

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕПЛООТДАЧИ И ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПУЧКОВ ТРУБ С ОРЕБРЕНИЕМ РАЗЛИЧНОГО ТИПА

АННОТАЦИЯ

Проведено сравнение теплоотдающей способности и гидравлического сопротивления пучков труб, имеющих продольное и поперечное оребрение различной геометрии. Используя параметр, характеризующий теплоотдачу оребренной поверхности, отнесенную к единице мощности, необходимой на прокачку теплоносителя, определена теплогидравлическая эффективность рассматриваемых поверхностей. При сравнительном анализе поверхностей различного типа определены пучки оребренных труб, обладающие наибольшей теплогидравлической эффективностью.

1. ВВЕДЕНИЕ

Использование в теплообменниках различного назначения развитых поверхностей теплообмена позволяет значительно улучшить их массовые и габаритные показатели по сравнению с теплообменниками, выполненными на гладких поверхностях. Существует большое количество типов оребрения, конструктивные особенности которых помимо развития поверхности теплообмена создают условия для интенсификации теплообмена. К таким условиям можно отнести турбулизацию внешнего течения, срыв пограничного слоя на начальных участках его формирования, образование отрывных зон путем деформации поверхности и др. Комплексный подход, основанный на увеличении площади поверхности и создании гидродинамических условий, способствующих интенсификации процессов теплообмена на обтекаемой поверхности, позволяет существенно повысить тепловую эффективность таких поверхностей. Однако процессы, которые приводят к интенсификации теплопереноса, как правило, сопряжены с увеличением гидравлического сопротивления и повышением мощности, необходимой на прокачку теплоносителя в оребренных каналах. Поэтому наибольший интерес и практическую ценность представляют такие конструкции оребрения, которые обеспечивают высокую степень интенсификации теплообмена и вместе с тем не приводят к существенному росту значения гидравлического сопротивления.

В работе проводится сравнение эффективности тепловых и гидравлических показателей для пучков труб с внешним оребрением различного типа. В частности, исследованные трубные пучки, которые имеют разное геометрическое расположение труб (шахматные пучки и пучки с плотной упаковкой), различаются типом оребрения (с продольным и поперечным оребрением) или имеют различную

геометрическую форму оребрения (непрерывное, перфорированное, разрезное оребрение и т.д.).

2. ТЕПЛООБМЕН, ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ И ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОРЕБРЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

При оценке интенсивности теплообмена на поверхности с оребрением проводят ее сравнение с гладкой поверхностью используя отношение коэффициентов теплоотдачи $\alpha/\alpha_{\text{гл}}$, которое для теплоносителей одного типа и одинакового значения эквивалентного диаметра межтрубного канала может быть представлено в виде $Nu/Nu_{\text{гл}}$, где индекс «гл» обозначает гладкую поверхность. Аналогично, значение гидравлических потерь при обтекании развитой поверхности определяется путем сравнения коэффициентов гидравлического сопротивления $\zeta/\zeta_{\text{гл}}$. Используя эти параметры, можно отдельно оценить тепловую эффективность оребренной поверхности при различном конструктивном ее исполнении, а также определить степень ухудшения ее гидравлических характеристик.

Что касается подбора теплообменной поверхности с оптимальными тепловыми и гидравлическими характеристиками, то решение указанной задачи зависит от конкретных условий, предъявляемых к теплообменному аппарату. Существуют различные методики при выборе критерия, на основании которого можно определить поверхность с оптимальной геометрией [1-3]. Одним из важнейших критериев, характеризующих теплообменник в целом и теплообменную поверхность, которая в нем используется в частности, является показатель, который определяет значение теплового потока, передаваемого через поверхность, отнесенного к единице мощности, требуемой на прокачку теплоносителя, предложенный в работе [1]. Этот параметр по сути позволяет оценить тепловой КПД энергетических затрат для данного теплообменника. Согласно [1] искомый критерий определяется следующим образом:

$$E = Q/N, \quad (1)$$

его в дальнейшем будем называть теплогидравлической эффективностью поверхности, где Q — суммарный тепловой поток, отводимый с поверхности, N — мощность, требуемая на прокачку теплоносителя, омывающего поверхность.

Для оребренных поверхностей значение отводимого теплового потока находится из выражения

$$Q = \alpha_{np} \Delta T F_n, \quad (2)$$

где $\Delta T = T_n - T_m$ — температурный напор на поверхности обтекания, T_n, T_m — усредненные температуры несущей поверхности и внешнего теплоносителя, F_n — площадь обтекаемой поверхности,

$\alpha_{np} = \alpha_\kappa \left(\frac{F_n}{F_n} + \eta \frac{F_p}{F_n} \right)$ — приведенный коэффициент теплоотдачи, α_κ — усредненный по поверхности конвективный коэффициент теплоотдачи, F_n, F_p — соответственно площадь неоребренной поверхности и площадь оребрения, η — тепловая эффективность ребер [4,5].

Для течений в каналах мощность N , требуемая на прокачку теплоносителя, равна

$$N = \Delta p G / \rho, \quad (3)$$

где Δp — перепад давлений на входе и выходе из канала, G, ρ — расход и плотность теплоносителя.

С учетом зависимостей $\Delta p = \zeta \frac{L}{d_{экр}} \frac{\rho V_{жс}^2}{2}$ и

$G / \rho = F_{сеч} V_{жс}$ соотношение (3) преобразуется к виду

$$N = \zeta \frac{L F_{сеч} \rho V_{жс}^3}{d_{экр}^2}, \quad (4)$$

где ζ — коэффициент гидравлического сопротивления в канале, L — длина канала, $d_{экр}, F_{сеч}$ — соответственно эквивалентный диаметр и площадь поперечного сечения канала, $V_{жс}$ — характерная скорость течения. Величины $d_{экр}, F_{сеч}, V_{жс}$ обычно определяют для узкого сечения канала. С учетом (2),(4) соотношение (1) приобретает вид

$$E = \frac{2\alpha_\kappa \left(\frac{F_n}{F_n} + \eta \frac{F_p}{F_n} \right) \Delta T F_n d_{экр}}{\zeta \rho V_{жс}^3 F_{сеч} L}. \quad (5)$$

Применительно к гладкой поверхности с учетом равенства $\alpha_{np} = \alpha_\kappa$ выражение (5) сводится к следующему:

$$E_{глад} = \frac{2\alpha_{\kappa,глад} \Delta T F_{n,глад} d_{экр,глад}}{\zeta_{глад} \rho V_{жс}^3 F_{сеч,глад} L}. \quad (6)$$

Сопоставление оребренных поверхностей по теплогидравлической эффективности E следует проводить при равенстве следующих динамических, геометрических и теплофизических параметров: $\rho, Re, \Delta T, V_{жс}, d_{экр}, L, F_{сеч} = idem$. Чтобы оценить эффективность развитой поверхности по сравнению с гладкой поверхностью, представляется целесообразным вместо величины E использовать относительный параметр $\bar{E} = E / E_{глад}$, который, принимая во внимание соотношения (5),(6), определяется выражением

$$\bar{E} = \frac{\alpha_\kappa / \alpha_{\kappa,глад} \left(\frac{F_n}{F_n} + \eta \frac{F_p}{F_n} \right) F_n / F_{глад}}{\zeta / \zeta_{глад}}. \quad (6a)$$

При вычислении отношения $F_n / F_{глад}$ необходимо проводить сравнение поверхностей при одинаковой длине оребренного и гладкого участков поверхности, например, на участке канала длиной в 1 погонный метр. Относительный параметр \bar{E} позволяет непосредственно определить степень улучшения теплогидравлической эффективности той или иной конструкции оребрения по сравнению с гладкой поверхностью.

Далее проведено сравнение интенсивности теплообмена, гидравлического сопротивления и относительной теплогидравлической эффективности шахматных пучков труб с оребрением следующего типа: 1 — продольным непрерывным оребрением; 2 — продольным непрерывным оребрением в тесных пучках; 3 — продольным оребрением с перфорацией; 4 — продольным разрезным оребрением с поворотом ребер на угол β относительно направления течения; 5 — продольным разрезным оребрением с отгибом кромок; 6 — поперечным непрерывным винтовым оребрением; 7 — поперечным лепестковым оребрением. Для сравнительной оценки оребренных трубных пучков в качестве базовых выбраны гладкие пучки с таким же геометрическим расположением труб при равенстве исходных динамических и геометрических параметров. Следует отметить, что для пучков 1-5 течение теплоносителя направлено вдоль трубной поверхности, а в пучках 6,7 используется поперечное обтекание пучков труб. Укажем также, что среди поверхностей одного типа, например оребрения с поворотом ребер на различный угол, оребрения с перфорацией при различном расстоянии между перфорационными отверстиями или оребрения с отгибом кромок, имеющих различный радиус отгиба, сравниваются наиболее эффективные типы оребрения. Общий вид труб с различными типами оребрения представлен на рис. 1.

При сравнительной оценке теплоотдачи и гидравлического сопротивления оребренных трубных пучков использованы критериальные соотношения для чисел Нуссельта Nu и коэффициентов гидравлических сопротивлений ζ , приведенные в [4], а также полученные в результате экспериментальных исследований в Институте технической теплофизики НАН Украины. Для труб с продольным непрерывным и разрезным оребрением различных модификаций такие соотношения могут быть представлены в обобщенном виде

$$Nu = C Re^m, \quad (7)$$

$$\zeta = D Re^n, \quad (8)$$

где в качестве определяющего размера использован эквивалентный диаметр межтрубного канала в пучках труб, а характерной скоростью выбрана

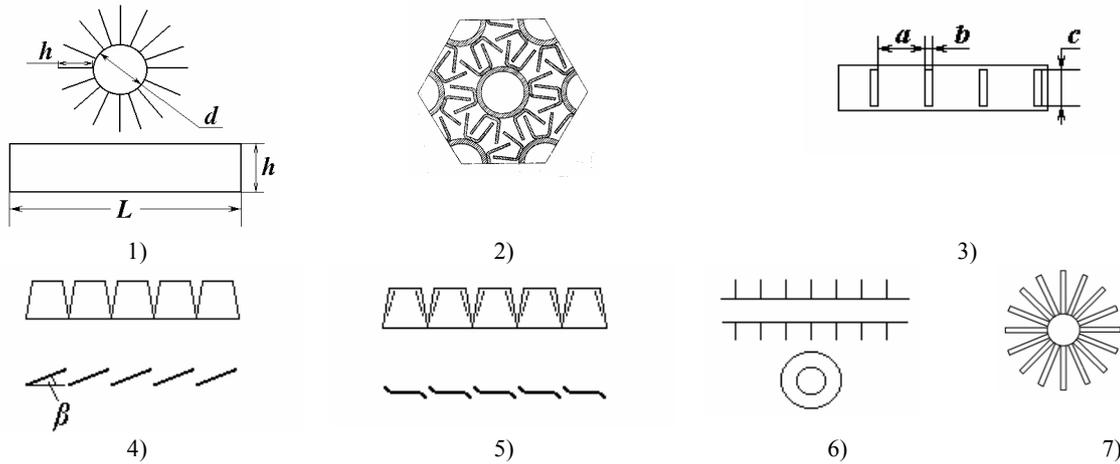


Рис. 1. Поверхности с различными типами оребрения: 1 — продольное непрерывное оребрение; 2 — продольное оребрение в тесных пучках; 3 — продольное перфорированное оребрение; 4 — продольное разрезное оребрение с поворотом ребер на угол β ; 5 — продольное разрезное оребрение с отгибом кромок; 6 — поперечное непрерывное оребрение; 7) поперечное лепестковое оребрение

скорость в узком сечении пучка. Значения коэффициента C и показателя m для различных видов оребрения приведены в таблице, где пучок с номером 0 соответствует пучку с гладкими трубами. Диапазон изменения чисел Рейнольдса в опытах составлял $Re = 3 \cdot 10^3 - 1,7 \cdot 10^4$.

Для шахматных пучков труб при поперечном их обтекании в критериальные соотношения для чисел Nu кроме числа Re входят также параметры s_1, s_2 , которые учитывают влияние поперечного и продольного шагов в трубном пучке. При оценке гидравлических сопротивлений в условиях поперечного обтекания гладких или оребренных пучков труб обычно вместо коэффициента сопротивления ζ используют число Эйлера $Eu = \Delta p / (\rho V_{ж}^2)$.

Для труб с поперечным непрерывным винтовым оребрением экспериментально найдены зависимости (данные ИТТФ НАНУ)

$$Nu = 0,054 Re^{0,7} \left(\frac{s_1}{d_{mp}} \right)^{0,9} \left(\frac{s_2}{d_{mp}} \right)^{-0,4}, \quad (9)$$

$$Eu = 7,3 Re^{-0,36} m, \quad (10)$$

где в качестве характерных параметров выбраны эквивалентный диаметр канала и скорость течения в узком сечении трубного пучка, d_{mp} — внешний диаметр трубы, m — количество рядов труб в пучке в направлении течения.

Для шахматных пучков труб с поперечным лепестковым оребрением соответствующие критериальные соотношения имеют вид:

$$Nu = 0,115 Re^{0,7} \left(\frac{s_1}{d_{mp}} \right)^{0,4} \left(\frac{s_2}{d_{mp}} \right)^{-0,2}, \quad (11)$$

$$Eu = 3,6 Re^{-0,18} \left(\frac{s_1}{d_{mp}} \right)^{-0,47} \left(\frac{s_2}{d_{mp}} \right)^{-0,38} m. \quad (12)$$

Диапазон изменения чисел Рейнольдса в опытах составлял $Re = 7 \cdot 10^3 - 6 \cdot 10^4$.

Для шахматных пучков гладких труб критериальные соотношения для Nu и ζ получены в виде зависимостей [4]

$$Nu_d = 0,41 Re_d^{0,6} \left(\frac{s_1}{s_2} \right)^{1/6}, \quad (13)$$

$$Eu = 1,4 Re_d^{-0,25} (m + 1), \quad (14)$$

где в качестве определяющих параметров выбраны внешний диаметр трубы и скорость течения в узком сечении пучка.

При вычислении параметра \bar{E} для пучков труб с поперечным оребрением, учитывая равенство $\zeta / \zeta_{2л} = Eu / Eu_{2л}$, в формуле (6а) вместо $\zeta / \zeta_{2л}$ используем отношение $Eu / Eu_{2л}$.

На основании зависимостей (7)-(14) были рассчитаны значения $Nu / Nu_{2л}$ и $\zeta / \zeta_{2л}$ для пучков труб с оребрением различного типа, которые представлены на рис. 2, 3. Как следует из рис. 2, максимальная интенсификация теплообмена достигается при разрезке продольных ребер с отгибом кромок (кривая 5). Вместе с тем отгиб кромок приводит к большим значениям гидравлического сопротивления (см. рис. 3). Достаточно высокие коэффициенты теплоотдачи наблюдаются при разрезке продольных ребер с некоторым их поворотом относительно направления потока и при перфорировании ребер (кривые 3, 4 на рис. 2).

Однако продольное обтекание пучков при использовании ребер такой геометрии сопряжено с ощутимым увеличением гидравлического сопротивления (см. рис. 3). Что касается труб с продольным непрерывным оребрением, то коэффициенты теплоотдачи и гидравлического для оребренной поверхности такого типа близки к аналогичным

Таблица. Значения коэффициента C и показателя m для различных видов оребрения

Параметр	Номер пучка					
	0	1	2	3	4	5
C	0,021	0,022	0,018	0,034	0,0097	0,085
m	0,8	0,8	0,8	0,8	0,94	0,73
D	0,3164	0,316	0,34	0,088	0,012	0,65
n	-0,25	-0,25	-0,25	0	0,25	-0,2

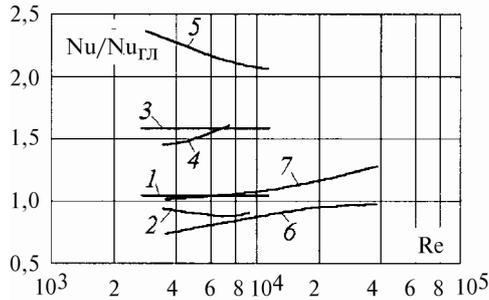


Рис. 2. Зависимость параметра Nu/Nu_{gl} от числа Re для трубных пучков с различными типами оребрения: 1 — продольным непрерывным оребрением; 2 — продольным непрерывным оребрением в тесных пучках; 3 — продольным оребрением с перфорацией; 4 — продольным разрезным оребрением с поворотом ребер на угол $\beta = 5^\circ$ относительно направления течения; 5 — продольным разрезным оребрением с отгибом кромок; 6 — поперечным непрерывным винтовым оребрением; 7 — поперечным лепестковым оребрением

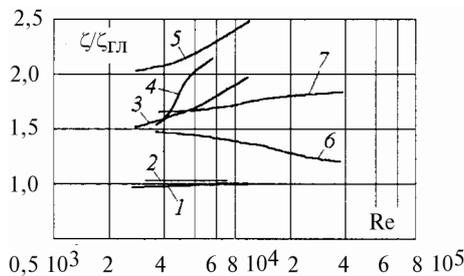


Рис. 3. Зависимость параметра ζ/ζ_{gl} от числа Re для трубных пучков с оребрением типа 1-7

величинам для гладких труб (кривые 1,2 на рис. 2,3) при увеличении площади поверхности теплоотдачи за счет оребрения в несколько раз.

Развитие поверхности за счет поперечного спирального оребрения приводит даже к некоторому снижению коэффициентов теплоотдачи, если сравнивать с гладкими трубами при поперечном их обтекании (кривая 6 на рис. 2). При разрезке таких ребер происходит некоторая интенсификация теплоотдачи за счет срыва пограничного слоя на их поверхности (кривая 7 на рис. 2), однако с ростом теплоотдачи возрастает и гидравлическое сопротивление поверхностей рассматриваемого типа (см. зависимости 6,7 на рис. 3).

Используя соотношение (6а) были рассчитаны значения относительной теплогидравлической эффективности \bar{E} для пучков труб с различным продольным и поперечным оребрением типа 1-7. Результаты расчетов представлены на рис. 4. Из рис. 4 следует, что применение оребрения на внешней поверхности труб улучшает теплогидравлическую эффективность трубных пучков. Исключение составляют пучки труб с перфорированным оребрением (тип 3 на рис. 4) и пучки с разрезкой продольных ребер с некоторым их поворотом относительно направления потока для больших чисел Рейнольдса (см. кривую 4 на рис. 4). Это обусловлено существенным увеличением гидравлического сопротивления поверхностей с разрезкой и поворотом ребер. Для оребрения с перфорацией помимо увеличения гидравлического сопротивления другим фактором, снижающим его теплогидравлическую эффективность, является уменьшение общей площади оребрения, если сравнивать с пучками труб, имеющих на поверхности непрерывные ребра. Для поверхностей указанного типа увеличение интенсификации теплообмена на поверхности ребер, вызванное срывом пограничного слоя на начальных участках его формирования и турбулизацией потока, существенно отстает от роста гидравлического сопротивления.

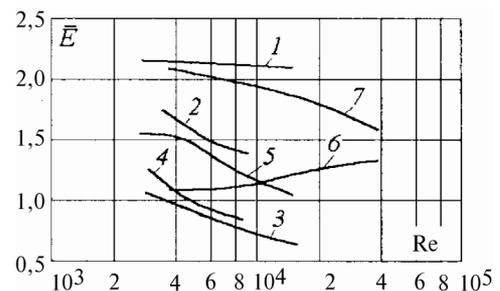


Рис. 4. Относительная теплогидравлическая эффективность \bar{E} для трубных пучков с продольным и поперечным оребрением: 1-7 — тип оребрения

Характерно, что применение непрерывного оребрения (оребранные пучки труб типа 1,2) не приводит к какой-либо интенсификации теплообменных процессов на их поверхности, однако и гидравлическое сопротивление пучков при этом практически не растет. В результате теплогидравлическая эффективность пучков труб с непрерывным продольным оребрением (тип 1 и 2) возрастает

за счет увеличения площади теплообменной поверхности и имеет наиболее высокие значения. Следует отметить, что для тех случаев, когда затраты мощности на прокачку теплоносителя не являются определяющим фактором при разработке теплообменника данной конструкции, применение, например, продольного разрезного оребрения приводит к интенсификации теплообмена на поверхности в 1,5-2,5 раза по сравнению с непрерывным оребрением. Использование оребрения такого типа позволяет существенно улучшить габаритные и весовые показатели теплообменных устройств.

В трубных пучках с поперечным оребрением, как следует из сравнения зависимостей 6 и 7 на рис. 2,3, применение вместо непрерывных ребер лепесткового оребрения обеспечивает как увеличение общей площади поверхности, так и значительную интенсификацию теплообменных процессов на поверхности при умеренном росте гидравлического сопротивления. Использование поперечного разрезного оребрения наиболее эффективно для течений с малыми и средними скоростями – при больших числах Рейнольдса гидравлическое сопротивление пучков начинает возрастать. Совместное влияние этих факторов позволяет поверхностям с поперечным лепестковым оребрением приблизиться к наиболее высоким показателям теплогидравлической эффективности, которые имеют трубные пучки с непрерывным продольным оребрением (см. зависимость 7 на рис. 4). Другим преимуществом поперечного разрезного оребрения по сравнению с непрерывным ленточным оребрением, как показывают эксплуатационные наблюдения, является его меньшая подверженность загрязняющим отложениям. Следует отметить, что в последнем случае необходимо учитывать влияние отложений на оптимальные размеры оребрения [6].

3. ВЫВОДЫ

1. Получено выражение для критерия теплогидравлической эффективности оребренных поверхностей различного типа.

2. Проведен сравнительный анализ теплоотдачи, гидравлического сопротивления и теплогидравлической эффективности шахматных пучков труб с продольным и поперечным оребрением различных модификаций. Определены наиболее эффективные поверхности теплообмена.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

E - теплогидравлическая эффективность;
 Q - суммарный тепловой поток, Вт;
 α - коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);
 N - мощность, Вт;
 T - температура, К;
 F - площадь поверхности, м²;
 p - давление, Н/м²;
 G - расход теплоносителя, м³/с;
 ρ - плотность теплоносителя, кг/м³;
 η - тепловая эффективность ребер;
 ζ - коэффициент гидравлического сопротивления;
 L - длина канала, м;
 d - диаметр, м;
 V - скорость течения, м/с;
 Nu - число Нуссельта;
 Re - число Рейнольдса;
 Eu - число Эйлера.

Индексы:

$г$ - гладкий;
 $к$ - конвективный;
 $пр$ - приведенный;
 $п$ - поверхность;
 $сеч$ - сечение;
 $тр$ - труба;
 $э$ - эквивалентный.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кирпичев М.В.** О наиболее выгодной форме поверхности нагрева // Изв. ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, 1944. Т. 12.
2. **Гортышов Ю.Ф., Олимпиев В.В., Попов И.А.** Эффективность промышленно перспективных интенсификаторов теплоотдачи (Обзор. Анализ. Рекомендации) // Энергетика. Изв. РАН. 2002. №3. С. 102 - 118.
3. **Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А.** Интенсификация теплообмена в каналах. М.: Машиностроение, 1981. 207 с.
4. **Керн Д., Краус А.** Развитые поверхности теплообмена. М.: Энергия, 1977. 452 с.
5. **Ройзен Л.И., Дулькин И.Н.** Тепловой расчет оребренных поверхностей. М.: Энергия, 1977. 254 с.
6. **Горобец В.Г.** Тепловой расчет и оптимизация составных ребер // Труды Второй Российской конференции по теплообмену. 1998. Т. 7. С.65-67.