

УДК 536.24:533.6.011

Письменный Е.Н., Терех А.М., Руденко А.И.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН ШАХМАТНЫХ ПАКЕТОВ ТРУБ С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ПОДГИБКОЙ ПОПЕРЕЧНЫХ РЕБЕР

Приведено результати експериментального дослідження конвективного теплообміну шахматних пакетів труб з паралельним підгинанням поперечних ребер, виявлено причини і механізм інтенсифікації теплообміну в таких трубах. Показано вплив на інтенсивність теплообміну параметрів розміщення труб в пакеті і ступені підгинання ребер.

Приведены результаты экспериментального исследования конвективного теплообмена шахматных пакетов труб с параллельной подгибкой поперечных ребер, выявлены причины и механизм интенсификации теплообмена в таких трубах. Показано влияние на интенсивность теплообмена параметров размещения труб в пакете и степени подгибки ребер.

Results of experimental studies of convective heat transfer staggered tubes bundles with parallel overcast of transverse fins are executed, the causes and mechanism of heat transfer intensification in such tubes are identified. Shown the effect on the heat transfer tubes placement options in bundles and the overcast degree of fins.

d – диаметр несущей трубы;
 h – высота ребра;
 H – поверхность калориметра;
 l – степень подгибки;
 Q – рассеиваемая мощность;
 S – шаг между трубами;
 t – шаг ребер, температура;
 α – коэффициент теплоотдачи;
 δ – толщина ребра;
 ψ – коэффициент оребрения;
 σ – относительный шаг труб.

Безразмерные комплексы:

Nu – число Нуссельта;
 Re – число Рейнольдса;
 S_1/S_2 – параметр размещения труб.

Нижние индексы:

B – базовый;
 k – конвективный;
 n – набегающий;
 p – поток;
 c – среднеповерхностный;
 1 – поперечный;
 2 – продольный.

Введение

На сегодняшний день одной из важных задач энергомашиностроения является снижение габаритов и металлоемкости теплообменных аппаратов различного назначения. Широкое использование поперечно-оребранных 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 су-

щественного изменения технологии их изготовления. Кроме этого, важным требованием остается ремонтпригодность поверхностей без демонтажа больших узлов и модулей.

Для уменьшения поперечных шагов труб в пакетах и увеличения компактности теплообменных устройств на 12...15% в работе [1] предложена идея параллельной подгибки поперечных ребер. Предварительно проведенные исследования тепловых характеристик такого типа поверхности показали, что параллельная подгибка ребер приводит также к интенсифика-

ции теплообмена. В этой связи в НТУУ «КПИ» проведены комплексные исследования теплоаэродинамических характеристик шахматных пакетов труб с параллельной подгибкой ребер для выявления механизмов и факторов, влияющих на интенсивность теплообмена в них.

1. Методика исследований

Исследования теплообмена поперечно-омываемых шахматных пакетов труб с параллельно подогнутыми ребрами проводились с использованием стендового оборудования и методики, подробно описанной в работе [2]. К наиболее важным особенностям использованной методики относится: полное тепловое моделирование, осуществлявшееся за счет элект-

трообогрева всех труб пучка; определение в процессе экспериментов среднеповерхностных конвективных коэффициентов теплоотдачи путем измерения температурного поля поверхности ребра и несущей трубы.

1.1 Геометрические характеристики оребренных труб и трубных пакетов

В экспериментах использовались натурные стальные трубы с приварным спирально-ленточным оребрением, геометрические характеристики которых представлены в табл. 1. Исследования проведены для труб (рис. 1), имевших три степени подгибки ребер, а также, как базовый вариант – трубы с прямыми (не подогнутыми) ребрами (табл. 2).

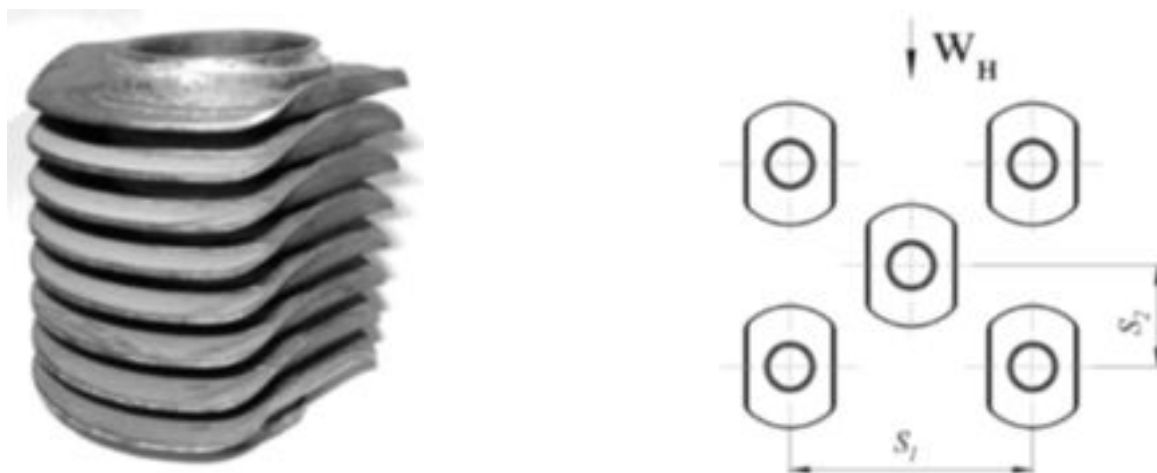


Рис. 1. Труба с параллельно подогнутым спирально-ленточным оребрением.

Табл. 1. Геометрические характеристики оребренных труб

Диаметр несущей трубы d , мм	Высота ребра h , мм	Шаг ребер t , мм	Толщина ребра δ , мм	Коэффициент оребрения ψ
42,0	14,5	8,0	1,2	5,98

Табл. 2. Серии труб в зависимости от степени подгибки ребер

Номер серии труб	0	1	2	3
степень подгибки l , мм	подгибка отсутствует	57	60	63

Трубы-калориметры, предназначенные для измерения температурного поля ребра и стенки несущей трубы имели более сложную конструкцию по сравнению с остальными трубами, из которых набирались пакеты. Они состояли из двух отдельных частей, соединявшихся между собой с помощью резьбы. Таким образом осуществлялся доступ к поверхности среднего по высоте трубы ребра, в которое, как и в стенку несущей трубы у его основания, зачеканивалось 18 медь-константановых термопар диаметром проводов 0,1 мм (рис. 2). Монтаж термопар осуществлялся на предварительно подогнутых, в специально изготовленном устройстве – «фильере», ребрах. 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 пропускаться через «фильеру» для подгибки оставшихся не подогнутыми ребер.

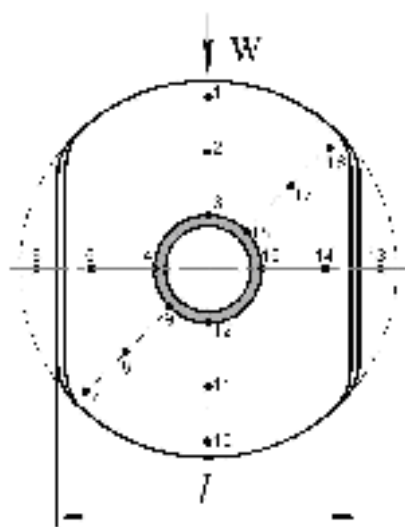


Рис. 2. Схема расположения термопар на ребре: 1-18 номера термопар.

Геометрические характеристики исследованных пакетов представлены в табл. 3. Эксперименты проводились с 21 шахматным пакетом труб. В соответствии с таблицами 2,3 пакеты характеризуются номером серии и номером размещения. Например, пакет серии 1 с размещением 3 обозначается «13». Плоскости отогнутых частей ребер ориентировались строго вдоль направления набегающего на пакет потока.

1.2 Методика измерений и обработки опытных данных

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

Трубы-калориметры устанавливались в пяти рядах семирядных пакетов. Конвективные коэффициенты теплоотдачи определялись непосредственно по результатам измерений температуры ребра и стенки несущей трубы калориметра по формуле

$$\alpha_k = \frac{Q}{H \cdot (\bar{t}_c - \bar{t}_n)}, \quad (1)$$

где \bar{t}_c – среднеповерхностная 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 [3].

Табл. 3. Геометрические характеристики пакетов труб и постоянные m , C_q в формуле (2)

Номер размещения	S_1 мм	S_2 мм	S_1/S_2	m	C_q
Серия 0					
1	135,0	54,0	2,50	0,703	0,1142
2	135,0	75,0	1,80	0,650	0,1987
3	135,0	85,0	1,59	0,636	0,2178
4	86,0	85,0	1,01	0,694	0,1056
5	86,0	75,0	1,15	0,668	0,1475
Серия 1					
1	135,0	54,0	2,50	0,731	0,0932
2	135,0	75,0	1,80	0,618	0,2902
3	135,0	85,0	1,59	0,621	0,2652
4	86,0	85,0	1,01	0,698	0,1095
5	86,0	75,0	1,15	0,671	0,1466
Серия 2					
1	135,0	54,0	2,50	0,685	0,1513
2	135,0	75,0	1,80	0,725	0,1031
3	135,0	85,0	1,59	0,665	0,1653
4	86,0	85,0	1,01	0,687	0,1187
5	86,0	75,0	1,15	0,681	0,1401
6	135,0	65,0	2,08	0,735	0,0969
Серия 3					
1	135,0	54,0	2,50	0,722	0,1042
2	135,0	75,0	1,80	0,637	0,2368
3	135,0	85,0	1,59	0,667	0,1696
4	86,0	85,0	1,01	0,664	0,1400
5	86,0	75,0	1,15	0,683	0,1253

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 возду-

ха 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 не хуже $\pm 4...5\%$, числа Рейнольдса – $\pm 5...6\%$.

2. Результаты исследований теплообмена

Исследование теплообмена глубинных рядов пакетов оребренных труб выполнялись в интервале чисел Рейнольдса $Re_d = 4 \cdot 10^3 \dots 6 \cdot 10^4$. Результаты экспериментов представлены на рис. 3, из которых видно, что опытные данные хорошо аппроксимируются зависимостями вида

$$Nu = C_q \cdot Re_d^m. \quad (2)$$

В табл. 3 приведены значения опытных постоянных m и C_q выражения (2) для всех исследованных пакетов. На рис. 3-5 нанесены также в виде сплошных линий расчетные зави-

симости для теплоотдачи пакетов с прямыми не подогнутыми ребрами, определенные по формулам [3]. Сопоставление этих зависимостей с соответствующими экспериментальными точками показывает, что максимальное расхождение между ними не превышает 7 %. Анализ данных, приведенных на рис. 3-5 также свидетельствует, что уклоны зависимостей $\lg Nu = f(\lg Re_d)$ практически совпадают с уклонами соответствующих зависимостей для аналогичных по геометрии пакетов труб с прямыми ребрами. Таким образом расчетные кривые и экспериментальные результаты для пакетов труб с прямыми ребрами могут использоваться как базовые для оценки эффекта интенсификации теплообмена вследствие подгибки ребер.

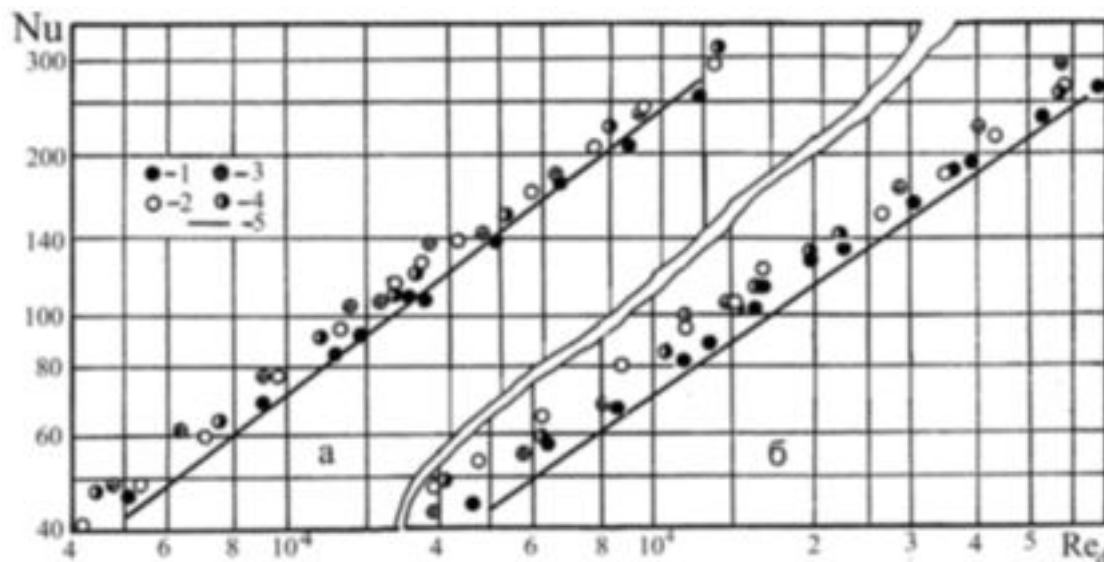


Рис. 3. Результаты исследования теплоотдачи в глубинных рядах пакетов труб:

а – $S_1 = 135$ мм, $S_2 = 54$ мм, б – $S_1 = 135$ мм, $S_2 = 75$ мм.

1 – без подгибки; 2 – $l = 57$ мм; 3 – $l = 60$ мм; 4 – $l = 63$ мм; 5 – расчет по [3].

Эксперименты, выполненные с пакетами из труб с подогнутыми ребрами показали, что эффект интенсификации теплообмена, вызванный подгибкой, в значительной мере зависит от шаговых характеристик пакетов и наиболее заметен в пакетах с большими поперечными шагами. Эта закономерность может быть объяснена особенностями омывания труб и характером распределения коэффициентов те-

плоотдачи на поверхности ребра.

Исследования закономерностей течения в пакетах оребренных труб с использованием метода поверхностной визуализации потока [2] показали, что характер омывания труб пакета во многом определяется параметрами их размещения (рис. 6 а, б). В частности, шаговые характеристики в большой степени определяют размеры кормовой вихревой зоны ребри-

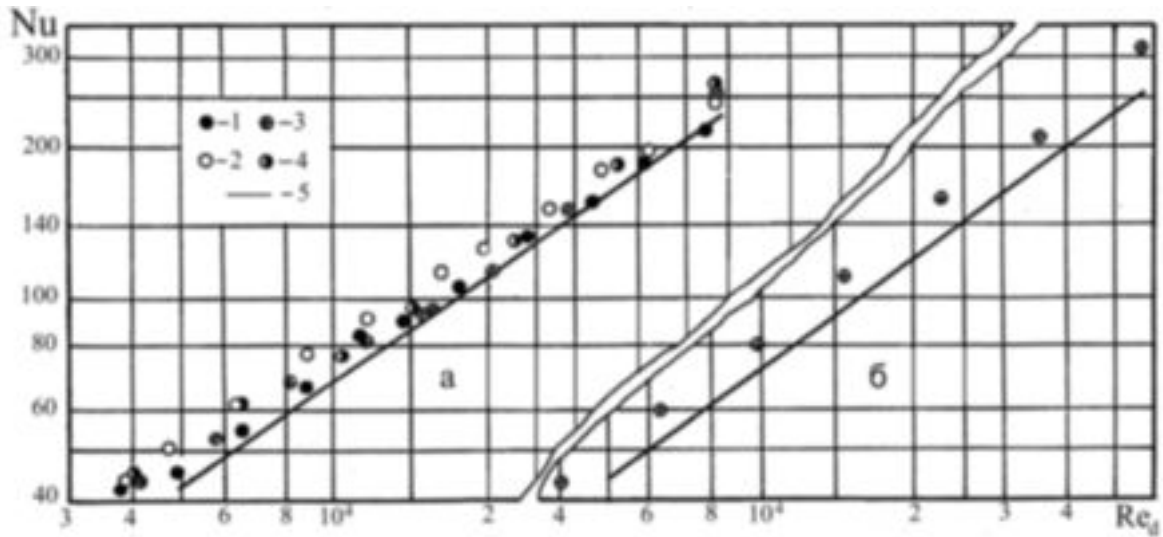


Рис. 4. Результаты исследования теплоотдачи в глубинных рядах пакетов труб:

а – $S_1 = 135$ мм, $S_2 = 85$ мм, **б** – $S_1 = 135$ мм, $S_2 = 65$ мм.

1 – без подгибки; **2** – $l = 57$ мм; **3** – $l = 60$ мм; **4** – $l = 63$ мм; **5** – расчет по [3].

стой трубы, т.е. области, в которой поверхность ребристой трубы взаимодействует с ближним следом, образующимся за цилиндром, несущим оребрение. Ближний след характеризуется высоким уровнем завихренности, рециркуляционным движением и низким уровнем локальных

скоростей теплоносителя, что в целом приводит к низкому уровню теплоотдачи в кормовой зоне. Уровень теплоотдачи в угловой области от $\sim 130^\circ$ до 180° , соответствующей положению кормовой вихревой зоны, примерно в 2...3 раза ниже, чем на передней полуокружности ребра [2].

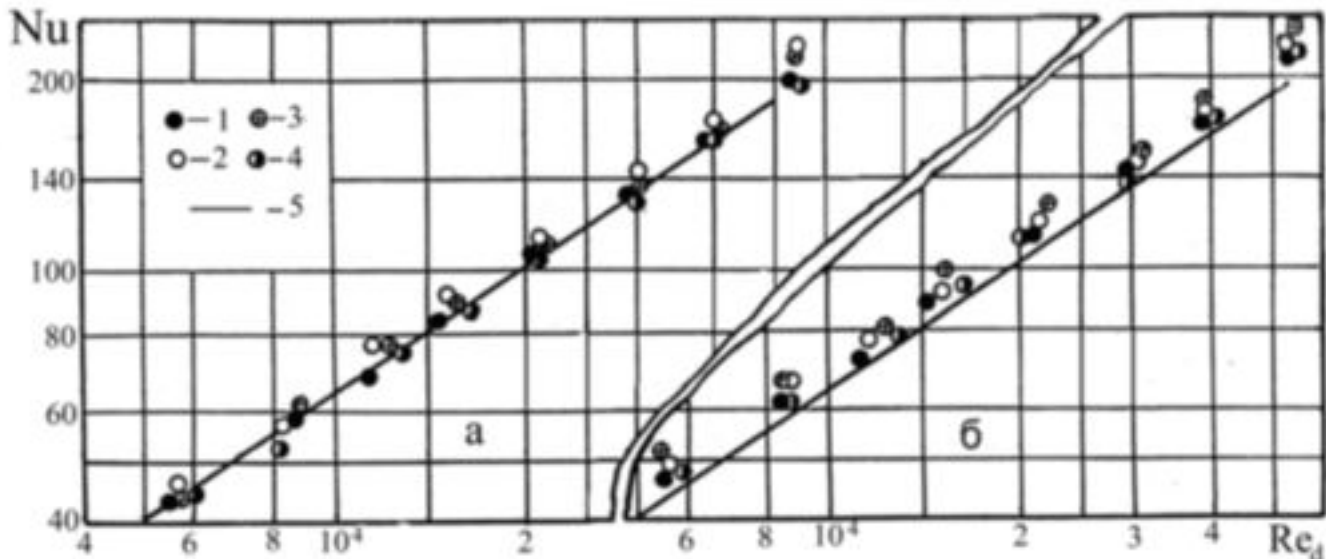


Рис. 5. Результаты исследования теплоотдачи в глубинных рядах пакетов труб:

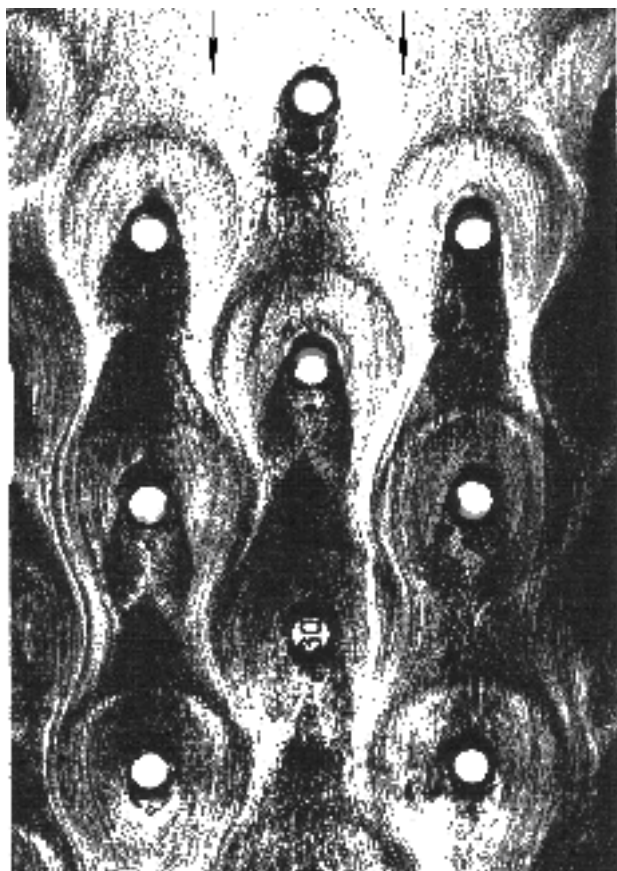
а – $S_1 = 86$ мм, $S_2 = 85$ мм, **б** – $S_1 = 86$ мм, $S_2 = 75$ мм.

1 – без подгибки; **2** – $l = 57$ мм; **3** – $l = 60$ мм; **4** – $l = 63$ мм; **5** – расчет по [3].

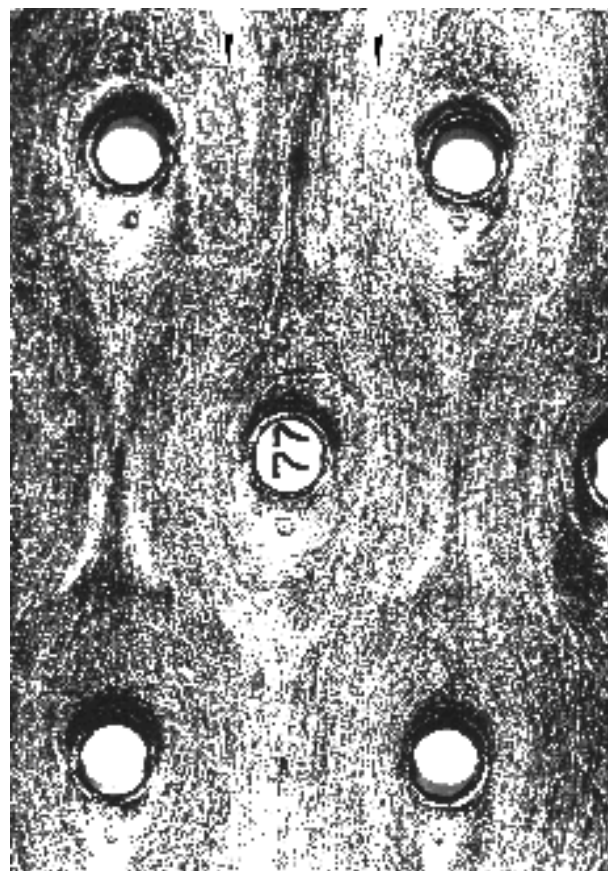
Размеры кормовой вихревой зоны достигают наибольших значений в так называемых «широких» пакетах, характеризующихся большими значениями относительного шага труб $\sigma_1 = \frac{S_1}{d}$. В таких пакетах соседние трубы оказывают слабое поджимающее воздействие на поток в межреберных каналах и он, оттесняясь по мере нарастания толщины пограничного слоя на ребре в стороны от оси набегающего потока, образует широкую кормовую зону (рис. 6, а, рис. 7, а).

Если подогнуть кромки ребер, то отогнутые части ребер будут поджимать поток в кормовой части ребристой трубы и направлять высокоинтенсивные вторичные течения, генериру-

ющиеся в лобовой прикорневой части ребер [6] и обуславливающие пики теплоотдачи на боковых границах кормовой зоны, глубже в область за несущим цилиндром, отличающуюся, как отмечалось выше, относительно слабым рециркуляционным движением теплоносителя и низкой теплоотдачей. В итоге размеры кормовой вихревой зоны сокращаются, что хорошо видно из сопоставления рис. 7, а и рис. 7, б, полученных путем визуализации течения на не подогнутом и подогнутом ребрах одинаковых размеров при одинаковых режимных условиях. Вследствие сокращения размеров области, характеризующейся низкой теплоотдачей, теплоотдача ребристой трубы в целом возрастает.



а)



б)

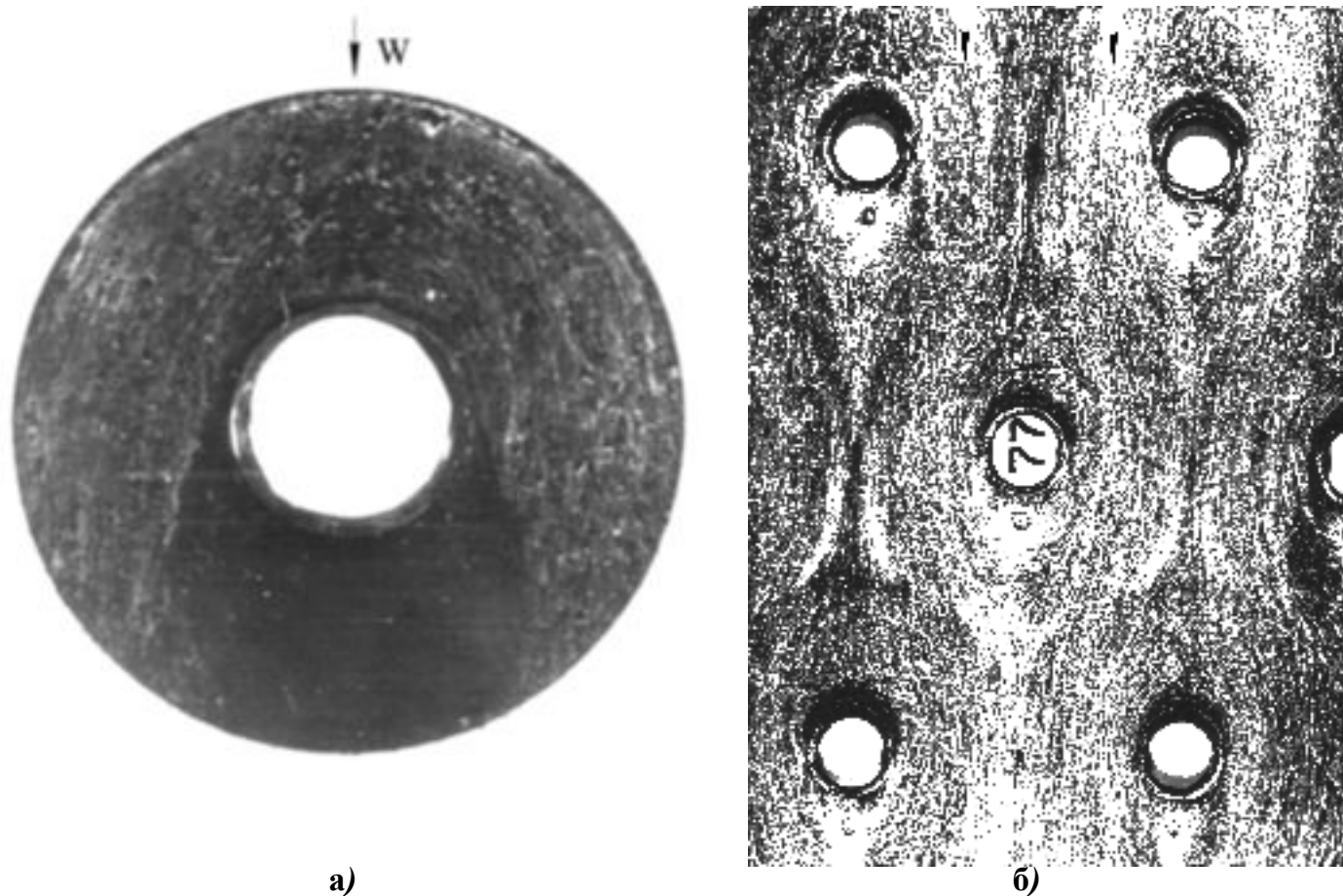
Рис. 6. Визуализация течения в шахматных пакетах оребренных труб:

а – $S_1 = 135$ мм, $S_2 = 54$ мм; б – $S_1 = 86$ мм, $S_2 = 75$ мм.

В пучках с малыми относительными поперечными шагами труб σ_1 близко расположенные друг к другу трубы соседних поперечных рядов выполняют ту же роль, что и отогнутые части ребер в «широких» пакетах: они поджимают поток в кормовой области, размеры кормовой вихревой зоны при этом относительно невелики (рис. 5, рис. 6, б), и подгибка ребер уже не может оказать влияние на ее размеры, а значит практически не влечет за собой интенсификацию теплообмена.

Сказанное хорошо коррелируется с тем, что во всех исследованных пучках с малым поперечным шагом $S_1 = 86$ мм при всех трех степенях подгибки не обнаружено повышение теплоотдачи по сравнению с базовыми пакетами труб с прямыми ребрами (рис. 5). В то же время во всех «широких» пакетах с шагом

$S_1 = 135$ мм было отмечено повышение теплоотдачи по сравнению с базовыми пакетами (рис. 3, 4), причем максимальное повышение при значении числа Рейнольдса $Re_d = 13000$ имеет место в пакетах с шагами $S_1 = 135$ мм, $S_2 = 65$ мм. Для выявления оптимального по теплоотдаче значения продольного шага S_2 при фиксированном значении $S_1 = 135$ мм проведен анализ зависимости чисел Нуссельта от величины S_2 (рис. 8). Это довольно пологая кривая имеет максимум, лежащий при $Re_d = 13000$ в области $S_2 \approx 64...66$ мм. Следует также отметить, что значения S_2 , соответствующие максимумам зависимостей $Nu = f(S_2)$, для пакетов труб с подогнутыми и прямыми ребрами практически совпадают.



**Рис. 7. Визуализация течения на поверхности ребра трубы $Re = 10000$:
а – неподогнутое ребро; б – подогнутое ребро.**

Если принять во внимание выводы работ [6, 7] о том, что основным обобщающим параметром, учитывающим влияние на процессы гидродинамики и теплообмена в пакетах их шаговых характеристик, является отношение шагов S_1/S_2 , то можно, используя полученные опытные данные, найти значения S_1/S_2 , соответствующее максимальному эффекту от подгибки ребер и максимуму теплоотдачи пакетов с подогнутыми ребрами. Такой анализ сделан на рис. 9, 10. Кривые, изображенные на

этих рисунках также имеют экстремумы. При $Re_d = 13000$ максимумы соответствуют значению $S_1/S_2 \approx 2,1 \dots 2,2$, что близко к значению координаты максимума теплоотдачи для пакетов труб с не подогнутыми ребрами. Таким образом, можно с достаточной степенью уверенности утверждать, пакеты с конфигурацией, соответствующей отмеченному выше значению параметра S_1/S_2 , обеспечивают максимальную интенсификацию теплообмена, которая составляет примерно 14...16 %.

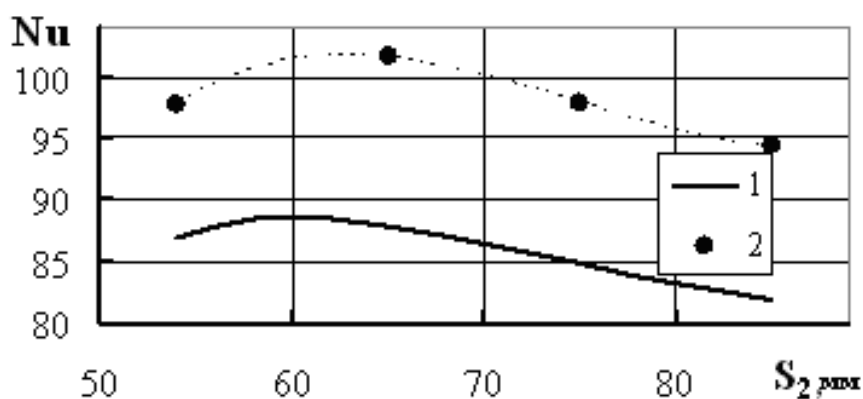


Рис. 8. Влияние продольного шага на теплообмен в пакетах труб при $Re = 13000$:
1 – расчет по [3], прямые ребра; 2 – эксперимент, подогнутые ребра.

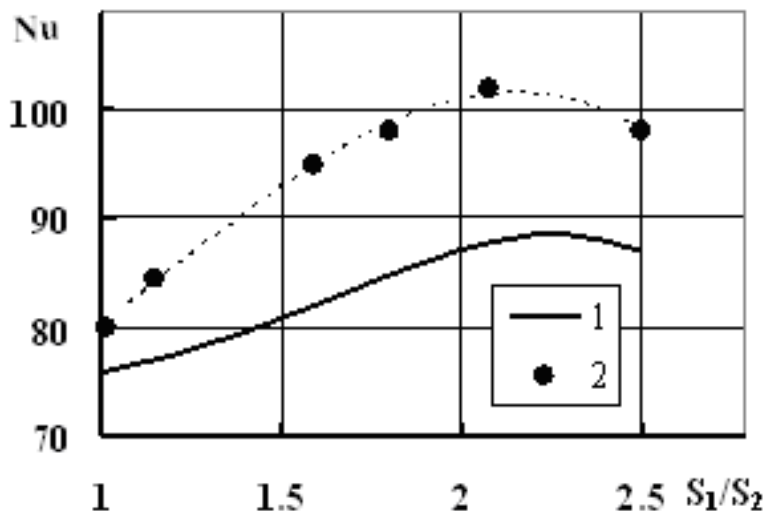


Рис. 9. Влияние параметра S_1/S_2 на теплообмен в пучках труб при $Re = 13000$:
1 – расчет по [3], прямые ребра; 2 – эксперимент, подогнутые ребра.

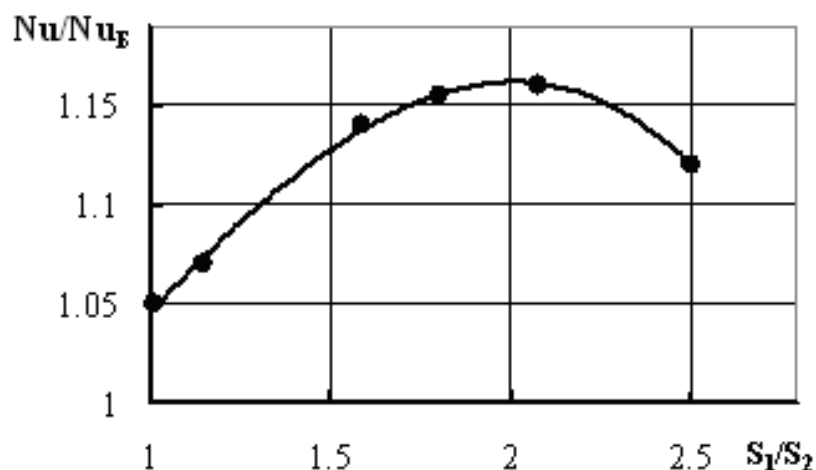


Рис. 10. Влияние параметра S_1/S_2 на отношение Nu/Nu_B для пучков труб при $Re = 13000$.

Влияние степени подгибки ребер l на теплообмен в исследованных пределах оказалось довольно слабым, хотя и можно констатировать некоторый рост интенсивности теплоотдачи (на 3...5 %) по мере увеличения степени подгибки.

Выводы

Проведенные комплексные исследования течения и конвективного теплообмена в пакетах труб с параллельно подогнутым поперечным оребрением позволили выявить причины и факторы вызывающие интенсификацию теплообмена в пакетах таких труб. Установлены значения шаговых характеристик при которых имеет место максимальный эффект интенсификации. Исследования теплообмена в пакетах показали, что увеличение степени подгибки ребер l слабо влияет на теплоотдачу. Интенсификация теплообмена обнаружена только в «широких» пучках и достигает значений 12...16 % в сравнении с пакетами труб с прямыми неподогнутыми ребрами.

Учитывая выявленный эффект интенсификации теплообмена в пакетах труб с параллельно подогнутыми ребрами, а также то, что под-

гибка позволяет сократить поперечные размеры теплообменных аппаратов при сохранении возможности свободного извлечения змеевиков, использование труб с подогнутым спирально-ленточным оребрением целесообразно и может дать заметный экономический эффект.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фомина В.Н., Абрамова Т.В., Титова Е.Я. Экспериментальное исследование новой поверхности нагрева из труб со спиральными подогнутыми ребрами// Теплоэнергетика. – 1990. – №9. – С. 53-56.
2. Письменный Е.Н. Теплообмен и аэродинамика пакетов поперечно-оребрённых труб. Киев: Альтерпрес, 2004. – 244 с.
3. РТМ 108.030.140-87. Расчет и рекомендации по проектированию поперечно-оребрённых конвективных поверхностей нагрева стационарных котлов. Л.: Минэнергомаш, 1988. – 30 с.
4. Касандрова О.Н., Лебедев В.В. Обработка результатов наблюдений. М.: Наука, 1970. – 104 с.
5. Зайдель А.Н. Ошибки измерений физических величин. Л.: Наука, 1974. – 108 с.
6. Письменный Е.Н. Исследование течения

на поверхности ребер поперечно-ребренных труб// Инж. физ. журнал. – 1984. – Т.47. – №1. – С.28-34.

7. *Письменный Е.Н., Терех А.М.* Обобщенный метод расчета конвективного теплообмена

поперечно-омываемых пучков труб с внешним кольцевым и спирально-ленточным ребрением//Теплоэнергетика. – 1993. – №5. – С. 52 – 56.

Получено 17.12.2009 г.