее, чем меньше величина параметра l/d . При достижении значения $Re = 6000$ рост значений отношения $\zeta/\zeta_{гл}$ всех исследованных ПРрс ТП практически прекращается, ввиду того что как в рассечённых каналах, так и в гладком относительно изменение интенсивности турбулентности при достижении развитого турбулентного режима течения теплоносителя практически не происходит. Поэтому зависимости $\zeta/\zeta_{гл} = f(Re)$ проходят примерно параллельно оси абсцисс.

Закон теплоотдачи, соответствующий переходному режиму течения теплоносителя, наступает в

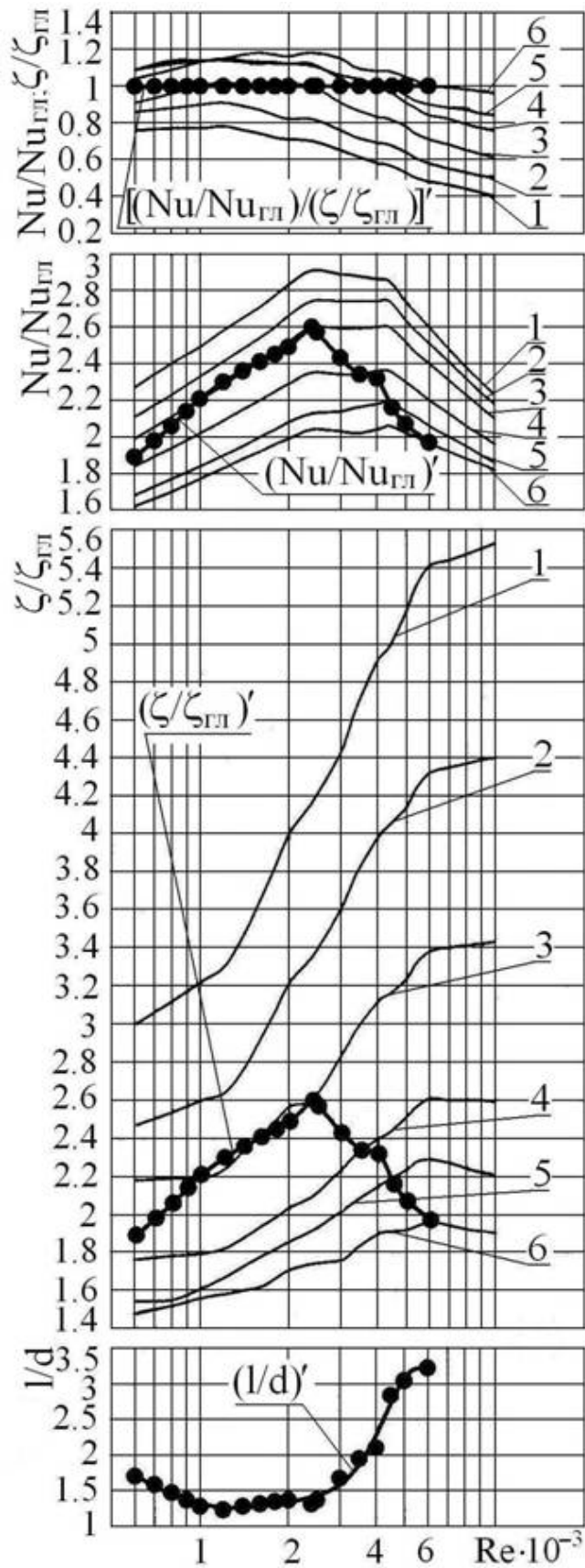


Рис. 3. Зависимости $(Nu/Nu_{гл})/(\zeta/\zeta_{гл}) = f(Re)$, $(Nu/Nu_{гл}) = f(Re)$, $(\zeta/\zeta_{гл}) = f(Re)$ и $l/d = f(Re)$ для ПРрс ТП № 1—6 при $\delta/d = 0,0777$

каналах ПРрс ТП фактически со значения $Re = 550$ и существует до значений $Re = 1680 \div 3550$ (в зависимости от величины параметра рассечения). В то же время в гладком канале закон теплоотдачи до значения $Re = 2340$ соответствует ламинарному режиму течения. Поэтому рост значений отношения $Nu/Nu_{г\lambda}$ в диапазоне значений $Re = 550 \div 2340$ отмечается для всех исследованных ПРрс ТП. Далее, с наступлением в гладком канале законов теплоотдачи для переходного (при $2340 < Re < 4380$) и турбулентного (при $Re > 4380$) режимов течения теплоносителя, рост значений отношения $Nu/Nu_{г\lambda}$ прекращается, и при значениях $Re > 4380$ значения отношения $Nu/Nu_{г\lambda}$ для всех исследованных ПРрс ТП уменьшаются. Действительно, в рассечённых каналах, характеризующихся малыми значениями параметра рассечения, наблюдается высокая интенсивность турбулентности потока теплоносителя (эффект вихреобразования вследствие искусственной турбулизации), которая слабо увеличивается при возрастании значения критерия Рейнольдса [7].

Влияние большого количества законов сопротивления $\zeta = B \cdot Re^n$ и теплоотдачи $Nu = A \cdot Re^m$ для всех ПРрс ТП в исследованном диапазоне изменения значений критерия Рейнольдса приводит к весьма сложному характеру изменения зависимостей $(Nu/Nu_{г\lambda}) / (\zeta/\zeta_{г\lambda}) = f(Re)$, имеющих важное значение для оценки теплоаэродинамической эффективности ПРрс ТП. Те из них, в каналах которых в соответствующих диапазонах по числам Рейнольдса, согласно методу [6], значения комплекса $[(Nu/Nu_{г\lambda}) / (\zeta/\zeta_{г\lambda})]_{Re=idem} \geq 1$ обеспечивают уменьшение объёма сердцевин теплообменника в режиме реализации процесса РИКТ при всех прочих равных условиях. Из графика на рис. 3 видно, что ПРрс ТП № 6—4 отвечают условию $[(Nu/Nu_{г\lambda}) / (\zeta/\zeta_{г\lambda})]_{Re=idem} \geq 1$ в диапазоне значений критерия Рейнольдса от 600 до, соответственно, равных примерно 6000, 4400 и 3400. Для ПРрс ТП № 3 условие $[(Nu/Nu_{г\lambda}) / (\zeta/\zeta_{г\lambda})]_{Re=idem} \geq 1$ выполняется при $1000 \leq Re \leq 2400$, для ПРрс ТП № 1 и № 2 во всем диапазоне испытаний по числам Рейнольдса выполняется условие $[(Nu/Nu_{г\lambda}) / (\zeta/\zeta_{г\lambda})]_{Re=idem} < 1$.

Совместный анализ зависимостей $Nu/Nu_{г\lambda} = f(Re)$ и $(Nu/Nu_{г\lambda}) / (\zeta/\zeta_{г\lambda}) = f(Re)$ показывает, что ПРрс ТП № 3 (параметр рассечения 1,30) характеризуется самой высокой эффективностью и в диапазоне значений критерия Рейнольдса от 1000 до 2400 обеспечивает значения отношения $Nu/Nu_{г\lambda} = 2 \div 2,6$. Причём при значении критерия Рейнольдса 2400 для этой ТП имеет место наибольшее зна-

чение отношения $(Nu/Nu_{г\lambda})'_{max} = 2,6$. При этом предел рационального уменьшения величины параметра рассечения каналов составляет $(l/d)'_{min} = 1,3$; дальнейшее уменьшение его величины не отвечает условию РИКТ. При $l/d < [(l/d)'_{min} = 1,3]$ коэффициент сопротивления трения ζ увеличивается быстрее критерия Нуссельта.

Рассмотрение вариантов графических зависимостей $Nu/Nu_{г\lambda} = f(Re)$ и $\zeta/\zeta_{г\lambda} = f(Re)$, построенных при условии $Re = idem$, и определение координат точек их пересечения для случаев различных значений критерия Рейнольдса (рис. 4) позволило получить зависимости $(l/d)' = f(Re)$ и $(Nu/Nu_{г\lambda})' = f(Re)$, представленные на рис. 3, для диапазона значений критерия Рейнольдса, соответствующего условию $[(Nu/Nu_{г\lambda}) / (\zeta/\zeta_{г\lambda})]_{Re=idem} = 1$ реализации РИКТ. Совместный анализ зависимостей $(Nu/Nu_{г\lambda}) / (\zeta/\zeta_{г\lambda}) = f(Re)$, $(Nu/Nu_{г\lambda})' = f(Re)$ и $(l/d)' = f(Re)$, построенных по результатам испытаний группы ПРрс ТП № 1—6 с параметрами $\delta/d = 0,0777$; $h/u = 6,93$ и $l/d = variable$ ($l/d = 0,65; 0,97; 1,30; 1,94; 2,77; 3,24$) для условий проведённых экспериментов, позволяет при проектировании теплообменников определять величины $(Nu/Nu_{г\lambda})'_{max}$ и Re' при любом задаваемом в диапазоне 1,23—3,23 значении параметра рассечения, отличном от частных значений l/d , имевших место в эксперименте, при соблюдении условия $[(Nu/Nu_{г\lambda}) / (\zeta/\zeta_{г\lambda})]_{Re=idem} = 1$.

Условия реализации процесса РИКТ при изменении параметра относительной толщины ребра

Влияние изменения значений параметра относительной толщины ребра δ/d на теплоаэродинамические характеристики ПРрс ТП определено при испытании поверхностей № 8, 9, 3, 10, 11, характеризовавшихся практически одинаковыми значениями параметров щелевидности каналов $(h/u)_m = 6,95$ и рассечения $(l/d)_m = (l/d)'_{min} = 1,30$ (установлено по результатам первого этапа испытаний) и различавшихся только величиной параметра относительной толщины ребра $\delta/d = variable$ ($\delta/d = 0,1138; 0,0912; 0,0777; 0,0658; 0,0580$).

Для оценки теплоаэродинамической эффективности исследованных ПРрс ТП № 3, 8—11 на рис. 5

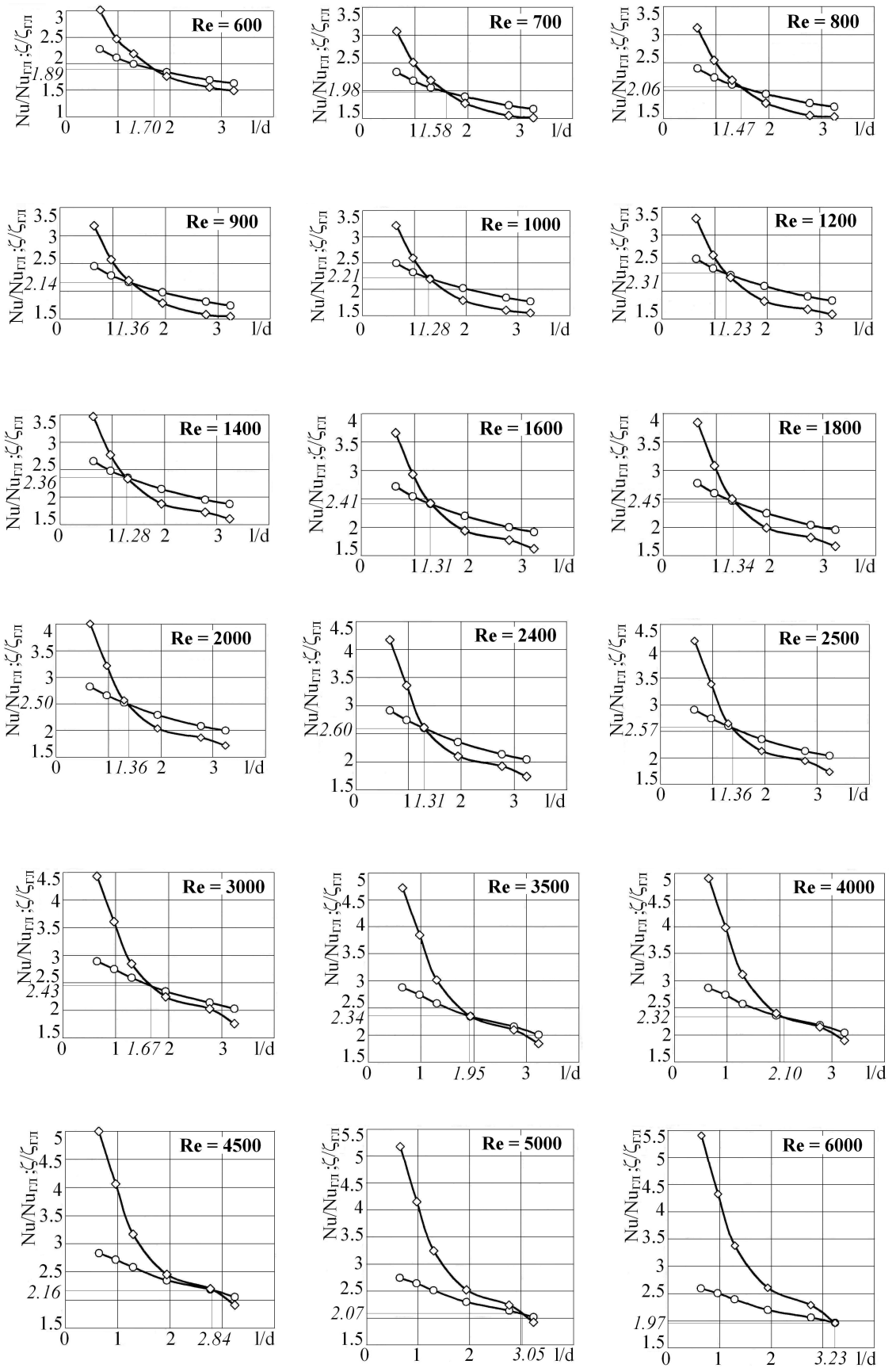


Рис. 4. Зависимости $Nu/Nu_{гр} = f(l/d)$ и $\zeta/\zeta_{гр} = f(l/d)$ при $Re = idem$ для ПРрс ТП № 1–6 с $\delta/d = 0,0777$:

○ — $Nu/Nu_{гр}$; ◇ — $\zeta/\zeta_{гр}$

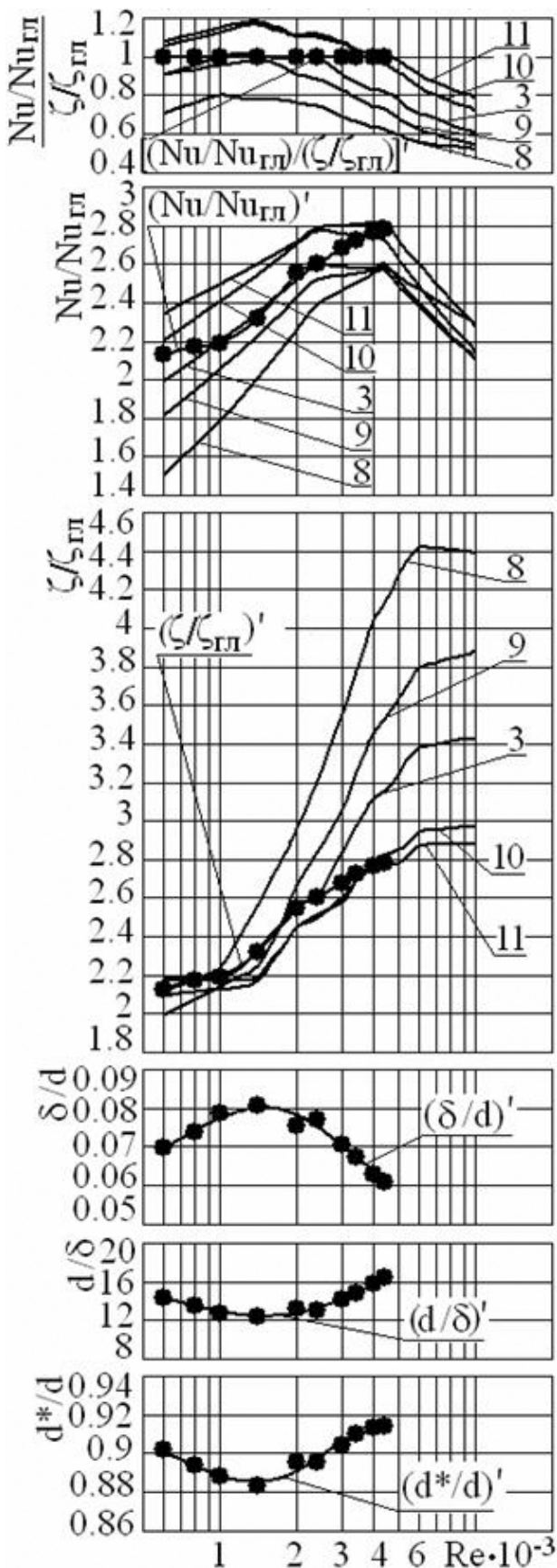


Рис. 5. Зависимости $(Nu/Nu_{гл})/(\zeta/\zeta_{гл}) = f(Re)$, $(Nu/Nu_{гл}) = f(Re)$, $(\zeta/\zeta_{гл}) = f(Re)$, $\delta/d = f(Re)$ и $d^*/d = f(Re)$ для ПРрс ТП № 3, 8–11 при $l/d = 1,30$

приведены зависимости $\zeta/\zeta_{гл} = f(Re)$, $Nu/Nu_{гл} = f(Re)$ и $(Nu/Nu_{гл})/(\zeta/\zeta_{гл}) = f(Re)$, последняя из которых позволяет определить соблюдение условия РИКТ. Характерные особенности изменения зависимостей $\zeta/\zeta_{гл} = f(Re)$, $Nu/Nu_{гл} = f(Re)$ и $(Nu/Nu_{гл})/(\zeta/\zeta_{гл}) = f(Re)$, рассмотренные выше, остаются в силе и для данного варианта испытания.

Анализ этих результатов 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 1100–10000. При этом с уменьшением значений параметра δ/d в диапазоне 0,058–0,1138 для $(l/d)_m = (l/d)'_{min} = 1,30$ при $Re = idem$ во всём исследованном диапазоне чисел $Re = 500 \div 10000$ значения безразмерного коэффициента теплоотдачи увеличиваются, а значения коэффициента общих потерь давления уменьшаются. Отмеченное объясняется тем, что при меньших исследованных значениях параметра $\delta/d = 0,058 \div 0,0777$ для условий проведённых экспериментов сгенерированные на острых кромках рёбер 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 типоразмерах конструкций ПРрс 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 [8].

Для значений параметра $\delta/d > 0,0777$ внешняя граница отрывной зоны удаляется от стенки канала, увеличивая толщину рециркуляционной области отрыва. В результате в непосредственной близости от стенки канала в рециркуляционной зоне отрыва уменьшаются значения турбулентных параметров потока λ_T и ϵ_T , 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 $\delta/d \leq 0,0777$.

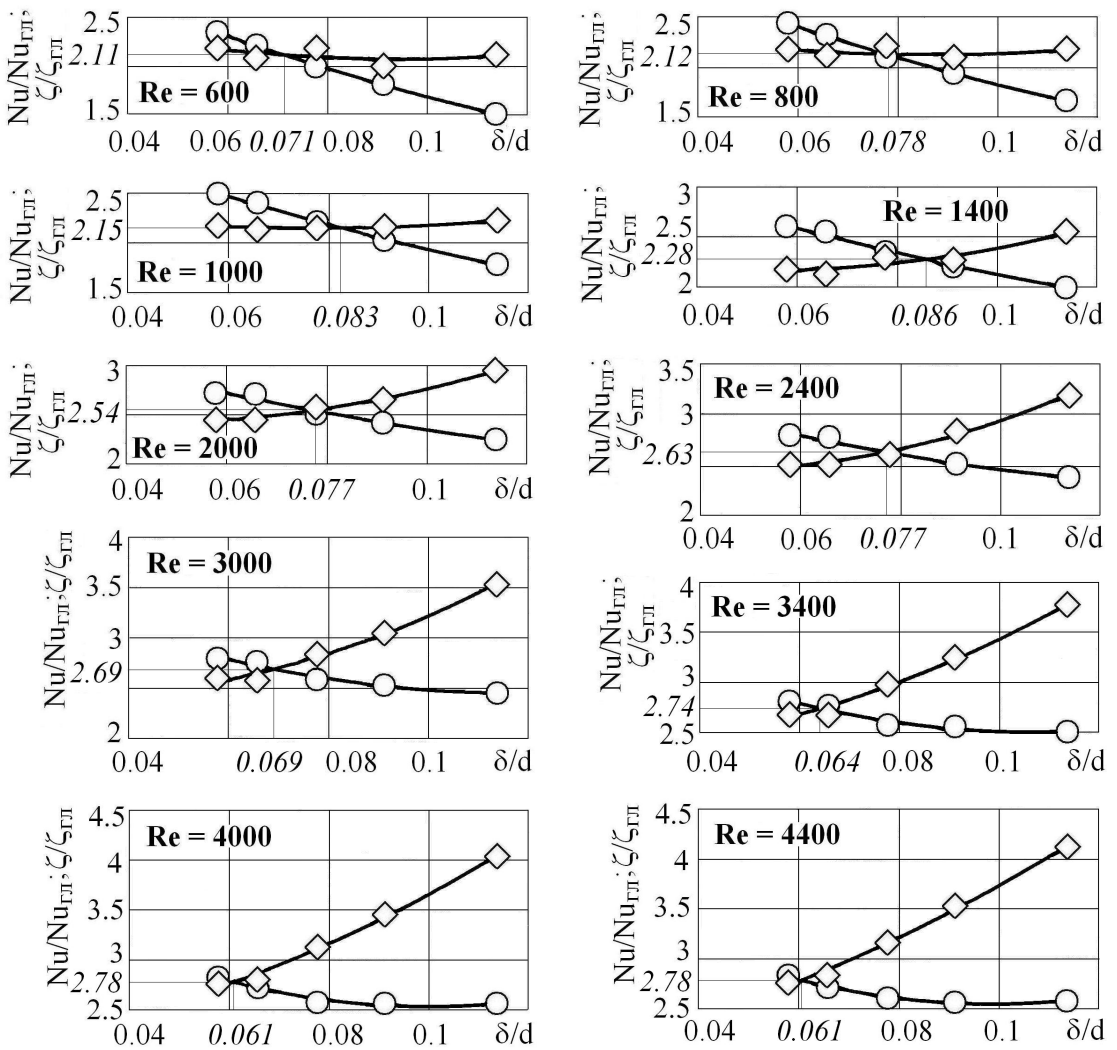


Рис. 6. Зависимости $Nu/Nu_{гр} = f(\delta/d)$ и $\zeta/\zeta_{гр} = f(\delta/d)$ при $Re = idem$ для ПРрс ТП № 3, 8–11 с $l/d = 1,30$: \circ – $Nu/Nu_{гр}$; \diamond – $\zeta/\zeta_{гр}$

Отмеченное 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 вихрей увеличивается, а их распространение вдоль потока происходит как в области пристеночного слоя, так и в ядре потока. Причём область ядра потока, занятая распространяющимися вихрями, с увеличением значений параметра $\delta/d > 0,0777$ увеличивается. Как показано в работах [1–3], 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.

Рассмотрение вариантов зависимостей $\zeta/\zeta_{гр} = f(Re)$ и $Nu/Nu_{гр} = f(Re)$ при условии $Re = idem$ и определение координат точек их пересечения для случаев различных значений критерия Re (рис. 6) позволило получить зависимости $(\delta/d)' = f(Re)$ и $(Nu/Nu_{гр})' = f(Re)$, представленные на рис. 5, для диапазона значений критерия Re' , при условии $[(Nu/Nu_{гр})/(\zeta/\zeta_{гр})]_{Re=idem} = 1$ реализации РИКТ. Совместный анализ зависимостей

$$(Nu/Nu_{гр})/(\zeta/\zeta_{гр}) = f(Re), \quad (Nu/Nu_{гр})' = f(Re) \\ \text{и } (\delta/d)' = f(Re),$$

построенных по результатам испытаний группы ПРрс 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 ус-

ловий проведённых экспериментов, позволил установить предел рационального уменьшения параметра $(\delta/d)'_{\min} = 0,061$ и достигаемую при условии $[(Nu/Nu_{\text{гл}})/(\zeta/\zeta_{\text{гл}})]_{\text{Re=idem}} = 1$ и значении $Re' = 4400$ величину $(Nu/Nu_{\text{гл}})'_{\max} = 2,78$. Дальнейшее уменьшение параметра δ/d не отвечает условию РИКТ. Приведённые зависимости

$$(Nu/Nu_{\text{гл}})/(\zeta/\zeta_{\text{гл}}) = f(Re), (Nu/Nu_{\text{гл}})' = f(Re) \text{ и } (\delta/d)' = f(Re)$$

позволяют при проектировании теплообменников определять величины $(Nu/Nu_{\text{гл}})'_{\max}$ и Re' при любом задаваемом в диапазоне $0,061-0,0787$ значении параметра относительной толщины ребра, отличном от частных значений δ/d , имевших место в эксперименте при соблюдении условия $[(Nu/Nu_{\text{гл}})/(\zeta/\zeta_{\text{гл}})]_{\text{Re=idem}} = 1$. Следует отметить, что идентичные приведённым на рис. 6 графические решения с использованием величины δ/d могут быть получены при использовании параметров в виде d/δ и d^*/d (см. графические зависимости $(d/\delta)' = f(Re)$ и $(d^*/d)' = f(Re)$ на рис. 5).

Выводы

1. В результате систематического экспериментального исследования серии ПРрс ТП с параметрами $\delta/d = 0,078$, $h/u = 6,93$ и $l/d = \text{variable}$ ($l/d = 0,65; 0,97; 1,30; 1,94; 2,77; 3,24$) экспериментально установлены значение оценки

$$[(Nu/Nu_{\text{гл}})_{\text{Re}=2400}]'_{\max} = 2,60$$

и определяющие условия реализации процесса РИКТ: $Re = 600 \div 6000$; $(l/d)' = 1,23 \div 3,23$. Диапазоны значений оценок реализуемых процессов РИКТ:

$$(Nu/Nu_{\text{гл}})' = 1,89 \div 2,60 \text{ при } Re' = 600 \div 2400 \text{ и } (Nu/Nu_{\text{гл}})' = 2,60 \div 1,97 \text{ при } Re' = 2400 \div 6000.$$

2. Исследование серии ПРрс ТП с параметрами $(l/d)_m = (l/d)'_{\min} = 1,30$, $(h/u)_m = 6,95$ и $\delta/d = \text{variable}$ ($\delta/d = 0,1138; 0,0912; 0,0777; 0,0658; 0,0580$) позволило установить предел рационального уменьшения относительной толщины ребра $(\delta/d)'_{\min} = 0,061$, достигаемую величину оценки

$$[(Nu/Nu_{\text{гл}})_{\text{Re}=4400}]'_{\max} = 2,78 \text{ и определяющие ус-}$$

ловия реализации процесса РИКТ: $Re' = 600 \div 4400$; $(\delta/d)' = 0,061 \div 0,086$.

3. Информативность картины достигаемых результатов интенсификации теплообмена, традиционно отражаемых зависимостями

$$(Nu/Nu_{\text{гл}})_{\text{Re=idem}} / (\zeta/\zeta_{\text{гл}})_{\text{Re=idem}} = f(Re),$$

$$(Nu/Nu_{\text{гл}})_{\text{Re=idem}} = f(Re) \text{ и}$$

$$(\zeta/\zeta_{\text{гл}})_{\text{Re=idem}} = f(Re),$$

существенно дополняется зависимостями $(l/d)' = f(Re)$ и $(\delta/d)' = f(Re)$, позволяющими определять и наблюдать непрерывное изменение значений оценки $[(Nu/Nu_{\text{гл}})_{\text{Re=idem}}]'$ и основных геометрических безразмерных параметров в пределах всей области реализации процесса РИКТ при значении $[(Nu/Nu_{\text{гл}})/(\zeta/\zeta_{\text{гл}})]_{\text{Re=idem}} = 1$.

4. Доказана возможность уменьшения объёма и массы сердцевин теплообменных аппаратов с рассечёнными каналами, работающих в режимах $K \approx \alpha_m$, предельно до 2,78 раза по сравнению с их гладкоканальными аналогами при всех прочих равных условиях.

Основные обозначения

ПРгл ТП и ПРрс ТП — пластинчато-ребристая, соответственно гладкоканальная и рассечённая теплообменная поверхность;

РИКТ — процесс рациональной интенсификации конвективного теплообмена в общем случае: $[(Nu/Nu_{\text{гл}})/(\zeta/\zeta_{\text{гл}})]_{\text{Re=idem}} \geq 1$;

ТА и ТП — теплообменный аппарат и теплообменная поверхность;

d — эквивалентный гидравлический диаметр канала, м;

d^*/d — степень сужения сечения канала: здесь d^* соответствует живому сечению канала ТП, а d — каналу с границами по средней линии ребра (стенки канала);

K — коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К);

$Nu_{\text{гл}}$, Nu — критерий Нуссельта ТП, соответственно гладкоканальных и с искусственной турбулизацией потока теплоносителя;

p — давление, Па;

Re — критерий Рейнольдса;

α — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);

Δ — перепад значений величины;

δ — толщина ребра (стенки канала) ТП, м;

ϵ_T — коэффициент турбулентной вязкости, Па·с;

λ_T — коэффициент турбулентной теплопроводности, Вт/(м·К);

$\zeta_{гл}$, ζ — коэффициент потерь давления ТП на трение, соответственно гладкоканальных и с искусственной турбулизацией потока теплоносителя;

ξ — коэффициент общих потерь давления (на вход, выход и трение).

Индексы

' — конкретизирует отношение параметра к процессу РИКТ при значении определяющего комплекса $[(Nu/Nu_{гл})/(\zeta/\zeta_{гл})]_{Re=idem} = 1$;

гл — указывает на отношение к гладкоканальной ТП;

м — меньшее значение величины;

п.т — плоская трубка;

общ — общий (суммарный);

max, m , min — максимальное, среднее и минимальное значения.

Библиографический список

1. Михайлов А.И., Борисов В.В., Калинин Э.К. Газотурбинные установки замкнутого цикла. — М.: Изд. АН СССР, 1962.

2. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах. — М.: Машиностроение, 1990.

3. Воронин Г.И., Дубровский Е.В. Эффективные теплообменники. — М.: Машиностроение, 1973.

4. Васильев В.Я. Применение рассечённых поверхностей для повышения эффективности воздушных конденсаторов // Холодильная техника. 1989. № 8. С. 32—37.

5. Васильев В.Я. Высокоэффективные пластинчато-ребристые поверхности для воздушных конденсаторов транспортных холодильных установок // Холодильная техника. 1998. № 10. С. 10—11.

6. 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.

7. Васильев В.Я. Результаты исследования рациональной интенсификации конвективного теплообмена в прямоугольных каналах пластинчато-ребристых и трубчато-пластинчатых теплообменных поверхностей способами рассечения каналов и периодического дросселирования теплоносителя // Турбулентные течения и тепломассоперенос в сложных условиях: Сб. тр. XXVII Сибирского теплофизического семинара. Новосибирск, 2004. 26 с.

8. Dubrovsky E. V. and Vasiliev V. Ya. Enhancement of Convective Heat Transfer in Rectangular Ducts of Interrupted Surfaces // Int. J. Heat and Mass Transfer. 1988. V. 31. № 4. P. 807 — 818.

9. Васильев В.Я. Физическая общность процесса рациональной интенсификации конвективного теплообмена в каналах различной формы поперечного сечения // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Астрахань: Изд-во АГТУ. 2004. № 1 (20). С. 268—273.