

УДК 536.24:533.6.011

Е.Н. ПИСЬМЕННЫЙ, докт. техн. наук, проф., зав. кафедрой,
НТУУ «КПИ», г. Киев

А.М. ТЕРЕХ, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., НТУУ «КПИ», г. Киев

А.В. СЕМЕНЯКО, ассист., НТУУ «КПИ», г. Киев

А.И. РУДЕНКО, канд. техн. наук, доц., НТУУ «КПИ», г. Киев

В.Д. БУРЛЕЙ, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., НТУУ «КПИ», г. Киев

ТЕПЛООБМЕН И АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ШАХМАТНЫХ ПАКЕТОВ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТРУБ С КОНФУЗОРНОЙ ПОДГИБКОЙ ПОПЕРЕЧНЫХ РЕБЕР

Приведены результаты экспериментального исследования теплообмена и аэродинамического сопротивления шахматных пакетов биметаллических труб с конфузорной подгибкой ребер. Подгибка ребер приводит к увеличению интенсивности теплообмена на 22-25% и росту аэродинамического сопротивления на 30-35%.

Ключевые слова: труба, ребро, пакет, конфузор, подгибка, теплообмен, сопротивление

Приведені результати експериментального дослідження теплообміну і аеродинамічного опору шахових пакетів біметалічних труб з конфузорно підігнутими ребрами. Підгинання ребер приводить до збільшення інтенсивності теплообміну на 22-25% і зростанню аеродинамічного опору на 30-35%.

Ключові слова: труба, ребро, пакет, конфузор, підгинання, теплообмін, опір

An experimental study of heat transfer and aerodynamic resistance staggered bundles of bimetallic tubes with contractor overcast of fins are given. Overcasting of fins leads to an increase in the intensity of heat transfer by 22-25% and increase aerodynamic resistance on 30-35%.

Key words: tube, fin, bundle, contractor, overcast, heat transfer, resistance

Введение

Одной из важных задач энергомашиностроения является снижение габаритов и металлоемкости теплообменных аппаратов разного назначения. Широкое использование поперечно-ребренных труб в качестве элементов такого оборудования выводит проблему интенсификации теплообмена в них в ряд наиболее актуальных. В условиях отечественного производства ставятся жесткие требования к повышению тепловой эффективности теплообменных поверхностей без существенного изменения технологии их изготовления. К таким поверхностям можно отнести разработанные в НТУУ „КПИ” трубы с кофузорной подгибкой ребер [1], которые имеют существенные преимущества по сравнению с поверхностями из ребренных труб, использующиеся в настоящее время в промышленности.

Во многих отраслях промышленности в качестве поверхностей теплообмена используются не стальные трубы с приваренными ребрами, а биметаллические с

накатанным алюминиевым оребрением. Такие трубы обладают высокой коррозионной стойкостью, имеют небольшую массу и высокую степень развития поверхности. Чаще всего такие трубы применяются в аппаратах воздушного охлаждения технологических продуктов. В этой связи в НТУУ „КПИ” проведены экспериментальные исследования теплообмена и аэродинамического сопротивления шахматных пакетов биметаллических труб с конфузорной подгибкой ребер, изготовленных из алюминиевого сплава, результаты которых представлены в данной статье.

Цель исследований: определить количественное увеличение интенсивности теплообмена и роста сопротивления, а также получить зависимости для определения приведенных коэффициентов теплоотдачи и сопротивления для пакетов биметаллических труб с конфузорно подгибкой поперечных накатанных ребер.

Выявленные в результате исследований течения и теплообмена [1] закономерности процессов в пучках поперечно-оребранных цилиндров и сформированными требованиями к разрабатываемым типам поперечно-оребранных поверхностей [1] позволили предложить новый вид интенсифицированной оребренной поверхности, теплоаэродинамические и массогабаритные характеристики которой выше использующихся в настоящее время аналогов. Интенсификация теплообмена в такой поверхности происходит за счет включения в интенсивный теплообмен плохо "работающие" участки поверхности ребристой трубы при помощи конфузорной подгибки поперечных ребер. Ее целесообразно применять тогда, когда в теплообменных устройствах используются оребренные трубы круглого поперечного сечения. Метод интенсификации теплообмена посредством конфузорной подгибки ребер является развитием идеи параллельной подгибки оребрения, используемой на Подольском машиностроительном заводе (ЗиО) [2,3] с целью уменьшения поперечных шагов труб в пакетах и повышения компактности теплообменных устройств в целом.

В монографии [1] приведены результаты масштабных экспериментальных исследований теплообмена и аэродинамического сопротивления шахматных пучков натуральных стальных труб с кофузорной подгибкой поперечных ребер. Показано, что на интенсивность теплообмена и сопротивление влияет угол конфузорности γ° подогнутых ребер, степень подгибки ребер l_n/h , а также шаговые характеристики пучка. Наибольшие значения интенсивности характерны для компоновок с большими поперечными и относительно малыми продольными шагами ($S_1/S_2 > 2$), когда при использовании обычных ребристых труб создаются неблагоприятные условия омывания их кормовых и лобовых частей. В пакетах с относительно малыми поперечными и продольными шагами ($S_1/S_2 < 1.3$) увеличение интенсивности теплообмена не превышало 15-17%.

Конфузорная подгибка ребер, как показано в [1] приводит к заметному росту аэродинамического сопротивления по сравнению с пучками труб без подгибки. Наибольший рост аэродинамического сопротивления (до 70...80%) наблюдается при максимальном значении угла γ ($\gamma = 20^\circ$). Увеличение относительного продольного шага σ_2 и соответствующее уменьшение параметра размещения S_1/S_2

при всех значениях угла γ приводит к снижению аэродинамического сопротивления.

Столь обширные экспериментальные данные и анализ влияния на теплообмен и аэродинамическое сопротивление параметров подгибки ребер, а также шаговых характеристик пучков, позволили существенно сократить количество исследованных пучков биметаллических труб с конфузорной подгибкой накатанных ребер.

1. Методика исследований

Исследования теплообмена и аэродинамического сопротивления поперечно-омываемых шахматных пакетов труб (рис.1) с конфузорно подогнутыми ребрами проводились с использованием стендового оборудования и методики, подробно описанной в работе [1]. К наиболее важным особенностям использованной методики относится: полное тепловое моделирование, осуществлявшееся за счет электрообогрева всех труб пучка.

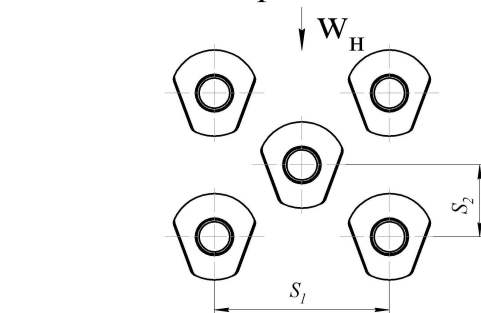


Рис.1. Шахматный пакет труб с конфузорно подогнутыми ребрами

Геометрические характеристики оребренных труб и пакетов

В экспериментах использовались натурные стальные трубы с приварным спирально-ленточным оребрением, геометрические характеристики которых представлены в таблице 1. Исследования проведены для труб, имевших две степени подгибки ребер.

Таблица 1. Геометрические характеристики оребренных труб

Наименование величины	Обозн.	Значения величины
Диаметр основной трубы	d , мм	28.0
Высота ребер	h , мм	13.5
Шаг ребер	t , мм	3.0
Толщина ребер средняя	δ , мм	0.6
Коэффициент оребрения	ψ	14.5
Угол подгибки ребер	β°	20.0
Степень подгибки	$\frac{l_n}{h}$	0.50-0.75
Поверхность одного погонного метра трубы	H_{1nm} , м ²	1.275
Масса одного метра трубы	G_{1nm} , кг	2.5

Труба-калориметр состояла из двух частей, которые плотно соединялись между собой с помощью специального клея. Калориметр пучка предназначался для измерения температурного поля вокруг стенки трубы. Для этого в стенку несущей трубы верхней половины трубы-калориметра зачеканивались свинцом шесть медь-константановых термопар (рис. 2). Провода термопар выводились к торцу несущей трубы и подсоединялись к штекерного разъему.

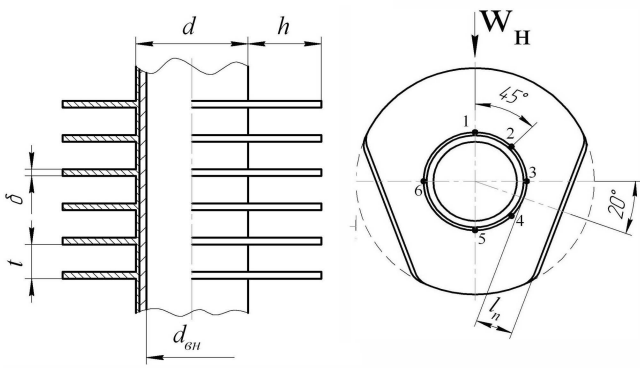


Рис.2 Биметаллическая труба с конфузорной подгибкой ребер 1-6 номера термопар у корня ребра

Монтаж термопар осуществлялся на предварительно подогнутых ребрах, в специально изготовленном устройстве – «фильере». Конструкция «фильеры» позволяла регулировать степень подгибки ребер за счет изменения расстояния между подгибающими ребра стенками. После монтажа термопар обе половинки трубы соединялись и собранный таким образом калориметр пропускался через

«фильеру» для подгибки оставшихся не подогнутыми ребер.

Геометрические характеристики исследованных пакетов труб с конфузорно подогнутыми ребрами представлены в таблице 2. Эксперименты проводились для 4 шахматных пакетов труб.

Таблица 2. Геометрические характеристики пакетов труб и опытные значения m и C_q в формуле (4) и n , C_s в зависимости (8)

Номер размещ.	S_1 , мм	S_2 , мм	S_1/S_2	l_n/h	m	C_q	n	C_s
1	86.0	41.0	2.100	0.75	0.715	0.0868	0.265	3.570
2	60.5	52.0	1.163	0.75	0.720	0.0813	0.255	3.124
3	86.0	41.0	2.100	0.50	0.730	0.0821	0.255	3.522
4	60.5	52.0	1.163	0.50	0.720	0.0813	0.260	3.598

Методика измерений и обработки опытных данных по теплообмену

Задача исследования теплообмена сводилась к установлению зависимости чисел Нуссельта, рассчитанных по приведенным коэффициентам теплоотдачи, от чисел Рейнольдса для глубинных рядов шахматных пакетов оребренных труб.

Труба-калориметр устанавливалась в пятых рядах шестирядных пакетов. Приведенные коэффициенты теплоотдачи определялись непосредственно по результатам измерений температуры стенки трубы у корня ребра по формуле

$$\alpha_{np} = \frac{Q}{H_k (\bar{T}_{cm} - \bar{T}_n)}, \quad (1)$$

где \bar{T}_{cm} - средняя температура трубы-калориметра; \bar{T}_n - средняя температура потока воздуха в исследуемом ряду, определявшаяся балансовым методом.

В качестве расчетной скорости принималась скорость в наиболее узком сечении пучка, площадь которого определялась в соответствии с [4].

За определяющий размер в числах Нуссельта и Рейнольдса принят диаметр трубы, несущей оребрение d . Физические константы: теплопроводность воздуха, кинематическая вязкость воздуха, входящие в выражения для Nu и Re_d относились к среднебалансовой температуре воздуха в ряду, где размещался калориметр.

Оценка погрешности измерений проведена в соответствии с основными положениями и рекомендациями [4,5]. Принятая методика измерений и

измерительная аппаратура позволяет определять числа Нуссельта с точностью $\pm 4-5\%$, числа Рейнольдса - $\pm 5-6\%$.

Методика измерений и обработки опытных данных по аэродинамическому сопротивлению

Аэродинамическое сопротивление исследованных пучков оребренных труб изучалось в условиях изотермического течения при температуре воздуха $T_{\text{ex}} = 290...300 \text{ К}$. Потери давления определялись по разнице статических давлений до и после пакета с учетом потерь на трение и местных сопротивлений в проточной части стенда

$$\Delta P = \Delta P_{cm} - \left(\frac{\lambda_{mp} \cdot L_p}{d_e} \right) \cdot \frac{\rho \cdot W_T^2}{2} - \zeta_M \cdot \frac{\rho \cdot W_T^2}{2}, \quad (2)$$

где ΔP_{cm} - измеренный при помощи микроманометра перепад статических давлений; L_p - длина участка между точками отбора давления; d_e - эквивалентный гидравлический диаметр прямого канала проточной части; W_T - скорость воздуха в не загроможденном канале; λ_{mp} - коэффициент сопротивления трения; ζ_M - коэффициент местных сопротивлений канала.

По значениям ΔP определялись числа Эйлера отнесенные к одному поперечному ряду пакета ($z_2 = 1$).

$$Eu_0 = \frac{\Delta P}{\rho \cdot W^2 \cdot z_2} \quad (3)$$

Результаты экспериментов описывались зависимостями вида $\lg(Eu_0) = f(\lg(Re_e))$, где числа Рейнольдса рассчитывались по эквивалентному диаметру d_e . Расчетная скорость потока, входящая в выражения чисел Eu и Re определялась в поперечном проходном сечении пакета.

Принятая методика измерений аэродинамического сопротивления и измерительная аппаратура позволяет определять числа Эйлера с точностью не хуже $\pm 7-10\%$.

2. Теплообмен пакетов труб

Исследования среднего теплообмена глубинных рядов пучков труб с конфузorno подогнутыми ребрами выполнялись в интервале чисел Рейнольдса $Re = 5 \cdot 10^3 ... 6 \cdot 10^4$. Экспериментальные данные, представленные на рис. 3, 4 аппроксимировались степенными зависимостями вида (4).

$$Nu_{np} = C_q \cdot Re^m. \quad (4)$$

В таблице 2 приведены значения опытных постоянных – показателя степени при числе Рейнольдса m и коэффициента C_q выражения (4) для двух пар исследованных пучков, отличающихся шаговыми характеристиками труб S_1/S_2 и степенью подгибки ребер l_n/h при постоянном угле подгибки $\gamma = 20^\circ$.

На рис. 3, 4 нанесены также в виде сплошных линий зависимости для теплоотдачи соответствующих пакетов с обычными не подогнутыми ребрами, определенные по формулам [4, 5], которые использовались как базовые данные для оценки эффекта интенсификации теплообмена.

Анализ результатов показал, что интенсификация теплообмена вследствие конфузорной подгибки ребер имеет место для всех рассмотренных пучков, а ее уровень, определяемый отношением чисел Нуссельта для исследуемого и базового пакетов Nu/Nu_B при $Re = const$, зависит от шаговых характеристик пучка и в незначительной степени от параметра подгибки ребра l_n/h составляет 20 - 27%. Интенсивность теплообмена для пучка № 3 с $S_1/S_2 = 2.1$ на 10-12% выше чем для пучка № 4 $S_1/S_2 = 1.163$.

Увеличение степени подгибки ребер l_n/h не привело к существенному увеличению интенсивности теплообмена. Ее увеличение наблюдалось только в пучке № 3 и составило 4-5% (рис.3), что согласуется с полученными результатами в [1].

Анализ и сравнение полученных результатов показал, что относительное увеличение интенсивности теплообмена за счет применения конфузорной подгибки ребер для пучков с большими и малыми S_1/S_2 практически одинаковое и составляет 20-27%, что не совсем согласуется с результатами, полученными в [1]. Максимальный прирост интенсивности для стальных труб с конфузорной подгибкой достигается при значениях $S_1/S_2 = 2-2.5$ и составляет 45-60%, а при малых $S_1/S_2 < 1.5$ не превышает 15-17%.

По видимому, такой результат связан с еще одним влияющим на интенсивность параметром – консольность ребра, которая представляет собой отношение шага ребер к высоте ребра h/t . Для стальных труб этот параметр составляет 1.88, а для биметаллических – 4.35. Увеличение консольности ребра, судя по результатам, нивелирует зависимость интенсивности теплообмена от параметра размещения труб S_1/S_2 .

Приведенный коэффициент теплоотдачи при поперечном обтекании исследованных пучков биметаллических труб с конфузорной подгибкой накатанных поперечных алюминиевых ребер, отнесенный к полной внешней поверхности оребренной трубы с учетом зависимости (4), вычисляется по формуле

$$\alpha_{np} = 1.13 \cdot C_z \cdot C_q \cdot \frac{\lambda_c}{d} \cdot Re_d^m \cdot Pr^{0.33} \quad (5)$$

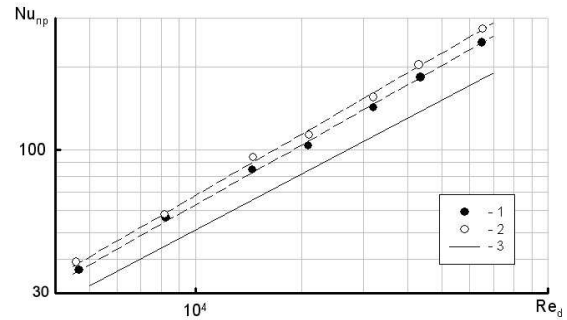


Рис.3 Теплообмен пучков №1, 3 с конфузорной подгибкой ребер (табл.2)

1 – $l_n/h = 0.75$; 2 – $l_n/h = 0.5$; 3 – расчет по [4, 5], прямые ребра

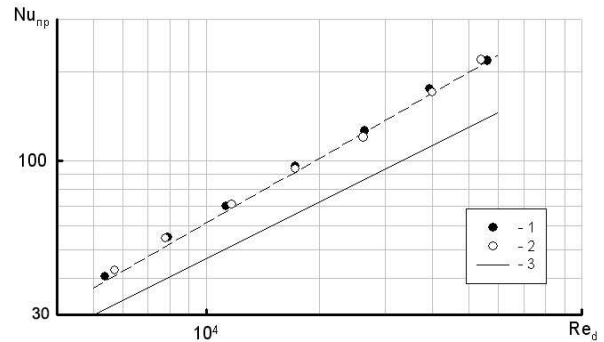


Рис. 4 Теплообмен пучков №2, 4 с конфузорной подгибкой ребер (табл.2)

1 – $l_n/h = 0.75$; 2 – $l_n/h = 0.5$; 3 – расчет по [4, 5], прямые ребра

Постоянные m , Cq определяются по таблице 2. Коэффициент C_z , учитывающий влияние на теплоотдачу числа поперечных рядов труб в пучке z_2 , для шахматных пучков, имеющих $S_1/S_2 > 2$ и $z_2 < 8$ определяется из выражения [1,4,5]

$$C_z = 3.5z_2^{0.03} - 2.72, \quad (6)$$

для шахматных пучков при $S_1/S_2 < 2$ и $z_2 < 8$ из выражения

$$C_z = 3.15z_2^{0.05} - 2.50, \quad (7)$$

при $z_2 \geq 8$ $C_z = 1.0$

3. Аэродинамическое сопротивление пучков труб

Результаты исследования аэродинамического сопротивления пакетов биметаллических труб с конфузрной подгибкой ребер показаны на рис. 5, 6. Из рисунков следует, что в интервале чисел Рейнольдса $Re_e = 2 \cdot 10^3 \dots 2 \cdot 10^4$, в котором проводились исследования, опытные данные хорошо аппроксимируются степенными зависимостями вида (8). В таблице 2 приведены значения опытных постоянных n и C_S выражения (8) для исследованных пучков. На рис. 5, 6 нанесены также в виде сплошных линий зависимости для аэродинамического сопротивления пакетов труб с не подогнутыми ребрами, определенные по формулам [1, 4, 5] и служащие в качестве базовых данных для оценки изменения сопротивления вследствие конфузрной подгибки ребер.

$$Eu_0 = C_S \cdot Re_e^{-n} \quad (8)$$

Анализ результатов показал, что конфузрная подгибка ребер приводит к заметному росту аэродинамического сопротивления по сравнению с сопротивлениями базовых пакетов при рассмотренных вариантах шаговых характеристик и значения угла $\gamma = 20^\circ$. Приращение сопротивления можно охарактеризовать отношением чисел Эйлера для исследованного и базового пакетов Eu_0 / Eu_B при $Re_e = const$.

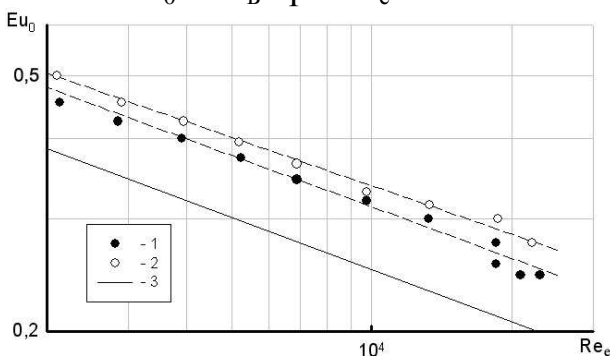


Рис. 5 Аэродинамического сопротивления пучков №1, 3 труб с конфузрной подгибкой ребер (табл.2)
1 – $l_n/h = 0.75$; 2 – $l_n/h = 0.5$; 3 – расчет по [4, 5], прямые ребра

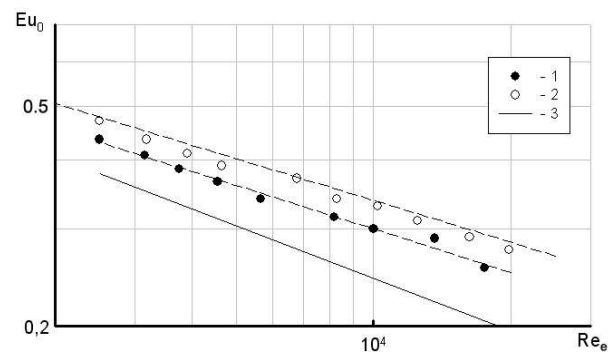


Рис. 6 Аэродинамического сопротивления пучков №2, 4 труб с конфузрной подгибкой ребер (табл.2)
1 – $l_n/h = 0.75$; 2 – $l_n/h = 0.5$; 3 – расчет по [4, 5], прямые ребра

Значения аэродинамического сопротивления для двух размещений с $S_1/S_2 = 2.1$ и $S_1/S_2 = 1.163$ практически совпадают при степени подгибки $l_n/h = 0.5$. Приращение сопротивления составляет для степени подгибки $l_n/h = 0.5$ 33-35%, а для $l_n/h = 0.75$ пучка №1 – 23-25%, пучка №3 – 18-20%. Увеличение степени

подгибки алюминиевого ребра приводит к возрастанию аэродинамического сопротивления на 8-10% для пучка с $S_1/S_2 = 2.1$ и на 10-11% для пучка $S_1/S_2 = 1.163$.

Придание течению в межреберных промежутках конфузорного характера является одной из причин роста аэродинамического сопротивления пучков труб при подгибке ребер. Другая причина заключается в том, что подгибка ребер вообще, в том числе при $\gamma = 0^\circ$ [3,], приводит к трансформации полуоткрытых межреберных промежутков в узкие закрытые искривленные каналы клиновидного поперечного сечения, движение среды по которым связано со значительными потерями энергии, в частности, вследствие того, что поток испытывает тормозящее воздействие стенок по всему периметру его поперечного сечения (рис.7).

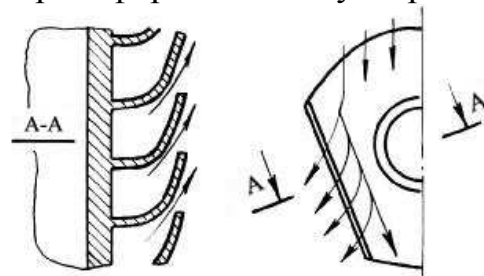


Рис.7 Вдув потока в межтрубное пространство через щели стенок конфузора [1]

Аэродинамическое сопротивление при поперечном обтекании исследованных пучков биметаллических труб с конфузорной подгибкой накатанных поперечных алюминиевых ребер с учетом зависимости (8), вычисляется по формулам

$$\Delta P = k_c \cdot Eu_0 \cdot \rho_e \cdot W_z^2 \cdot z_2 \quad (9)$$

$$Eu_0 = C'_z \cdot C_s \cdot Re_e^{-n}, \quad (10)$$

$k_c = 1.1$ - поправочный коэффициент, учитывающий реальные условия эксплуатации теплообменной поверхности [4, 5].

C'_z - поправочный коэффициент на малорядность шахматного пучка при $z_2 < 6$

$$C'_z = \exp \left[0.1 \cdot \left(\frac{6}{z_2} - 1 \right) \right], \quad (11)$$

при $z_2 \geq 6$ $C'_z = 1$ [1, 4, 5].

Выводы

Исследования теплообмена и аэродинамического сопротивления в пакетах из биметаллических труб с конфузорной подгибкой ребер показали, что увеличение подгибки слабо влияет на увеличение интенсивности теплоотдачи при этом рост сопротивления достигает 8-11%. Конфузорная подгибка позволяет интенсифицировать теплообмен в исследуемых пакетах на 20-27% при возрастании потерь давления на 33-35%. Большая консольность ребра выровняла интенсивность теплообмена при малых и больших значениях параметра размещения S_1/S_2 . Применение труб с конфузорной подгибкой ребер дает возможность не менее, чем на 15-20% снизить металлоемкость и габариты теплообменного оборудования.

Список литературы: 1. Письменный Е.Н. Теплообмен и аэродинамика пакетов поперечно-ребренных труб [Текст]/ Е.Н. Письменный. – Киев: Альтерпрес, 2004. – 244 с. 2. Фомина В.Н. Экспериментальное исследование новой поверхности нагрева из труб со спиральными подогнутыми ребрами [Текст]/ В.Н. Фомина, Т.В. Абрамова, Е.Я. Титова // Теплоэнергетика. – 1990. – № 9. – С. 53-56. 3. Письменный Е.Н. Конвективный теплообмен пакетов труб с параллельной подгибкой поперечных ребер [Текст]/ Е.Н. Письменный, А.М. Терех, А.И.

Руденко // Промышленная теплотехника. – 2010. – Т.32. – С. 31-41. 4. РТМ 108.030.140-87. Расчет и рекомендации по проектированию поперечно-ребренных конвективных поверхностей нагрева стационарных котлов [Текст]. – Л.: Минэнергомаш, 1988. – 30 с. 5. Письменный Е.Н. Расчет конвективных поперечно-ребренных поверхностей нагрева [Текст]/Е.Н. Письменный. – Киев: Альтерпрес. – 2003. – 184 с.

Поступила в редколлегию 23.02.2011

УДК 629.7.036(075.8)

І.Ф. КІНАЩУК, канд. техн. наук, ст. наук. співр., НАУ, м. Київ

УЗГОДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ГАЗОГЕНЕРАТОРА І ТУРБОВЕНТИЛЯТОРНОЇ ПРИСТАВКИ ТРДД

У статті розглянуто особливості розрахунку ТРДД з заднім розташуванням вентиляторної приставки. Розглянуто узгодження параметрів газогенератора і турбовентиляторної приставки, засноване на розподілі вільної енергії між контурами, що забезпечує оптимальне співвідношення швидкостей на виході з сопла першого і другого контурів.

Ключові слова: турбовентиляторна приставка, турбіна, газогенератор

В статье рассмотрены особенности расчета ТРДД с задним расположением вентиляторной приставки. Рассмотрено согласование параметров газогенератора и турбовентиляторной приставки, основанное на распределении свободной энергии между контурами, обеспечивающее оптимальное соотношение скоростей на выходе из сопел первого и второго контуров.

Ключевые слова: вентилятор турбовентиляторная приставка, турбина, газогенератор

The article describes the features of calculation turbojet with rear fan attachment. We consider the harmonization of the gas generator and the turbofan-top boxes, based on the distribution of free energy between the circuits, providing optimal speed ratio at the exit of the nozzles first and second circuits.

Key word: fan, turbofan-top boxes, turbine, gas generator

1. Вступ

Основні шляхи вдосконалення двоконтурних турбореактивних двигунів спрямовані на збільшення економічності, підвищення питомої тяги, і як наслідок, зниження питомої маси.

Ці завдання вирішуються шляхом вибору оптимальних параметрів двигуна і конфігурації проточної частини з умов задоволення вимогам до силової установки у всьому діапазоні режимів польоту і з умов задоволення вимогам, що пред'являються до літальному апарату.

Мета цієї роботи - дослідження можливостей поліпшення параметрів двоконтурного двигуна з вентиляторної приставкою за рахунок оптимізації геометрії вентиляторної приставки.

Турбовентиляторна приставка складається з двох елементів: внутрішньої частини, працюючої в турбінному режимі, і зовнішньої частини, що працює в режимі гвинтовентилятора. Газовий потік, що виходить з турбіни низького тиску газогенератора, є робочим тілом для турбіни турбовентиляторної приставки. Потужність, що розвивається турбіною вентиляторної приставки, практично без втрат передається в зовнішній контур для підвищення ефективності енергії повітря, що проходить через зовнішній контур.