

# ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССА РАЦИОНАЛЬНОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА В КАНАЛАХ С ДИСКРЕТНЫМИ ТУРБУЛИЗАТОРАМИ

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.

*Способ искусственной турбулизации пристеночного слоя течений на диффузорно-конфузорных участках реализован в прямоугольных каналах трубчато-пластинчатых с поперечными выступами и канавками (ТПвк) теплообменных поверхностей (ТП). Результаты экспериментальных исследований теплоаэродинамических характеристик ТПвк ТП подтвердили реализацию процесса рациональной интенсификации конвективного теплообмена (РИКТ) и высокий уровень оценок  $(Nu/Nu_{гл})'_{max}$  при значении определяющего комплекса  $[(Nu/Nu_{гл})/(\zeta/\zeta_{гл})]_{Re=idem} = 1$ . Впервые предложена методика, для исследованных групп ТПвк ТП, реализована методика определения и отслеживания непрерывного изменения значений оценки  $(Nu/Nu_{гл})'$ , основных геометрических безразмерных и режимного параметров в пределах всей области реализации процесса РИКТ, упрощающая поиск рациональных решений и проектирование теплообменников.*

*Way of artificial turbulization in wall layer of currents on diffuser-confusor sites is realized in rectangular tubular-plate ducts with cross ridges and grooves (TPrg) of heat transfer surfaces (HTS). The results of experimental researches on heat aerodynamic characteristics of TPrg HTS have conformed the realization of process for rational enhancement of convective heat transfer (REHT) and high level of estimations at value  $(Nu/Nu_{гл})'_{max}$  of a determining complex  $[(Nu/Nu_{гл})/(\zeta/\zeta_{гл})]_{Re=idem} = 1$ . For the first time it was offered and realized the technique of definition and tracing of continuous change of values of an estimation  $(Nu/Nu_{гл})'$  for investigated groups TPrg HTS, the basic geometrical dimensionless and regime parameters is realized within the limits of all area for realization of REHT process, simplifying the search of rational decisions and designing of heat transfers.*

**Ключевые слова:** трубчато-пластинчатый, дискретный турбулизатор, выступы и канавки, генерация вихрей, рациональная интенсификация конвективного теплообмена.

**Key words:** tubular-plate, discrete turbulizer, ridges and grooves, generation of vortex, rational enhancement of convective heat transfer.

## Введение

В теоретической и экспериментальной аэро- и гидродинамике хорошо известен способ генерации вихрей в пристеночном слое на участках диффузорных канальных течений при соответствующих углах раскрытия диффузора [1–3]. Этот способ вихреобразования реализуется применением вместо гладких (рис. 1,а) профилированных охлаждающих пластин (рёбер) с периодически расположенными поперечными выступами и канавками (рис. 1,б) в трубчато-пластинчатых теплообменных аппаратах (ТА) с интенсификацией конвективного теплообмена. При этом масштаб и интенсивность генерируемых вихрей, определяющих значения турбулентных параметров потока теплоносителя в присте-

ночном слое в области присоединения и повторного развития пограничного слоя, обуславливается многими геометрическими и режимными параметрами, среди которых наиболее важным является высота  $\delta_B$  (рис. 1,б) плавно округлённых профилей дискретных турбулизаторов потока — выступов профилированных охлаждающих пластин. Получение достоверных экспериментальных данных по теплоотдаче и аэродинамическому сопротивлению в коротких прямоугольных каналах ( $L/d \approx 10 \div 15$ ) с поперечными выступами и канавками для условий отрывных течений теплоносителя в широких диапазонах изменения величин конструктивных и режимного параметров позволит уточнить физичес-

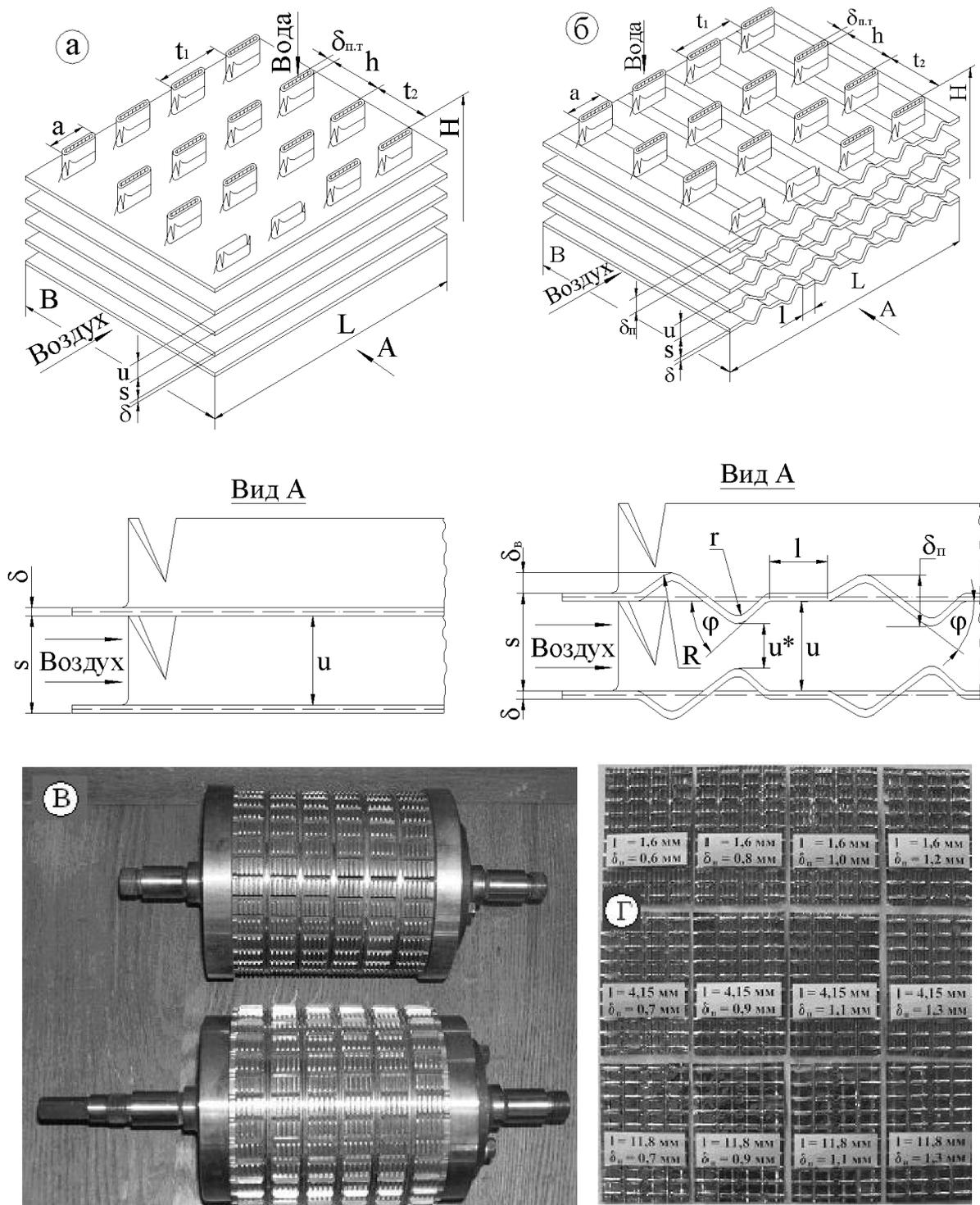


Рис. 1. Геометрические характеристики:

*a* — ТПгл ТП; *б* — ТПвк ТП; *в* — роторные матрица и пуансон; *г* — образцы исследованных ТПвк ТП

кую модель интенсификации теплообмена в коротких каналах и систематизировать сведения о рациональных значениях конструктивных параметров дискретных турбулизаторов при создании эффективных теплообменников. Конструкторы ТА с указанными теплообменными поверхностями опираются исключительно на экспериментальные данные, в связи со сложностью аэродинамики и меха-

низма теплообмена, не поддающихся пока анализу методами теории пограничного слоя.

**Объекты исследования**

Для получения уточнённых оценок процесса РИКТ в прямоугольных каналах трубчато-пластинчатых с выступами и канавками (ТПвк) теплообменных поверхностей при  $L/d \approx 10 \div 15$  было про-

ведено систематическое исследование тридцати одного водо-воздушного радиатора, образованного каналами с размерами сечений  $h \times u$  ( $h = \text{idem} = 12 \cdot 10^{-3}$  м и  $u = \text{variable} = 6,9 \cdot 10^{-3}, 5,9 \cdot 10^{-3}, 4,9 \cdot 10^{-3}$  и  $3,9 \cdot 10^{-3}$  м) с плавно округлёнными двумерными поверхностями поперечных выступов и канавок соответственно с величинами  $L/d = 10,50; 11,63; 13,22; 15,62$  и значениями параметров:  $d^*/d = 0,748 \div 0,953; l/d = 0,183 \div 2,003; h/u = 1,739 \div 3,077$ . Для оценки уровня РИКТ в каналах ТПвк ТП [4] были исследованы также четыре трубчато-пластинчатые гладкоканальные ТП № 32–35 с величинами  $L/d = 10,50; 11,63; 13,22$  и  $15,62$ .

Исследование проводилось в опытных четырёхрядных трубчато-пластинчатых водо-воздушных теплообменниках, для которых ТПвк ТП изготавливались с помощью наборных роторных матриц и пуансонов (пуансон и матрица для серийного изготовления шестирядных ТПвк ТП водо-воздушных теплообменников показаны на рис. 1, в).

Конструктивный фронт по воздуху сердцевины каждого экспериментального теплообменника составлял  $420 \cdot 10^{-3} \times 150 \cdot 10^{-3}$  м, а глубина хода воздуха в каналах ТП —  $L = 92 \cdot 10^{-3}$  м. Двенадцать типоразмеров пластин из меди МЗ толщиной  $0,1 \cdot 10^{-3}$  м с поперечными выступами и канавками (рис. 1, г), изготовленных с различными сочетаниями размеров  $l$  и  $\delta_{\text{п}}$ , установленные в экспериментальных четырёхрядных теплообменниках с различными величинами шага  $s = \text{variable}$  ( $s = 4 \cdot 10^{-3}; 5 \cdot 10^{-3}; 6 \cdot 10^{-3}; 7 \cdot 10^{-3}$  м), обеспечивали изменение основных геометрических безразмерных параметров  $d^*/d$  и  $l/d$  в диапазонах указанных выше значений.

Все 35 типоразмеров ТП были разбиты на восемь групп для определения влияния изменения величины параметра  $l/d$  при  $d^*/d = \text{idem}$  на изменение тепловых и аэродинамических характеристик ТП и на девять групп для определения влияния изменения величины параметра  $d^*/d$  при  $l/d = \text{idem}$ . В каждую такую группу входили несколько ТПвк ТП и одна ТПгл ТП [4] (с целью получения оценки возможной реализации теоретически обоснованного [2, 3] процесса РИКТ).

При этом все экспериментальные конструкции теплообменников на основе плоскоовальных трубок (из меди МЗ толщиной  $0,15 \cdot 10^{-3}$  м с неизменными габаритными размерами сечения  $a = 18 \cdot 10^{-3}$  м и  $\delta_{\text{п.т}} = 3 \cdot 10^{-3}$  м) имели одинаковые значения  $h = 12 \cdot 10^{-3}$  м,  $t_1 = 23 \cdot 10^{-3}$  м и  $t_2 = 15 \cdot 10^{-3}$  м (рис. 1, а, б). Гофрированные и плоские рёбра со

стороны воздуха в опытных теплообменниках устанавливались с четырьмя значениями шага  $s$ :  $4 \cdot 10^{-3}$  м (ТП № 1–11 и 32);  $5 \cdot 10^{-3}$  м (ТП № 12–21 и 33);  $6 \cdot 10^{-3}$  м (ТП № 22–25 и 34);  $7 \cdot 10^{-3}$  м (ТП № 26–31 и 35).

### Результаты исследования и их анализ

Исследование ТПвк ТП и ТПгл ТП проводилось по методу теплообменника на экспериментальном стенде «Аэродинамическая труба» [5]. Анализ приведённых на рис. 2 зависимостей  $Nu = f(Re)$  и  $\xi = f(Re)$  показывает, что для каждой ТПвк ТП, испытанной в составе восьми групп ТП, с уменьшением параметра  $l/d$  теплоотдача и аэродинамическое сопротивление возрастают. Меньшим значениям параметра  $l/d$  ТПвк ТП соответствуют большие частоты вносимых в поток теплоносителя возмущений и степень его искусственной турбулизации в пристеночном слое, обуславливающие рост значений критерия Нуссельта  $Nu$  при больших затратах кинетической энергии потока теплоносителя на вихреобразование, что обуславливает рост коэффициента аэродинамического сопротивления  $\xi$ .

Как уже отмечалось, значения  $Nu$  и  $\xi$  возрастают при уменьшении параметра  $l/d$ , но эти увеличения каждой величины в отдельности во всём диапазоне исследования по значениям критерия  $Re$  не одинаковы. Так, в диапазоне чисел  $Re = 600 \div 2500$  наблюдается увеличение значений  $Nu$  по отношению к  $Nu_{\text{гл}}$  от  $1,01–1,02$  до  $1,19–1,35$  (в зависимости от параметра  $l/d$ ). Уменьшение параметра  $l/d$  до некоторого (предельного) значения приведёт к тому, что имеющее место для ряда групп ТПвк ТП неравенство  $[(Nu/Nu_{\text{гл}})/(\xi/\xi_{\text{гл}})]_{Re=\text{idem}} > 1$  перейдёт в равенство, указывая тем самым, что при дальнейшем уменьшении параметра  $l/d$  рост относительной аэродинамической характеристики поверхности теплообмена с выступами и канавками будет опережать рост её относительной тепловой характеристики.

Совместный анализ зависимостей

$$(Nu/Nu_{\text{гл}})/(\xi/\xi_{\text{гл}}) = f(Re) \text{ при } l/d = \text{idem} \text{ и}$$

$$Nu/Nu_{\text{гл}} = f(Re) \text{ при } l/d = \text{idem}$$

показал, что ТПвк ТП № 27 ( $l/d = 0,183, d^*/d = 0,913$ ) характеризуется самой высокой эффективностью и в диапазоне значений критерия  $Re$  от 600 до 2500 обеспечивает значения отношения  $Nu/Nu_{\text{гл}} = 1,02 \div 1,35$ . Причём, при значении  $Re = 2500$  для этой ТП (рис. 3) имеет место наибольшее значение отношения  $(Nu/Nu_{\text{гл}})_{\text{max}} = 1,35$ . При этом предел рационального уменьшения параметра относительной длины гладкого участка канала со-

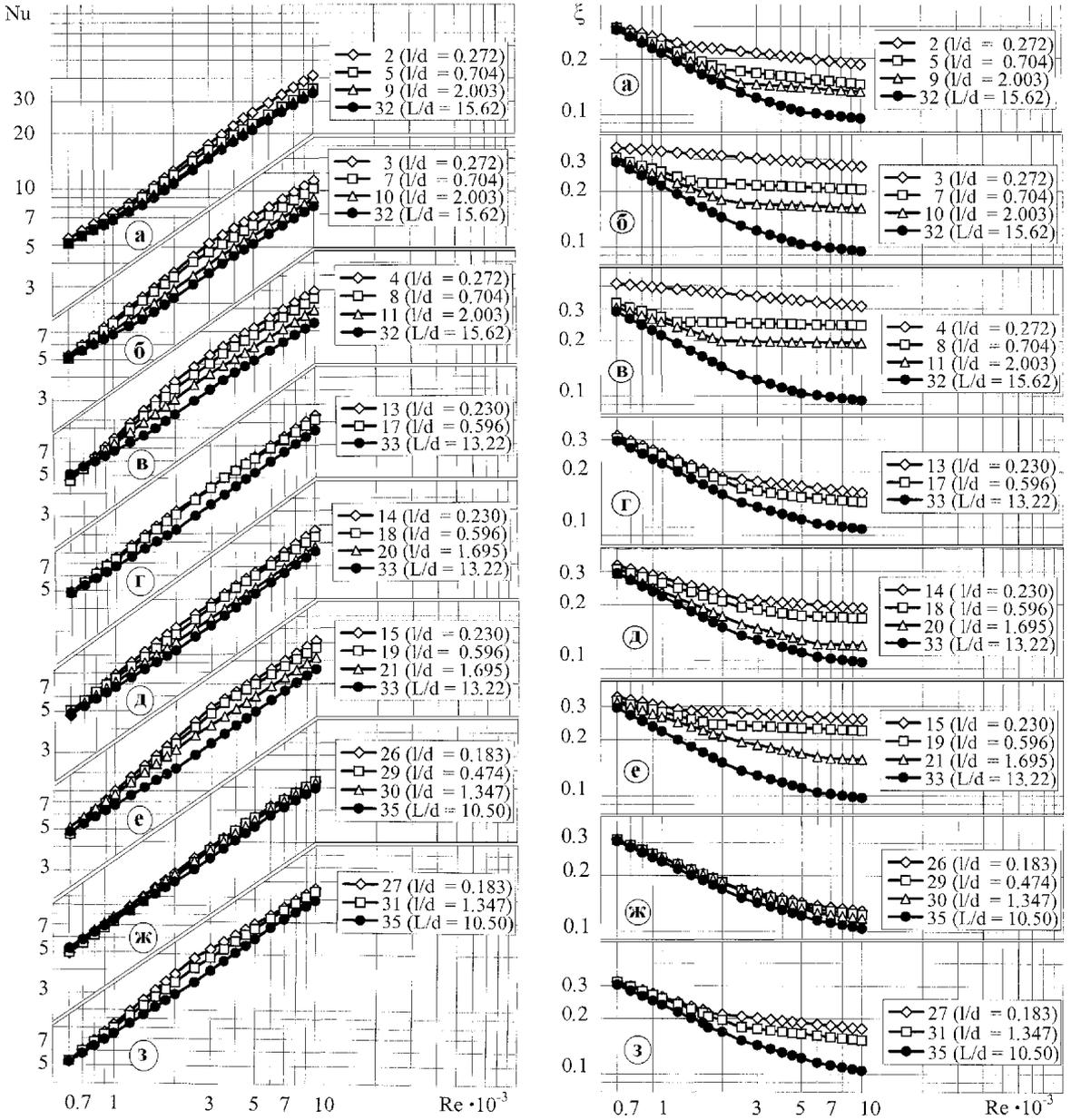
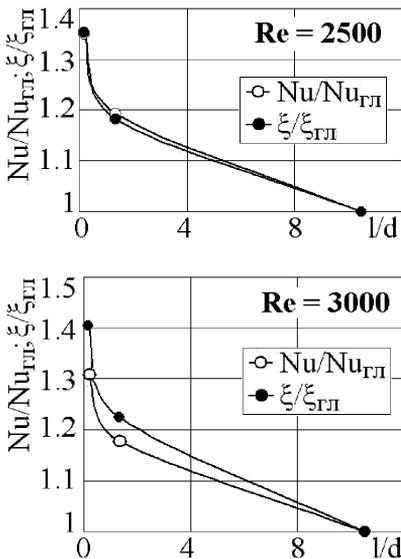


Рис. 2. Зависимости  $Nu = f(Re)$  и  $\xi = f(Re)$  для групп ТПгл и ТПвк ТП при  $(d^*/d)_m$ , равном: а — 0,868; б — 0,804; в — 0,760; г — 0,886; д — 0,854; е — 0,821; ж — 0,948; з — 0,918



ставляет  $(l/d)_{\min} = 0,183$ : дальнейшее уменьшение величины параметра  $l/d$  не отвечает условию осуществления процесса РИКТ. При  $l/d < [(l/d)_{\min} = 0,183]$  коэффициент сопротивления  $\xi$  увеличивается быстрее критерия  $Nu$ . В области значений критерия  $Re > 2500$  в каналах ТПвк ТП № 27 не реализуется процесс РИКТ, что отвечает неравенству  $[(Nu/Nu_{ГЛ}) / (\xi/\xi_{ГЛ})]_{Re=idem} < 1$  и показано на рис. 3 при  $Re = 3000$ .

Для остальных групп ТП получены следующие наибольшие значения оценок РИКТ: группа ТП № 2, 5, 9 и 32 ( $d^*/d = 0,868$ ) —  $(Nu/Nu_{ГЛ})_{\max} = 1,032$

Рис. 3. Зависимости  $Nu/Nu_{ГЛ} = f(l/d)$  и  $\xi/\xi_{ГЛ} = f(l/d)$  для ТПвк ТП № 27, 31 при  $(d^*/d)_m = 0,918$

при  $l/d = 0,42$  и  $Re = 600$ ; группа ТП № 13, 17 и 33 ( $d^*/d = 0,886$ ) —  $(Nu/Nu_{гл})_{max} = 1,23$  при  $l/d = 0,40$  и  $Re = 2500$ ; группа ТП № 14, 18, 20 и 33 ( $d^*/d = 0,854$ ) —  $(Nu/Nu_{гл})_{max} = 1,05$  при  $l/d = 1,7$  и  $Re = 1000$ . Анализ результатов исследования [6] также показал, что процесс РИКТ в каналах групп ТПвк ТП № 3, 7, 10 и 32; № 4, 8, 11 и 32; № 15, 19, 21 и 33; № 26, 29, 30 и 35 практически не реализуется во всём диапазоне исследования по числам  $Re = 600 \div 10000$ .

Частота вносимых в поток теплоносителя возмущений вследствие генерации вихрей в присте-

точной области течения в каналах ТПвк ТП определяется параметром  $l/d$ , а мощность возмущений и генерируемых вихревых структур — параметром  $d^*/d$ . С уменьшением параметра  $d^*/d$  (или с увеличением высоты выступа  $\delta_b$ ) теплоотдача растёт (рис. 4), так как вихри становятся больше, а срывающаяся с их верхней границы турбулентность заметно интенсифицирует конвективный теплообмен. Однако такая интенсификация теплообмена сопровождается значительным ростом коэффициента сопротивления  $\xi$  (рис. 4), так как требует больших

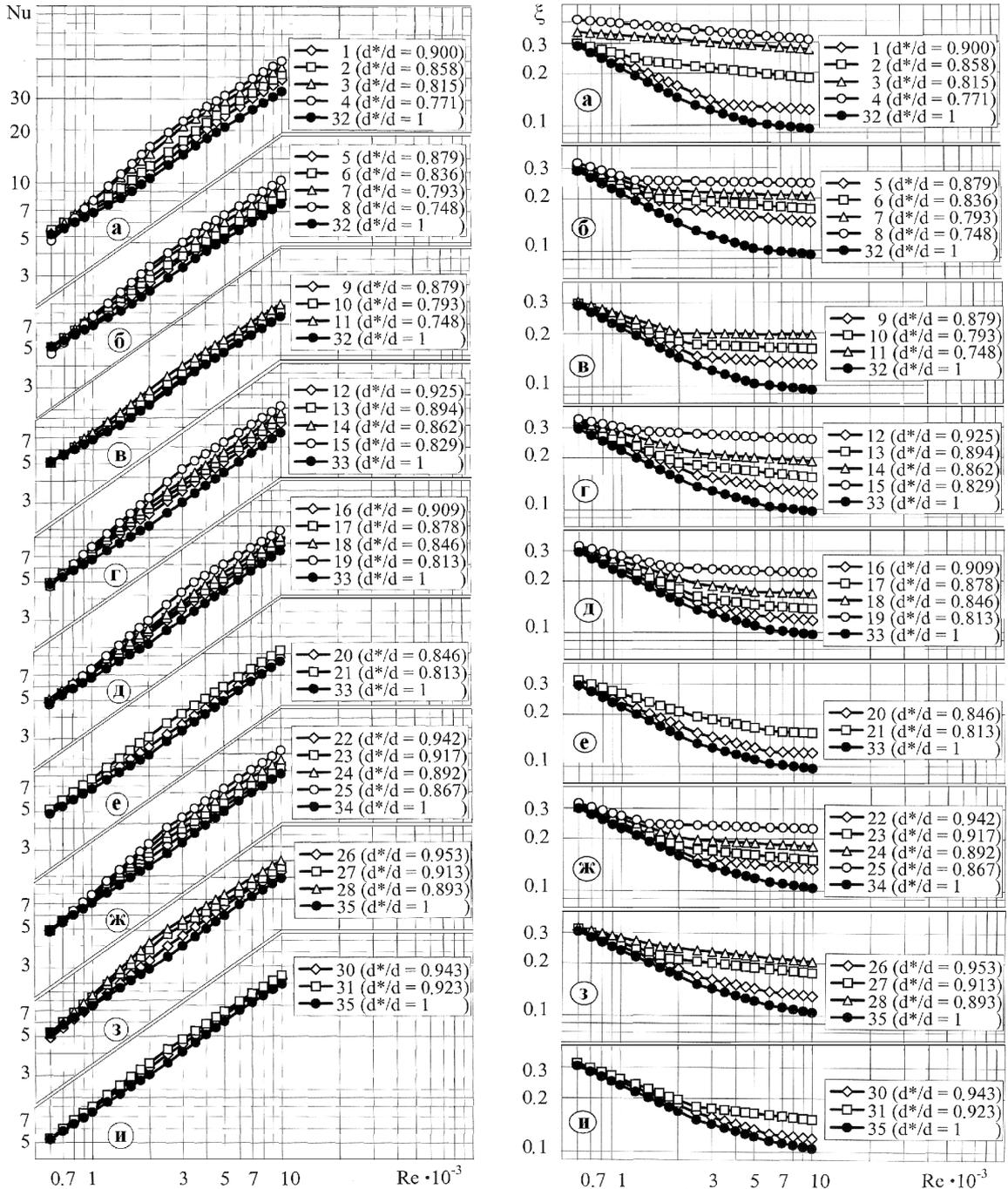


Рис. 4. Зависимости  $Nu = f(Re)$  и  $\xi = f(Re)$  для групп ТПгл и ТПвк ТП при  $l/d$ , равном:  
 а — 0,272; б — 0,704; в — 2,003; г — 0,230; д — 0,596; е — 1,695; ж — 0,202; з — 0,183; и — 1,347

затрат подводимой к потоку теплоносителя дополнительной энергии, не только расходуемой на необходимую турбулизацию тонкого пристеночного слоя течения теплоносителя, но и затрагивающую ядро потока. О существенном влиянии изменения параметра степени сужения сечения канала свидетельствуют расслаивающиеся по величине  $d^*/d$  экспериментальные зависимости  $Nu = f(Re)$  и  $\xi = f(Re)$  ТПвк ТП всех девяти групп этой серии испытаний.

Характер изменения критерия  $Nu$  и коэффициента сопротивления  $\xi$  зависит как от параметра  $d^*/d$ , так и от критерия  $Re$  (рис. 5). Как уже отмечалось, значения критерия  $Nu$  и коэффициента сопротивления  $\xi$  возрастают при уменьшении параметра  $d^*/d$ , но эти увеличения каждой величины в отдельности во всём диапазоне исследования

по числам  $Re$  различны. Очевидно, что наиболее целесообразной окажется интенсификация конвективного теплообмена в каналах ТПвк ТП в области переходного режима течения теплоносителя при значениях параметра  $d^*/d$ , обеспечивающих опережающий (или равный) рост относительной тепловой характеристики  $Nu/Nu_{г\text{л}}$  по сравнению с ростом относительной аэродинамической характеристики  $\xi/\xi_{г\text{л}}$  (при идентичных геометрии профилей поперечных сечений гладкого и с искусственной турбулизацией потока каналов и режимах течения теплоносителя в них). Анализ представленных на рис. 6 зависимостей  $Nu/Nu_{г\text{л}} = f(d^*/d)$  и  $\xi/\xi_{г\text{л}} = f(d^*/d)$  при  $Re = \text{idem}$  показывает, что при значении  $Re = 1600$  для ТПвк ТП № 13 ( $l/d = 0,230$ ,  $d^*/d = 0,894$ ) имеет место равенство  $(Nu/Nu_{г\text{л}})_{\text{max}} = 1,207$  при соблюдении условия

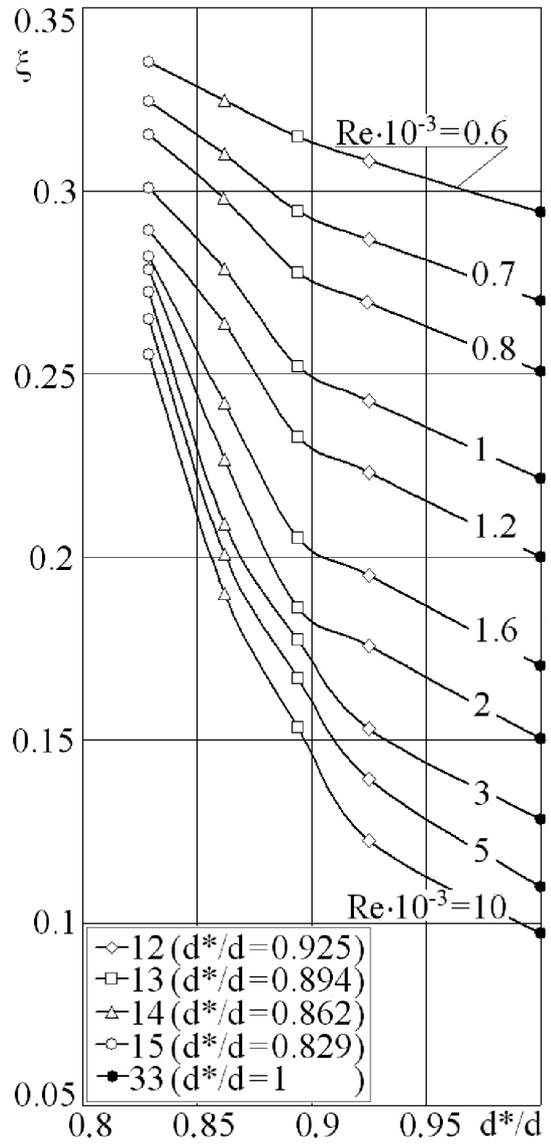
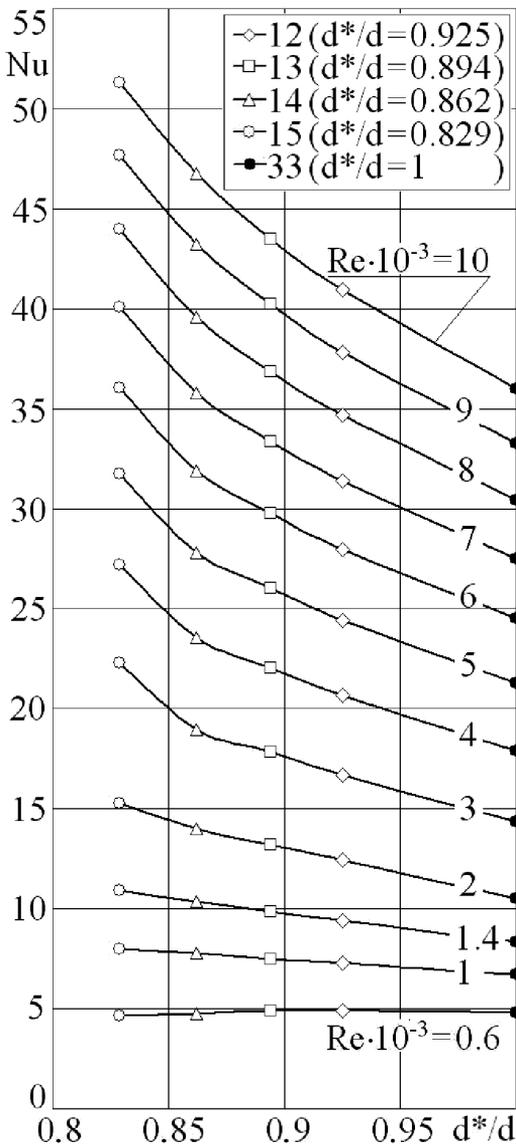


Рис. 5. Зависимости  $Nu = f(d^*/d)$  и  $\xi = f(d^*/d)$  при  $Re = \text{idem}$  для ТПвк № 12–15 при  $l/d = 0,230$  и ТПг\text{л} № 33 ТП

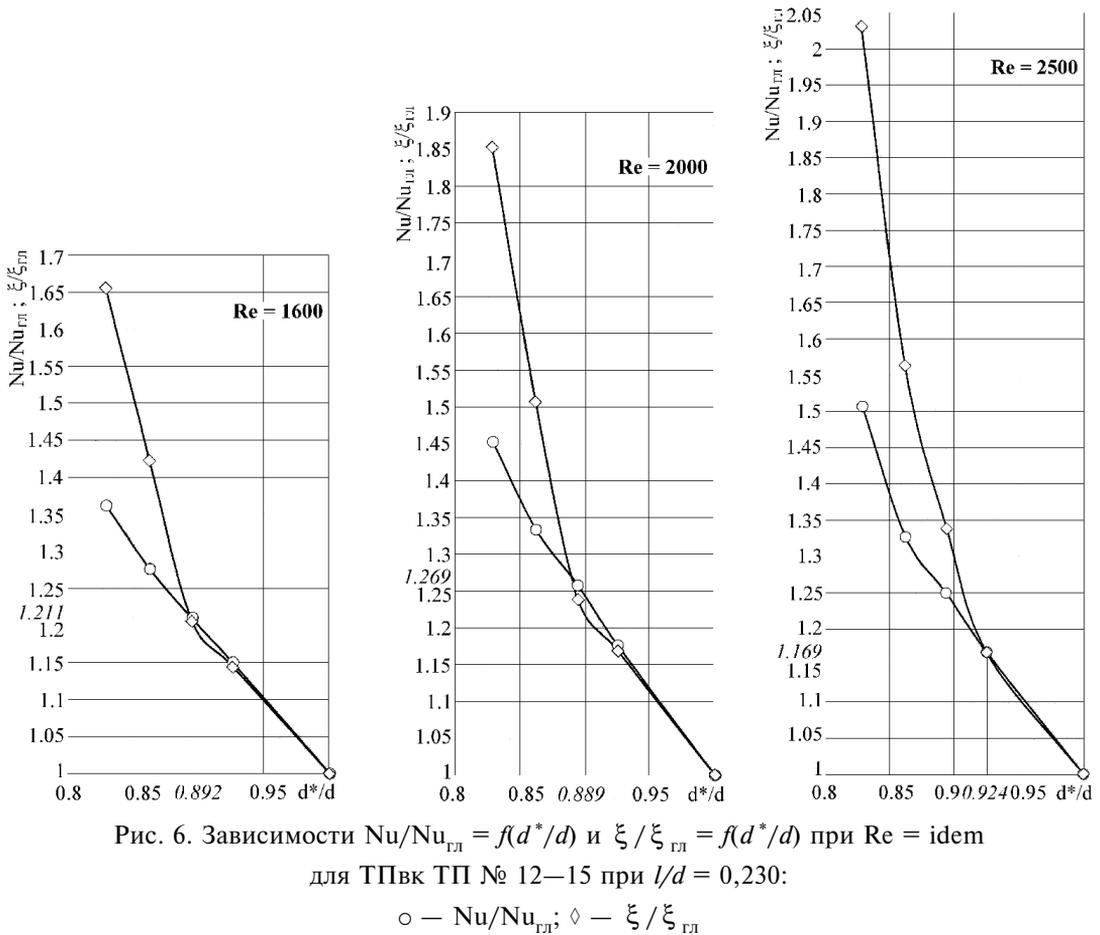


Рис. 6. Зависимости  $Nu/Nu_{гл} = f(d^*/d)$  и  $\xi/\xi_{гл} = f(d^*/d)$  при  $Re = idem$  для ТПвк ТП № 12–15 при  $l/d = 0,230$ :

○ —  $Nu/Nu_{гл}$ ; ◇ —  $\xi/\xi_{гл}$

$$[(Nu/Nu_{гл})/(\xi/\xi_{гл})]_{Re=idem} = 1,$$

а при  $Re = 2000$  соблюдается неравенство

$$(Nu/Nu_{гл} = 1,257) > (\xi/\xi_{гл} = 1,238).$$

При этом значении  $Re = 2000$  при условии

$$[(Nu/Nu_{гл})/(\xi/\xi_{гл})]_{Re=idem} = 1$$

наибольшее значение оценки процесса РИКТ

$$(Nu/Nu_{гл})_{max} = 1,269$$

обеспечила бы ТПвк ТП с параметром  $d^*/d = 0,889$ , отличным от значений  $d^*/d$ , имевших место в эксперименте. При увеличении значения критерия  $Re$  до 2500 процесс РИКТ в каналах ТПвк ТП № 13 не реализуется. Его реализация смещается в сторону больших значений параметра  $d^*/d$  (меньших значений высоты выступа  $\delta_b$ ) и характеризует каналы ТПвк ТП № 12 с параметром  $d^*/d = 0,924$  и оценкой  $(Nu/Nu_{гл})_{max} = 1,169$  при соблюдении значения определяющего комплекса

$$[(Nu/Nu_{гл})/(\xi/\xi_{гл})]_{Re=idem} = 1.$$

Для остальных групп ТП этой серии получены следующие наибольшие значения оценок РИКТ: группа ТП № 16–19 и 33 ( $l/d = 0,596$ ) —  $(Nu/Nu_{гл})_{max} = 1,178$  при  $d^*/d = 0,881$  и  $Re = 2500$ ;

группа ТП № 22–25 и 34 ( $l/d = 0,202$ ) —  $(Nu/Nu_{гл})_{max} = 1,245$  при  $d^*/d = 0,897$  и  $Re = 2000$ ;

группа ТП № 26–28 и 35 ( $l/d = 0,183$ ) —  $(Nu/Nu_{гл})_{max} = 1,378$  при  $d^*/d = 0,898$  и  $Re = 2000$ ;

группа ТП № 30, 31 и 35 ( $l/d = 1,347$ ) —  $(Nu/Nu_{гл})_{max} = 1,16$  при  $d^*/d = 0,923$  и  $Re = 2000$ .

Анализ результатов исследования также показал [6], что процесс РИКТ в каналах групп ТПвк ТП № 1–4 и 32; № 5–8 и 32; № 9–11 и 32; № 20, 21 и 33 не реализуется во всём диапазоне исследования по числам  $Re = 600 \div 10000$ .

### Условия реализации процесса РИКТ в ТПвк ТП

Рассмотрим влияние изменения величины параметра  $d^*/d$  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, в каналах ТПвк ТП которых реализуется процесс РИКТ. Для этих групп ТП были построены графические зависимости

$Nu/Nu_{гл} = f(d^*/d)$  и  $\xi/\xi_{гл} = f(d^*/d)$  при  $Re = idem$ , координаты точек пересечения которых для каждого выбранного значения критерия  $Re$  (см. рис. 6 для выборочно представленных зависимостей группы ТПвк ТП № 12–15 — качественно они аналогичны для всех групп) определяют наибольшее значе-

ние оценки  $(Nu/Nu_{гр})'$  процесса РИКТ и наименьшее значение параметра  $(d^*/d)'$  [7].

На рис. 7 представлены зависимости

$$(Nu/Nu_{гр})/(\xi/\xi_{гр}) = f(Re), Nu/Nu_{гр} = f(Re),$$

$$\xi/\xi_{гр} = f(Re) \text{ и } (d^*/d)' = f(Re),$$

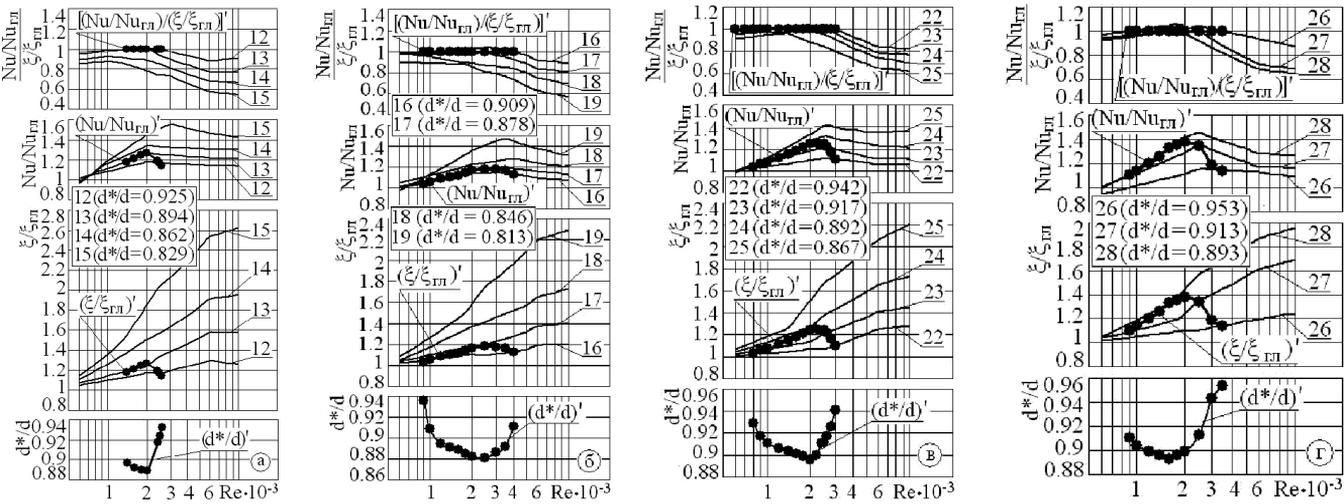


Рис. 7. Зависимости  $(Nu/Nu_{гр})/(\xi/\xi_{гр}) = f(Re)$ ,  $(Nu/Nu_{гр}) = f(Re)$ ,  $\xi/\xi_{гр} = f(Re)$  и  $d^*/d = f(Re)$  для ТПвк ТП:

а – № 12–15 при  $l/d = 0,230$ ; б – № 16–19 при  $l/d = 0,596$ ; в – № 22–25 при  $l/d = 0,202$ ; г – № 26–28 при  $l/d = 0,183$

последняя из которых, например для ТПвк ТП № 16–19, совокупностью своих точек обуславливает диапазоны значений определяющего безразмерного геометрического  $0,889 \leq (d^*/d)' \leq 0,932$  и режимного  $(Re'_{min} = 900) \leq Re' \leq (Re'_{max} = 4000)$  параметров, при которых с оценкой  $(Nu/Nu_{гр})'$  и значением комплекса  $[(Nu/Nu_{гр})/(\xi/\xi_{гр})]_{Re=idem} = 1$  реализуется процесс РИКТ. Приведённые на рис. 7 графические зависимости  $(d^*/d)' = f(Re)$  для всех четырёх групп ТПвк ТП № 12–15, № 16–19, № 22–25, № 26–28 аналогичны по форме и характеризуются однопиковными провалами в кривых. Физическая общность процесса РИКТ, реализуемого указанным ранее способом искусственной турбулизации потока теплоносителя, усматривается из рис. 8, показывающего все возможные варианты интенсификации конвективного теплообмена [7, 8].

Процесс по ниспадающей левой ветви 1-2-3 зависимости  $(d^*/d)' = f(Re)$  сопровождается уменьшением значений кривой  $(d^*/d)' = f(Re)$  до наименьшего значения  $(d^*/d)'_{min} = (d^*/d)'_3$ , что

равносильно увеличению высоты выступа до значения  $(\delta_b)'_{max}$ . Это объясняется воздействием искусственной турбулизации на более толстый пристеночный слой в переходной области при наличии тенденции опережающего роста тепловой характеристики  $Nu/Nu_{гр} = f(Re)$  по сравнению с аэродинамической характеристикой  $\xi/\xi_{гр} = f(Re)$ . С ро-

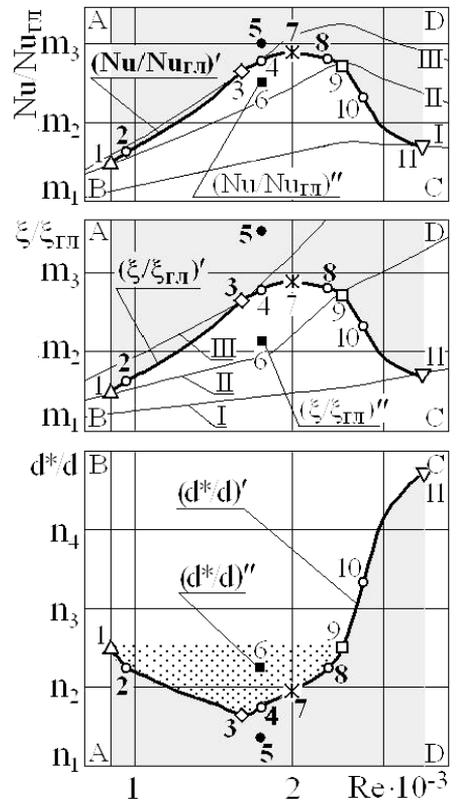


Рис. 8. Схематизация области значений параметров, определяющих реализацию процесса РИКТ в прямоугольных каналах ТПвк ТП

стом значений критерия  $Re$  и наступлением более развитого турбулентного режима прекращается опережающий рост отношения  $Nu/Nu_{г\Gamma}$  по сравнению с ростом отношения  $\xi/\xi_{г\Gamma}$ , величина определяющего комплекса уменьшается и принимает при  $Re'_{11} = Re'_{max}$  предельное для процесса РИКТ значение

$$[(Nu/Nu_{г\Gamma})/(\xi/\xi_{г\Gamma})]_{Re=idem} = 1.$$

При этом значение безразмерного параметра возрастает до  $(d^*/d)'_{11} = (d^*/d)'_{max}$ , что равносильно 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 (ТПвк ТП с меньшими значениями  $d^*/d$  или с большими значениями  $\delta_B$ ), чем при развитом турбулентном режиме.

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 безразмерного параметра:

1)  $(d^*/d)'$  — реализуется процесс РИКТ при  $(Nu/Nu_{г\Gamma})'_{Re*=idem} = (\xi/\xi_{г\Gamma})'_{Re*=idem}$  [совокупность точек графической зависимости  $(d^*/d)' = f(Re)$  — кривая 1-2-3-4-7-8-9-10-11];

2)  $(d^*/d)'' > (d^*/d)'$  — реализуется процесс РИКТ при  $(Nu/Nu_{г\Gamma})''_{Re*=idem} = (\xi/\xi_{г\Gamma})''_{Re*=idem}$ , причём  $(Nu/Nu_{г\Gamma})''_{Re*=idem} < (Nu/Nu_{г\Gamma})'_{Re*=idem}$  (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)  $d^*/d < (d^*/d)'$  — реализуется интенсификация теплообмена при  $(Nu/Nu_{г\Gamma})_{Re*=idem} < (\xi/\xi_{г\Gamma})_{Re*=idem}$ , причём  $(Nu/Nu_{г\Gamma})_{Re*=idem} > (Nu/Nu_{г\Gamma})'_{Re*=idem} > (Nu/Nu_{г\Gamma})''_{Re*=idem}$  (совокупность точек области 1-2-3-4-7-8-9-10-11-D-A-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

$$[(Nu/Nu_{г\Gamma})/(\xi/\xi_{г\Gamma})]_{Re*=idem} = 1 \text{ и } (Nu/Nu_{г\Gamma})'_4,$$

если принимаемая величина геометрического безразмерного параметра будет равна  $(d^*/d)'_4$ ;

$$[(Nu/Nu_{г\Gamma})/(\xi/\xi_{г\Gamma})]_{Re*=idem} > 1$$

и

$$(Nu/Nu_{г\Gamma})''_6 < (Nu/Nu_{г\Gamma})'_4,$$

если принимаемая величина геометрического безразмерного параметра отвечает неравенству  $(d^*/d)''_6 > (d^*/d)'_4$ . 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 ТПвк ТП принимаемые величины параметра  $d^*/d$  отвечают неравенству  $(d^*/d)_5 < (d^*/d)'_4$ , то процесс РИКТ не реализуется, а интенсификация теплообмена определяется неравенством  $(Nu/Nu_{г\Gamma})_5 < (\xi/\xi_{г\Gamma})_5$ . 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, как правило, неприемлемо в транспортных теплообменниках [9].

## Выводы

1. Результаты исследования в широком диапазоне изменения чисел Рейнольдса  $600 \leq Re \leq 10000$  указывают на перспективность использованного способа искусственной турбулизации потока теплоносителя в прямоугольных каналах трубчато-пластинчатых ТП с целью интенсификации конвективного теплообмена. Установлено, что для ТПвк ТП процесс РИКТ, надёжно управляемый изменением значений основных геометрических безразмерных параметров каналов, реализуется в широком диапазоне значений режимного параметра области переходного режима

$$Re'_{min} = (800 \div 1400) \leq Re' \leq Re'_{max} = (2600 \div 4000).$$

2. Для группы ТПвк ТП № 26—28 с параметрами  $l/d = 0,183$ ,  $h/u = 1,74$ ,  $L/d = 10,50$  и  $d^*/d = \text{variable}$  ( $d^*/d = 0,893; 0,913; 0,953$ ) установлены: значение оценки  $[(Nu/Nu_{г\Gamma})'_{Re=2000}]_{max} = 1,38$  при  $[(Nu/Nu_{г\Gamma})/(\xi/\xi_{г\Gamma})]_{Re=2000} = 1$ ; условия реализации процесса РИКТ —  $900 \leq Re' \leq 3500$  и  $0,893 \leq (d^*/d)' \leq 0,953$ ; диапазоны значений оценок процесса РИКТ —  $1,10 \leq (Nu/Nu_{г\Gamma})' \leq 1,38$  при  $900 \leq Re' \leq 2000$  и  $1,38 \leq (Nu/Nu_{г\Gamma})' \leq 1,14$  при  $2000 \leq Re' \leq 3500$ .

3. Для расширенной в сторону меньших значений режимного критерия  $Re$  переходной области течения теплоносителя (вследствие искусственной

турбулизации) имеет место провал в кривых графических зависимостей ( $d^*/d' = f(Re)$ ), указывающий на необходимость применения дискретных турбулизаторов с более интенсивным воздействием на поток теплоносителя (ТПвк ТП с меньшими значениями параметра  $d^*/d$  или с большими значениями  $\delta_b$ ), чем при развитом турбулентном режиме.

4. Предложен графический метод надёжного определения необходимых при конструировании ТА значений основных геометрических безразмерных параметров, определяющих эффективность процесса РИКТ, на основании результата экспериментального исследования группы из весьма ограниченного числа (4–5) опытных теплообменников.

5. В условиях налаженного производства гладкоканальных радиаторов применение гофрированных пластин (рёбер) не требует изменений в технологии и при определённых условиях обеспечивает возможность до 1,4 раза уменьшить объём и массу сердцевин интенсифицированного трубчато-пластинчатого теплообменника.

6. 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.

### Основные обозначения

РИКТ — рациональная интенсификация конвективного теплообмена;

ТА и ТП — теплообменный аппарат и теплообменная поверхность;

ТПгл ТП и ТПвк ТП — трубчато-пластинчатая соответственно гладкоканальная и с выступами и канавками, ТП;

$d$  и  $d^*$  — эквивалентный гидравлический диаметр канала ТПвк ТП на гладком участке и в самом узком его сечении, м;

$d^*/d$  — степень сужения сечения канала;

$h$  — расстояние между плоскоовальными трубками, м;

$h/u$  — параметр щелевидности прямоугольного канала;

$L$  — общая длина каналов теплообменной поверхности, м;

$L/d$  — относительная глубина хода воздуха в каналах ТП;

$l$  — длина гладкого участка канала ТПвк ТП, м;

$l/d$  — относительная длина гладкого участка канала;

$Nu_{гл}$  и  $Nu$  — критерий Нуссельта ТПгл и ТПвк ТП;

$Re$  — критерий Рейнольдса;

$u$  — расстояние между рёбрами, м;

$\xi_{гл}$  и  $\xi$  — коэффициент общих потерь давления (на вход, выход и трение) в каналах ТПгл и ТПвк ТП.

### Индексы

' и '' — конкретизирует отношение к процессам РИКТ при

$$[(Nu/Nu_{гл})/(\xi/\xi_{гл})]_{Re=idem} = 1$$

$$\text{и } [(Nu/Nu_{гл})/(\xi/\xi_{гл})]_{Re=idem} > 1;$$

idem — одинаковый;

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

### Библиографический список

1. Дубровский Е.В. Интенсификация конвективного теплообмена в пластинчато-ребристых теплообменных поверхностях // Энергетика и транспорт: Известия АН СССР. 1978. № 6. С. 116–127.

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

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

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. Интенсификация теплообмена. Успехи теплопередачи, 2 / Ю.В. Вилемас, Г.И. Воронин, Б.В. Дзюбенко и др.; Под ред. А.А. Жукаускаса и Э.К. Калинина. Вильнюс: Мокслас, 1988.

6. Vasilyev V. Artificial Turbulence of Carrier Flow in Rectangular Ducts with Ridges and Grooves of Tubular Plate Heat Exchange Surfaces. — Turbulence, Heat and Mass Transfer 5: Proceedings of the Fifth International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer, Dubrovnik, Croatia, 25 – 29 September, 2006 / K. Hanjalic, Y. Nagano and S. Jakirlic (Editors); Begell House Inc, p. 747 – 750.

7. Васильев В.Я. Условия реализации процесса рациональной интенсификации конвективного теплообмена в прямоугольных каналах теплообменных поверхностей // Труды Четвёртой Российской национальной конференции по теплообмену: В 8 томах. Т. 6. Дисперсные потоки и пористые среды. Интенсификация теплообмена. М.: Издательский дом МЭИ, 2006. С. 174–177.

8. 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.