

НОВЫЕ ЭФФЕКТИВНЫЕ РАЗВИТЫЕ ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛООБМЕНА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ

Письменный Е.Н., Багрий П.И., Терех А.М.

Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”.
Украина, Киев, 03056, Проспект Победы, 37

Важным направлением решения задач ресурсо- и энергосбережения является разработка и внедрение новых видов развитых конвективных поверхностей теплообмена, отличающихся высокой тепло-аэродинамической эффективностью, технологичностью и невысокой стоимостью производства.

Проблема энерго- и ресурсосбережения в данном контексте имеет несколько аспектов.

В различных видах промышленности (нефтеперерабатывающей, химической, газовой, пищевой, в газотранспортной системе и пр.) одним из важнейших видов технологического оборудования являются теплообменные аппараты конвективного типа, общая масса которых достигает ~ 35...40 % массы всего оборудования. Теплообменные аппараты используются для конденсации, охлаждения парообразных, газообразных и жидких сред в широких диапазонах температур и давлений. Модернизация, ремонт такого оборудования и создание новых производственных мощностей требуют огромных капитальных вложений, поэтому внедрение более эффективных и дешевых теплообменных устройств с учетом их доли в общей массе оборудования приводит к существенной экономии материальных и энергетических ресурсов.

Разработка и внедрение новых видов развитых поверхностей теплообмена позволяет расширить сферу применения так называемых “сухих” систем охлаждения, когда охлаждающим агентом является атмосферный воздух, а не пресная вода, дефицит которой уже сейчас остро ощущается во всем мире. Промышленность потребляет свыше 50 % количества пресной воды в общем балансе на охлаждение технологических сред и промышленного оборудования. Применение “сухих” (воздушных) систем охлаждения на предприятиях нефтехимической, металлургической, пищевой и др. отраслей промышленности позволяет на 70–90 % сократить водопотребление, что дает возможность успешно решать не только задачу рационального использования водных ресурсов, но и не менее важную экологическую задачу их охраны путем прекращения и предотвращения загрязнения рек и водоемов промышленными стоками.

Без внедрения новых видов развитых поверхностей теплообмена невозможен прогресс в энергомашиностроении и энергетике. Доля таких поверхностей в составе энергетического оборудования велика и постоянно возрастает: это водяные экономайзеры, калориферы котельных установок, котлы-утилизаторы, регенераторы, маслоохладители парогазовых (ПГУ) и газотурбинных (ГТУ) установок, а также сухие градирни и воздушные конденсаторы. Особо следует отметить устойчивую тенденцию отказа в паротурбинных установках от градирен и других систем охлаждения испарительного типа, в которых теряется до 60 % воды, вследствие дефицита гидроресурсов и необходимостью размещения энергоустановок вне связи с источниками пресной воды.

Без совершенствования развитых поверхностей теплообмена, снижения стоимости их производства невозможно полномасштабное освоение огромного потенциала энергосбережения за счет утилизации теплоты уходящих газов промышленных энергетических и технологических топливоиспользующих установок. Этот потенциал оценивается для Украины примерно в 14 млн. тонн условного топлива в год.

Таким образом, использование идей и разработок, приводящих даже к небольшому снижению металлоемкости и стоимости оребренных поверхностей при больших потребностях в теплообменном оборудовании в масштабах промышленных отраслей может привести к значительной экономии средств, расширению сфер применения ресурсо- и энергосберегающих технологий.

Для производства конвективных теплообменных поверхностей, используемых в рассмотренных выше случаях, применяются поперечно-оребранные трубы различных типов: с круглым и не круглым (овальным, плоско-овальным) профилем, с винтовым, шайбовым, квадратным, сегментным (просечным) или лепестковым оребрением. Оребренные трубы изготавливаются методом точного литья (чугунные и стальные трубы, а также стальные трубы с алюминиевыми “эллиптическими” ребрами), методом насадки или механической навивки винтового (спирально-ленточного) оребрения с последующей пайкой, методом запрессовки оребрения в предварительно нарезанную винтовую канавку на трубе, методом накатывания ребер из толстостенной трубы (биметаллические трубы), методом приварки ребер электродуговой сваркой под флюсом или токами высокой частоты.

Широкое распространение получили наиболее технологичные типы оребренных труб, производство которых возможно в больших объемах на высокопроизводительном технологическом оборудовании – это стальные трубы с запрессованным в винтовую канавку алюминиевым оребрением, трубы с накатанным из толстостенной алюминиевой трубы винтовым оребрением, насаженным на несущую (обычно стальную) трубу, а также стальные трубы с приваренным токами высокой частоты винтовым оребрением.

Однако эти типы оребренных труб обладают рядом существенных недостатков, таких как слабый термический контакт оребрения с несущей трубой и высокая стоимость алюминия для первых двух типов, относительно невысокая степень развития поверхности (невысокие значения коэффициентов оребрения), а также большая сложность и стоимость технологического оборудования для третьего типа ребристых труб. Стоимость погонного метра труб указанных типов достигает 20 и более долларов США, что сдерживает возможности их использования в требуемых отмеченной выше проблематикой объемах. Дороговизна и заметная энергоемкость соответствующего технологического оборудования не позволяет наращивать необходимые производственные мощности.

Относительно широкое распространение в качестве элементов воздушных конденсаторов и сухих градирен получили профилированные (овальные) оребренные трубы фирм GEA и "Balcke-Durr". Такие трубы обладают несомненным преимуществом – низким аэродинамическим сопротивлением по сравнению с трубами круглого профиля, что позволяет снижать эксплуатационные расходы, а также реализовывать конструкции, в которых движение охлаждающего воздуха осуществляется за счет естественной тяги. Однако технология их изготовления, связанная с механической навивкой спирально-ленточного оребрения, либо насадкой прямоугольных ребер на овальную трубу с последующей их пайкой методом окунания в ванну с расплавленным цинком является весьма трудоемкой, медленной и дорогостоящей.

Совершенствование поперечно-ребренных по-верхностей требует углубления представлений об особенностях процессов течения и теплообмена в них. С этой целью в НТУУ “КПИ” был выполнен обширный комплекс исследований, позволивших выявить закономерности, существенно изменяющие сложившиеся представления о характере процессов в межреберных полостях и в пакетах ребристых труб в целом [1 – 4]. В частности, было показано, что для ряда распространенных компоновок шахматных пакетов лобовые и кормовые участки ребристых труб находятся в области аэродинамической тени и практически не участвуют в процессе теплообмена. Это иллюстрируется круговой эпюрой относительных коэффициентов теплоотдачи (рис. 1), в передней части которой наблюдается “провал”, связанный с наложением ближнего вихревого следа от предлежащей по потоку трубы; аналогичное снижение значений коэффициентов теплоотдачи в кормовой части оребренной трубы обусловлено взаимодействием поверхности ребра с ее собственным следом. Была показана также возможность управления процессами переноса на поверхности ребристых труб путем применения различных конструктивных мер с целью повышения их теплоаэродинамической эффективности.

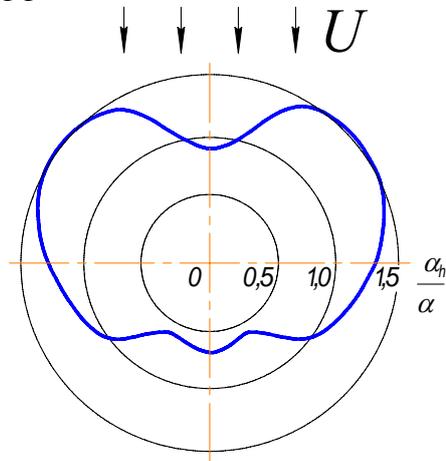


Рис. 1. Распределение осредненной по высоте ребра относительной интенсивности теплоотдачи для труб, расположенных в шахматном пакете с $S_1/d = 3,02$; $S_2/d = 1,30$.

В рассматриваемом случае один из путей повышения эффективности теплообменной поверхности связан с изъятием “не работающих” лобовых и кормовых частей оребрения. Этот путь целесообразен тогда, когда теплообменные устройства собираются из профилированных плоско-овальных труб (рис. 2). Отсутствие необходимости оребрения лобовых и кормовых участков их поверхности, имеющих значительную кривизну, не только снижает массу ребристой трубы практически без изменения уровня отводимого теплового потока [4,5] (рис. 2,а), но и делает ее более технологичной. Ребра в этом случае размещаются только на плоских боковых участках несущей трубы, что позволяет применять дешевую и высокопроизводительную технологию контактной сварки, обеспечивающую практически идеальный термический контакт между ребром и несущей трубой. Это позволяет также значительно увеличить площадь эффективно омываемой поверхности ребер по сравнению с поверхностью ребер наиболее распространенных ребристых профилированных труб фирмы “Balcke-Dupr” за счет увеличения их высоты (рис. 2,б), которая при предлагаемом способе формирования оребрения профилированных труб практически не имеет технологических ограничений. Кроме того, предлагаемая конструкция ребристой трубы и технология ее изготовления дают возможность наращивать поверхность ребер за счет увеличения их длины за пределы границ профиля несущей трубы (рис. 2,в), а

также за счет минимизации зазора между ребрами, величина которого в данном случае ограничивается только гидродинамическими соображениями – условиями предотвращения смыкания пограничных слоев, развивающихся на поверхности ребер.

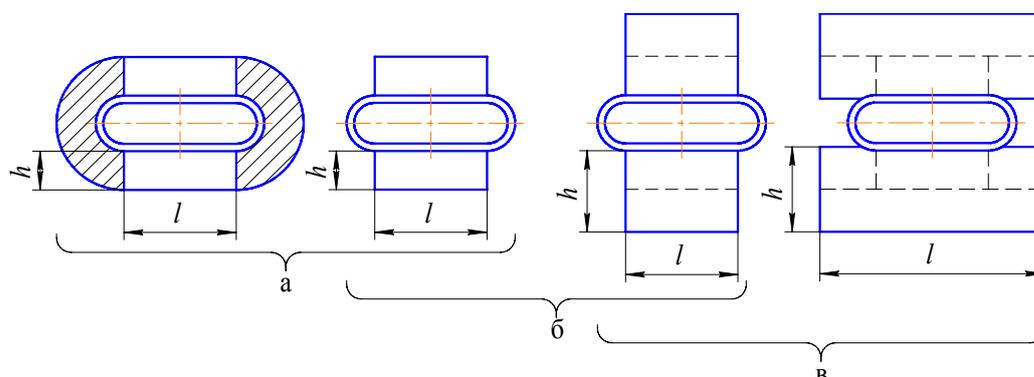


Рис. 2. Принцип формирования неполного оребрения труб плоскоовального профиля.

Все отмеченное выше позволяет в предлагаемой конструкции ребристых труб [6,7] достигать значений коэффициента оребрения Ψ и площади поверхности одного погонного метра трубы H_1 , близких к значениям этих параметров для лучших по развитию поверхности образцов полностью оребренных труб ($\Psi = 22$, $H_1 = 1,8 \text{ м}^2/\text{м}$). При этом следует учитывать, что поверхность полностью оребренных труб включает “не работающие” участки оребрения, т.е. участки, которые находятся в процессе эксплуатации в аэродинамической тени, в то время как из поверхности труб предлагаемого типа такие участки исключены. То есть теплоаэродинамическая эффективность единицы поверхности ребристых труб предлагаемого типа при прочих равных условиях выше, чем у полностью оребренных труб.

Важно отметить, что благодаря конструктивным особенностям плоско-овальных труб с неполным оребрением происходит турбулизация потока наружного теплоносителя вследствие взаимодействия его составляющих, попадающих в межреберное пространство от переднего края ребра (рис. 3, позиция 1) и из не занятого ребрами пространства перед лобовой частью несущей трубы (рис. 3, позиция 2). Этим достигается некоторое повышение интенсивности теплообмена, сопоставимое с эффектом от действия подково-образного вихря в лобовой части полностью оребренной трубы.

Для исследования теплоаэродинамических характеристик поверхностей из плоско-овальных труб с неполным оребрением с помощью специалистов ИЭС им. Е.О. Патона методом контактной сварки были изготовлены 6 типоразмеров стальных труб, отличающихся как параметрами оребрения, так и характеристиками плоско-овальной основы (рис. 4,5; табл. 1). Эксперименты проводились по хорошо отработанной в НТУУ “КПИ” методике [4], в основе которой лежит измерение температурных полей ребра и стенки несущей трубы, необходимых для определения чисто конвективных и приведенных коэффициентов теплоотдачи, а также коэффициента эффективности ребра E . Трубы собирались в шахматные пакеты с широким диапазоном шаговых характеристик: $S_1/d_1 = 4,3 \dots 9,0$; $S_2/d_1 = 3,31 \dots 5,33$; $S_1/S_2 = 0,99 \dots 2,55$. Получен обширный экспериментальный материал, а также обобщающие зависимости для теплообмена и аэродинамического сопротивления пакетов плоско-овальных труб с неполным оребрением, которые легли в основу соответствующих инженерных методик расчета.

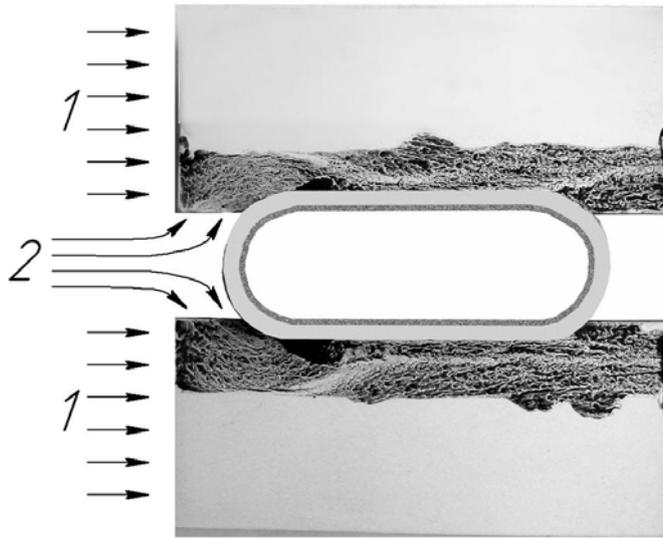


Рис. 3. Визуализация течения на поверхности ребер плоско-овальной трубы с неполным оребрением:

1 – фронтальная часть потока: 2 – часть потока, попадающего в межреберные полости из не занятого ребрами пространства перед лобовой частью несущей трубы.

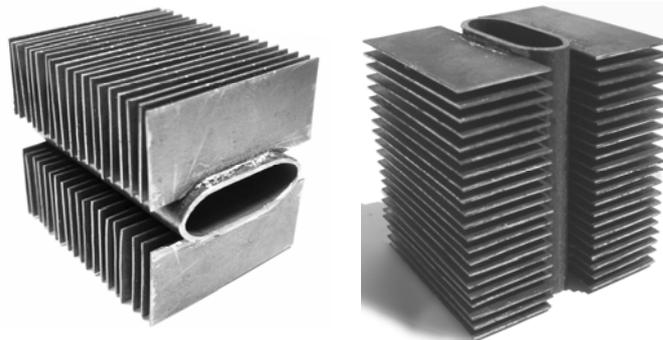


Рис. 4. Плоско-овальные трубы с неполным оребрением.

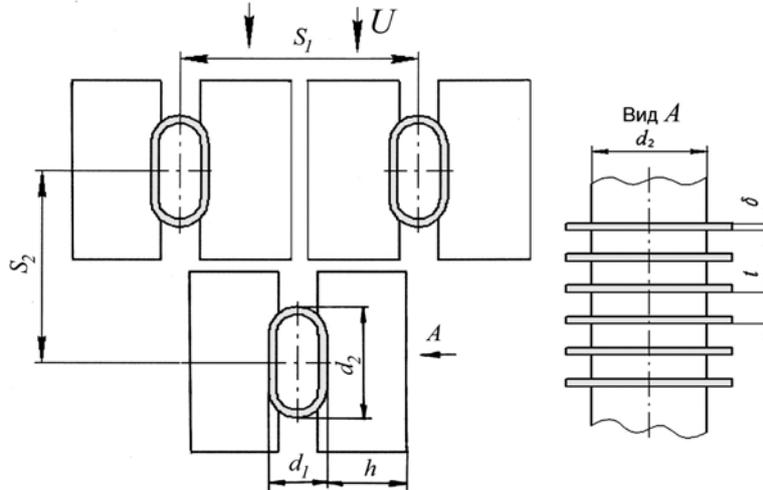


Рис. 5. Геометрические характеристики плоско-овальных труб с неполным оребрением.

Таблица 1. Геометрические характеристики плоско-овальных труб с неполным оребрением*)

№ п/п	Наименование величины	Обоз.	Разм.	Значение
1.	Относительное удлинение профиля несущей трубы	d_2/d_1	–	2,0...2,8
2.	Высота ребер	h	мм	22,0...28,5
3.	Шаг ребер	t	мм	3,4...3,8
4.	Длина ребер	l	мм	48,5...55,5
5.	Коэффициент оребрения	ψ	–	15,2...21,5
6.	Площадь поверхности одного погонного метра	H_1	м ² /м	1,36...1,82

*) Материал несущей трубы и ребер – углеродистая сталь

Проводилось сопоставление характеристик исследуемых труб с характеристиками близких по площади внутреннего сечения труб наиболее распространенных типов: стальных овальных оцинкованных труб фирмы “Balcke-Durr”, стальных труб с приваренным токами высокой частоты винтовым оребрением Подольского машиностроительного завода им. Орджоникидзе (ЗиО) и биметаллических труб (алюминиевое накатанное оребрение и стальная основа) фирмы GEA (табл. 2). Из рис. 6 видно, что предлагаемые трубы с неполным оребрением отличаются высокой интенсивностью конвективного теплообмена (как у круглых оребренных труб) и низким аэродинамическим сопротивлением (как у профилированных), что в целом позволяет рассчитывать на их высокую тепло-аэродинамическую эффективность, несмотря на относительно низкую теплопроводность стальных ребер по сравнению с алюминиевыми.

Таблица 2 Характеристики сравниваемых оребренных труб

№ п/п	Наименование величины	d_2/d_1	d мм	H_1 м ² /м	ψ	Материал несущей трубы	Материал ребер
1	Плоско-овальная труба с неполным оребр	2.8	-	1.53	15.1	Углерод. сталь	Углерод. сталь
2	Овальная труба с овальным оребрением	2.6	-	0.841	10.2	Углерод. сталь	Углерод. сталь
3	Круглая труба с приварным спиральным оребрением	-	32.0	0.744	7.4	Углерод. сталь	Углерод. сталь
4	Биметаллическая круглая труба	-	27.4	1.64	19.2	Углерод. сталь и алюминий	Алюминий

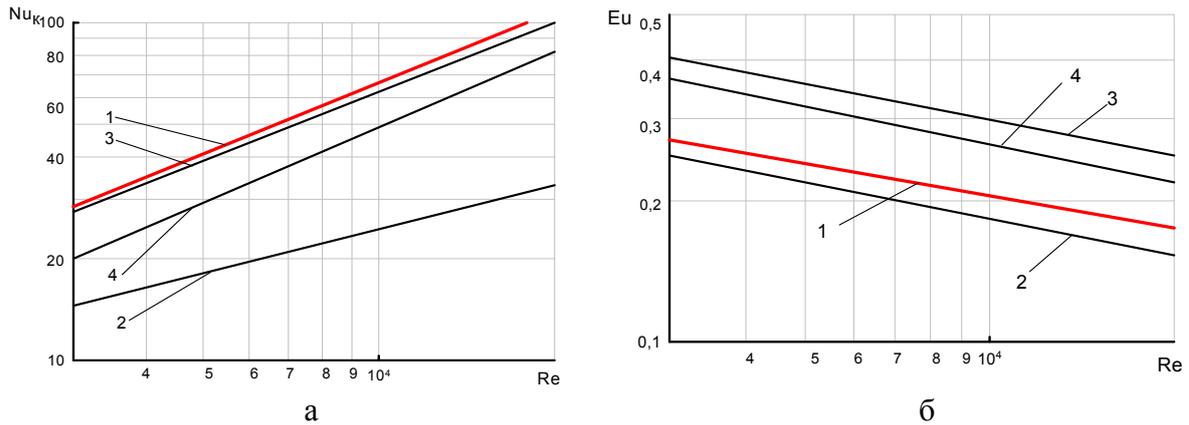


Рис. 6. Сопоставление интенсивности теплоотдачи (а) и аэродинамического сопротивления (б) пакетов плоско-овальных труб с неполным оребрением (1), овальных труб с овальным оребрением (2), круглых труб с приварным винтовым оребрением (3) и биметаллических труб (4).

В этом аспекте важным этапом работы были исследования, связанные с оптимизацией оребрения. При этом использовался подход, основанный не на традиционном сопоставлении удельных характеристик интенсивности теплообмена (α_k , $\alpha_{пр}$), а на сопоставлении интегральных характеристик, таких как теплосъем с погонного метра длины трубы q_1 , учитывающий влияние на теплоотдающие свойства поверхности не только характеристик интенсивности теплообмена (α_k , $\alpha_{пр}$), но и степени развития поверхности (H_1 , Ψ). О наличии оптимальных значений параметров оребрения (h , t , l) можно судить по тому обстоятельству, что для достижения максимального значения q_1 за счет увеличения α_k , E и H_1 необходимо изменять параметры оребрения в противоположных направлениях. Так, для увеличения площади теплоотдающей поверхности H необходимо увеличивать высоту h , длину l ребер и уменьшать их шаг t , в то время как аналогичное изменение размеров оребрения приводит к снижению конвективной теплоотдачи. Дело в том, что в рассматриваемом случае ребра, расположенные на плоско-овальной основе образуют систему полуоткрытых плоских каналов. При увеличении их относительной глубины, характеризующейся отношением h/t , а также длины возрастает эффект вытеснения потока из межреберных каналов из-за нарастания толщин пограничных слоев на ребрах, что в итоге приводит к снижению интенсивности теплоотдачи и росту аэродинамического сопротивления ребристой поверхности. Увеличение коэффициента эффективности оребрения E также требует снижения высоты и длины ребер.

Наиболее наглядно преимущества того или иного вида ребристых труб можно продемонстрировать, сопоставляя характеристики вариантов теплообменного аппарата, выполненных из предлагаемых и наиболее распространенных в промышленности ребристых труб при прочих равных условиях. Такой анализ был осуществлен применительно к воздушному конденсатору тепловой мощностью 1280 кВт, расход водяного пара через который составляет 0,56 кг/с, расход охлаждающего воздуха 24 м³/с, температура насыщенного пара на входе 115 °С. Для сопоставления были выбраны варианты конструкции из рассмотренных выше (табл. 2) труб наиболее известных фирм, которые имели примерно одинаковые значения площадей сечений для прохода внутренней среды, соответствующие аналогичной величине для предлагаемых плоско-овальных труб.

Сопоставление выполнялось по четырем наиболее важным, на наш взгляд, характеристикам: общей длине труб теплообменника L и связанной с ней тепловой мощностью, отводимой от одного погонного метра длины q_1 ; аэродинамическому сопротивлению трубного пакета ΔP и показателю компактности развитой поверхности Π .

Результаты сопоставления представлены в табл. 3 и на рис.7, 8. Из анализа следует, что по первым двум показателям (L и q_1), практически определяющим трудоемкость изготовления и стоимость теплообменного устройства, лучшими являются варианты из плоско-овальных труб с неполным оребрением и из биметаллических труб фирмы GEА с близкой к максимально возможной для труб круглого профиля степенью развития поверхности. Учитывая то, что для изготовления биметаллических труб необходим высококачественный алюминий, стоимость которого в настоящее время более чем в 6 раз превышает стоимость углеродистой стали, более предпочтительным выглядит вариант из стальных плоско-овальных труб с неполным оребрением при наличии относительно высокопроизводительной, низкоэнергозатратной и простой технологии их изготовления. Технология изготовления плоско-овальных труб с неполным оребрением, основанная на использовании простой контактной сварки, органически связана с идеей предлагаемой конструкции ребристых труб и полностью соответствует отмеченным выше требованиям.

Таблица3. Сопоставление характеристик вариантов воздушного конденсатора

Характеристики пекета	Тип труб			
	1	2	3	4
	Плоско-овальные трубы с неполным оребрением	Овальные трубы с овальным оребрением	Круглые трубы с приварным спиральным оребрением	Биметаллические трубы
Поперечный шаг труб шахматного пакета, S_1 , мм	65	62	65	65
Продольный шаг труб шахматного пакета, S_2 , мм	60	42	53	60
Общая длина оребренных труб, L , м	373	865	540	411
Тепловая мощность отводимая от 1 одного метра труб, q_1 , кВт/м	3,43	1,48	2,36	3,11
Аэродинамическое сопротивление пакета оребренных труб, ΔP , Па	142	138	329	229
Компактность теплообменной поверхности, Π , м ² /м ³	393	323	253	421

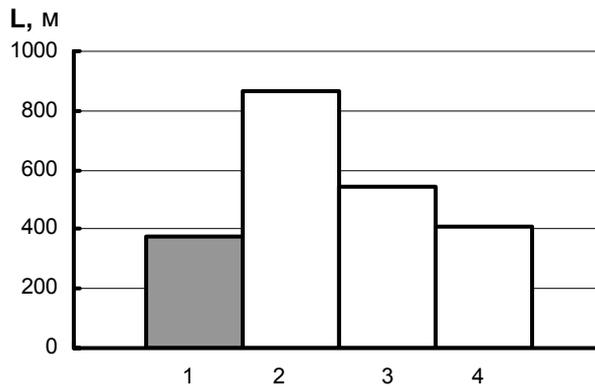


Рис. 7. Сопоставление общих длин L труб вариантов воздушного конденсатора: 1 – плоско-овальные трубы с неполным оребрением; 2 – овальные трубы с овальным оребрением; 3 – круглые трубы с приварным винтовым оребрением; 4 – биметаллические трубы.

Длина труб в вариантах № 2 и № 3 соответственно в 2,3 и 1,5 раза превышает длину труб теплообменника из плоско-овальных труб с неполным оребрением, что значительно снижает конкурентоспособность соответствующих видов ребристых труб во многих практически важных случаях.

Сопоставление по аэродинамическому сопротивлению, фактически определяющему эксплуатационные затраты, связанные с расходом энергии на привод вентилятора, а также в заметной степени – капитальные затраты, обусловленные необходимой мощностью привода, показало (рис.8), что вариант конденсатора из плоско-овальных труб с неполным оребрением имеет такое же аэродинамическое сопротивление, как вариант из наиболее аэродинамически совершенных овальных труб с овальным оребрением. Конденсатор из биметаллических труб имеет в 1,6 раза, а из стальных труб с приварным винтовым оребрением – в 2,3 раза большее аэродинамическое сопротивление. Все это позволяет предположить, что плоско-овальные трубы с неполным оребрением будут предпочтительнее как в конструкциях аппаратов воздушного охлаждения (АВО), так и в конструкциях котлов-утилизаторов парогазовых и газотурбинных установок, экономичность которых в большой мере зависит от потерь давления в газовом тракте, а также в конструкциях сухих градирен с естественной тягой.

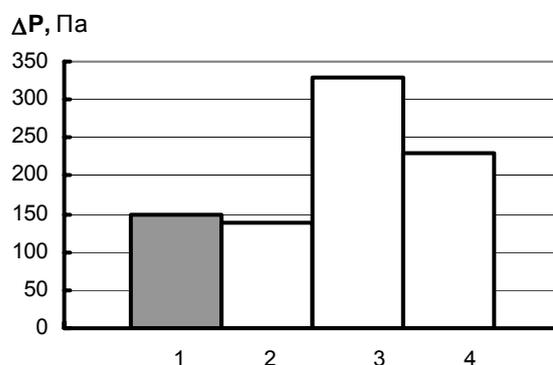


Рис. 8. Сопоставление вариантов воздушного конденсатора по аэродинамическому сопротивлению: 1 – плоско-овальные трубы с неполным оребрением; 2 – овальные трубы с овальным оребрением; 3 – круглые трубы с приварным винтовым оребрением; 4 – биметаллические трубы.

Важной характеристикой совершенства развитой поверхности является показатель ее компактности, который представляет собой площадь теплоотдающей поверхности, вмещающейся в 1 кубическом метре объема теплообменного аппарата. Сопоставление вариантов по этой характеристике показало, что теплообменные поверхности из плоско-овальных труб с неполным оребрением практически не уступают поверхностям из биметаллических труб, для которых характерны наибольшие значения величины $П$ среди развитых трубчатых поверхностей. При этом следует учитывать отмеченную выше особенность плоско-овальных труб с неполным оребрением, заключающуюся в том, что теплоэнергетическая эффективность единицы поверхности таких труб выше, чем у полностью оребренных труб, поверхность которых включает “плохо работающие” участки, находящиеся в аэродинамической тени.

Подводя итоги, следует отметить, что предложенный новый тип оребренных труб обладает рядом существенных достоинств по сравнению с трубами, используемыми в настоящее время в промышленности. К ним следует отнести:

- технологичность и относительно невысокую стоимость производства, обусловленные применением технологии контактной сварки, не требующей сложного оборудования, специальных расходных материалов и больших затрат энергии;

- высокую степень развития поверхности, достигающую значений, характерных для лучших образцов биметаллических труб при использовании в качестве конструкционных материалов значительно более дешевых, по сравнению с алюминием, углеродистых сталей;

- высокую интенсивность конвективного теплообмена вследствие отсутствия участков оребрения, взаимодействующих с областями аэродинамической тени, в которых наблюдаются низкие значения локальных скоростей потока, а также вследствие турбулизации потока в межреберных полостях при взаимодействии его составляющих, проникающих туда с фронта и из не занятого ребрами пространства перед лобовой частью несущей трубы;

- практически идеальный термический контакт между ребрами и несущей трубой, обусловленный технологией контактной сварки;

- низкое аэродинамическое сопротивление, связанное с использованием несущих труб удобообтекаемого плоско-овального профиля, который обеспечивает при равных с круглыми трубами живых сечениях для внутреннего теплоносителя значительно меньшую площадь миделевого сечения;

- более низкое по сравнению с круглыми трубами термическое сопротивление теплоотдачи при конденсации внутри труб паров технологических жидкостей за счет уменьшения толщины пленки конденсата, основное количество которого локализуется в узкой области, прилегающей к нижней искривленной части плоско-овального профиля.

Все отмеченное выше позволяет утверждать, что теплообменное оборудование из плоско-овальных труб с неполным оребрением будет иметь значительно меньшие сроки окупаемости, чем выпускаемые в настоящее время образцы, и найдет широкое распространение в различных областях промышленности. Освоение и внедрение предлагаемых новых теплообменных поверхностей приведет к ощутимой экономии материальных и энергетических ресурсов.

Список литературы

[1] Письменный Е.Н. Исследование течения на поверхности ребер поперечно-оребранных труб // Инж.– физ. журн. 1984. – Т. 47. – № 1. – С. 28-34.

- [2] Письменный Е.Н. Особенности течения и теплообмена в шахматных пучках поперечно-оребранных труб // Инж. – физ. журн. – 1991. – Т. 60. – № 6. – С. 895-902.
- [3] Письменный Е.Н., Терех А.М. Локальный теплообмен в пакетах поперечно-оребранных труб // Пром. теплотехника. – 1993. – Т. 15. – № 3. – С. 45-55.
- [4] Письменный Е.Н. Теплообмен и аэродинамика пакетов поперечно-оребранных труб. – К.: Альтерпрес, 2004. – 244 с.
- [5] Письменный Е.Н., Терех А.М. Конструктивные методы повышения теплоаэродинамической эффективности трубчатых поперечно-оребранных поверхностей теплообмена. Часть 3. Поверхности из профилированных труб с неполным оребрением // Пром. теплотехника. – 1999. – Т. 21. – № 6. – С. 5-11.
- [6] Письменный Є.М., Терех О.М., Рогачов В.А., Бурлей В.Д. Теплообмінна труба / Деклараційний патент на корисну модель. 4871. Україна. 15.02.2005, бюл. № 2
- [7] Письменный Є.М., Терех О.М., Рогачов В.А., Бурлей В.Д. Теплообмінна труба / Патент на корисну модель. Україна. № 25025 25.07.2007, бюл. №11.