

УДК 536.24

ПИСЬМЕННЫЙ Е.Н.

Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”

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

Запропоновано новий вид ребристих труб – плоско-овальні труби з неповним оребренням. Наведено їх основні характеристики та виконано порівняння з іншими видами ребристих поверхонь. Показано, що впровадження нових оребрених труб призведе до значної економії матеріальних та енергетичних ресурсів.

Предложен новый вид ребристых труб – плоско-овальные трубы с неполным оребрением. Приведены их основные характеристики и выполнено сопоставление с другими видами ребристых поверхностей. Показано, что внедрение новых оребренных труб приведет к ощутимой экономии материальных и энергетических ресурсов.

Proposed is the new type of finned tubes – flat-oval tubes with partial finning. Described are their main characteristics. The results of comparison of these tubes with other types of finned surfaces are given. Introduction of the new finned tubes will lead to considerable economy of material and energy resources.

d – диаметр трубы;

d_1 – поперечный размер сечения профилированной трубы;

d_2 – продольный размер сечения профилированной трубы;

E – коэффициент эффективности ребра;

Eu – число Эйлера;

h – высота ребра;

H_1 – площадь теплообменной поверхности одного погонного метра длины оребренной трубы;

L – общая длина труб теплообменника;

l – длина ребра;

Nu – число Нуссельта;

ΔP – аэродинамическое сопротивление;

q_1 – теплоотвод с одного погонного метра ребристой трубы;

Re – число Рейнольдса;

S_1 – поперечный шаг труб;

S_2 – продольный шаг труб;

t – шаг ребер;

U – скорость потока;

α – коэффициент теплоотдачи;

δ – толщина ребра;

Π – показатель компактности поверхности;

Ψ – коэффициент оребрения.

Индексы:

k – конвективный;

$пр$ – приведенный;

h – осредненный по высоте ребра.

В настоящее время в связи со значительным подорожанием всех видов материальных и энергетических ресурсов на первый план вышли задачи ресурсо- и энергосбережения. Важным направлением решения этих задач является разработка и внедрение новых видов развитых конвективных поверхностей теплообмена, отличающихся высокой теплоаэродинамической эффективностью, технологичностью и невысокой стоимостью производства.

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

Во-первых, 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 производствен-

ных 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.

Во-вторых, 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 в Украине, как и 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, газовой, 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.

В-третьих, без внедрения новых видов оребренных поверхностей 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 гидро-ресурсов и необходимости размещения энергоустановок вне связи с источниками пресной воды. О масштабах проблемы можно судить по следующим характерным примерам: для изготовления водяного экономайзера котла П-57Р блока 500 МВт требуется 20 км, для котла-утилизатора ПГУ мощностью 800 МВт – 300 км, для сухой градирни блока 500 МВт – 3000 км оребренных труб.

В-четвертых, 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. На сегодняшний день имеется ряд проектов и действующих установок-утилизаторов, в том числе и разработанных в НТУУ “КПИ”, однако объемы и масштабы их внедрения очень малы относительно отмеченного выше потенциала.

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. Трубы собираются в пакеты, имеющие, как правило, шахматную компоновку. Типы оребренных труб отличаются геометрическими, массовыми, теплоаэродинамическими характеристиками и технологией изготовления.

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.

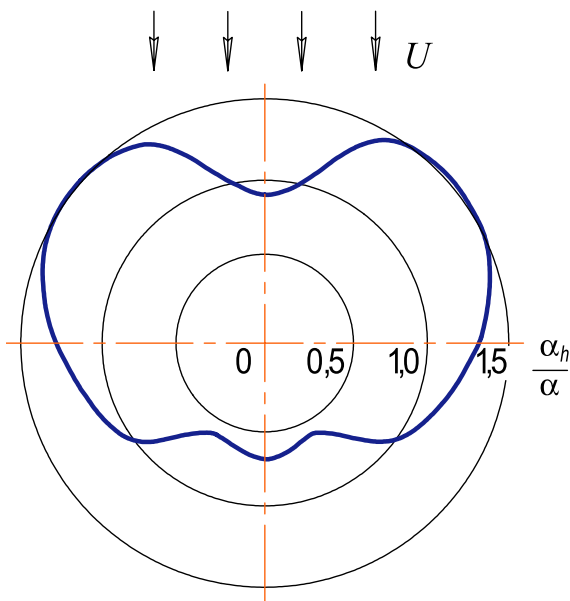


Рис. 1. Распределение осредненной по высоте ребра относительной интенсивности теплоотдачи для труб, расположенных в шахматном пакете с $S_1/d = 3,02$; $S_2/d = 1,30$.

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 оборудова-

ния не позволяет наращивать в Украине необходимые производственные мощности.

Относительно широкое распространение в качестве элементов воздушных конденсаторов и сухих градирен получили профилированные (овальные) оребренные трубы фирм GEA и "Balcke-Dürr". 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 поверхностей 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.

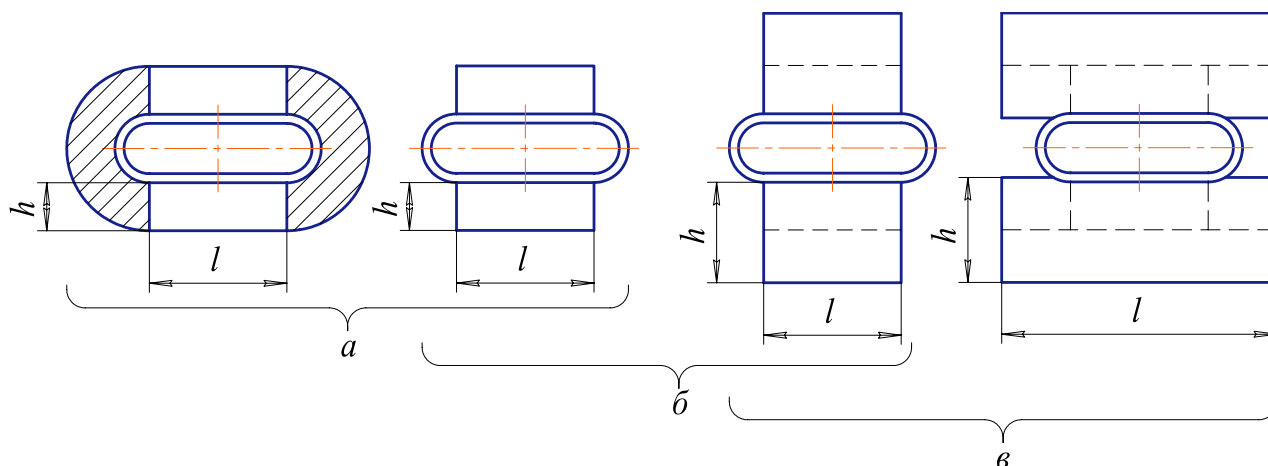


Рис. 2. Принцип формирования неполного оребрения труб плоско-овального профиля.

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 труб плоско-овального профиля (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-Dürr” 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.

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 межреберные полости от переднего края ребра (рис. 3, а) и из не занятого ребрами пространства перед лобовой частью несущей трубы (рис. 3, б). Этим достигается некоторое повышение интенсивности теплообмена, сопоставимое с эффектом от действия подковообразного вихря в лобовой части полностью оребренной трубы.

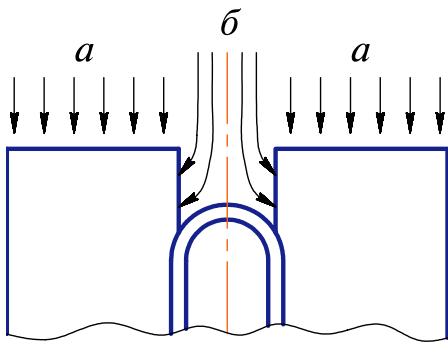


Рис. 3. Схема течения в передней части плоско-овальной трубы с неполным оребрением:
а – фронтальная часть потока; **б** – часть потока, попадающего в межреберные полости из не занятого ребрами пространства перед лобовой частью несущей трубы.

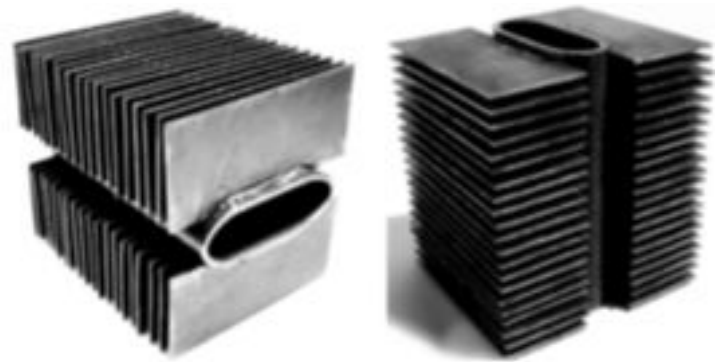


Рис. 4. Плоско-овальные трубы с неполным оребрением.

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: $S_1/d_1 = 4,3...9,0$; $S_2/d_1 = 3,31...5,33$; $S_1/S_2 = 0,99...2,55$. Получен обширный экспериментальный материал, а также обобщающие за-

висимости для теплообмена и аэродинамического сопротивления пакетов плоско-овальных труб с неполным оребрением, которые легли в основу соответствующих инженерных методик расчета.

Проводилось сопоставление характеристик исследуемых труб с характеристиками близких по площади внутреннего сечения труб наиболее распространенных типов: стальных овальных оцинкованных труб фирмы “Valcke-Dürr”, 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 теплоаэродинамическую эффективность, несмотря на относительно низкую теплопроводность стальных ребер по сравнению с алюминиевыми.

Табл. 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

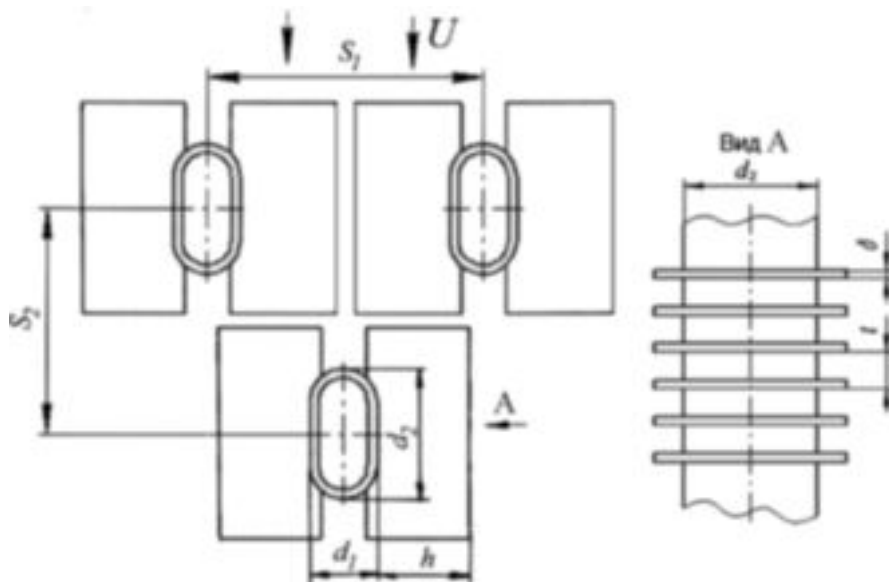


Рис. 5. Геометрические характеристики плоско-овальных труб с неполным оребрением.

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 ($\alpha_k, \alpha_{пр}$), 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 ($\alpha_k,$

$\alpha_{пр}$), 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

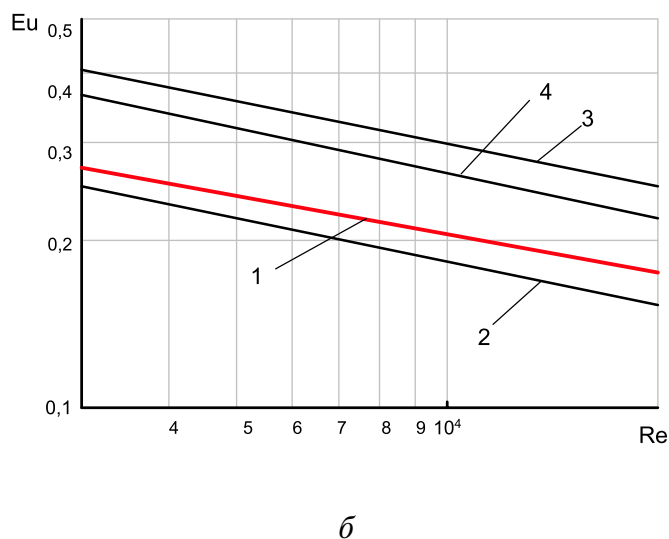
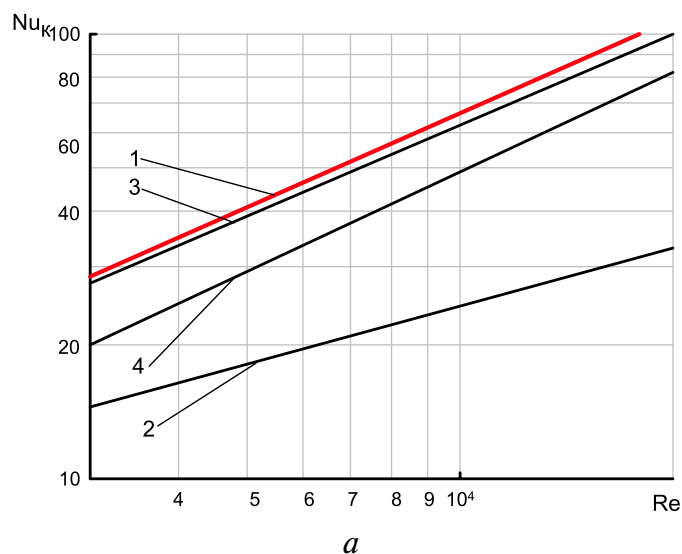


Рис. 6. Сопоставление интенсивности теплоотдачи (а) и аэродинамического сопротивления (б) пакетов плоско-овальных труб с неполным оребрением (1), овальных труб с овальным оребрением (2), круглых труб с приварным винтовым оребрением (3) и биметаллических труб (4).

Табл. 2. Характеристики сравниваемых оребренных труб

| № п/п | Наименование величины | Обозначение | Размерность | Плоско-овальная труба с неполным оребрением | Овальная труба с овальным оребрением | Труба с приварным винтовым оребрением | Биметаллическая труба |
|-------|---|-------------|-------------------|---|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------|
| 1 | Относительное удлинение профиля несущей трубы | d_2/d_1 | – | 2,8 | 2,6 | – | – |
| 2 | Диаметр несущей трубы | d | мм | – | – | 32,0 | 27,4 |
| 3 | Коэффициент оребрения | ψ | – | 15,2 | 10,2 | 7,4 | 19,2 |
| 4 | Поверхность одного погонного метра | H_1 | м ² /м | 1,53 | 0,841 | 0,744 | 1,64 |
| 5 | Материал несущей трубы | – | – | Углерод. сталь | Углерод. сталь | Углерод. сталь | Углерод. сталь и алюминий |
| 6 | Материал ребер | – | – | Углерод. сталь | Углерод. сталь | Углерод. сталь | Алюминий |

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. При этом заметному сокращению объема экспериментов способствовало применение численного моделирования на основе программного пакета “COSMOS-FloWorks”.

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.

Табл. 3. Сопоставление характеристик вариантов воздушного конденсатора

| Номер варианта | | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|--------------------------------------|---|-----------------------|
| Тип труб теплообменной поверхности | | Плоско-овальные трубы с неполным оребрением | Овальные трубы с овальным оребрением | Круглые трубы с приварным винтовым 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 |
| 1 | Общая длина оребренных труб, L , м | 373 | 865 | 540 | 411 |
| 2 | Тепловая мощность, отводимая от 1 погонного метра длины труб, q_1 , кВт/м | 3,43 | 1,48 | 2,36 | 3,11 |
| 3 | Аэродинамическое сопротивление пакета оребренных труб, ΔP , Па | 142 | 138 | 329 | 229 |
| 4 | Показатель компактности теплообменной поверхности, P , м ² /м ³ | 393 | 323 | 253 | 421 |

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 P .

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 GEA с близкой к максимально возможной для труб круглого профиля степени 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 сталь-

ных 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.

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

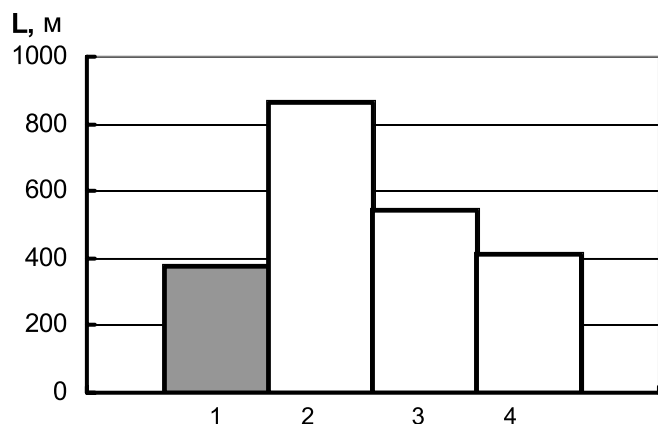


Рис. 7. Сопоставление общих длин L труб вариантов воздушного конденсатора:

- 1 – плоско-овальные трубы с неполным оребрением;
2 – овальные трубы с овальным оребрением;
3 – круглые трубы с приварным винтовым оребрением;
4 – биметаллические трубы.**

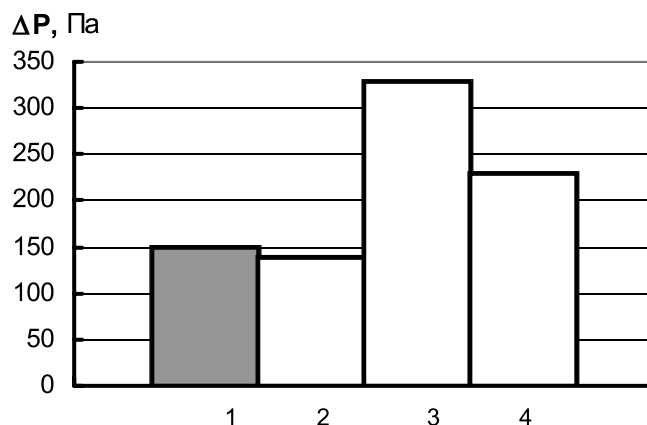


Рис. 8. Сопоставление вариантов воздушного конденсатора по аэродинамическому сопротивлению:

- 1 – плоско-овальные трубы с неполным оребрением;
2 – овальные трубы с овальным оребрением;
3 – круглые трубы с приварным винтовым оребрением;
4 – биметаллические трубы.**

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.

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 поверхнос-

тям из биметаллических труб, для которых характерны наибольшие значения величины Π среди развитых трубчатых поверхностей. При этом следует учитывать отмеченную выше особенность плоско-овальных труб с неполным оребрением, заключающуюся в том, что теплоаэродинамическая эффективность единицы поверхности таких труб выше, чем у полностью оребренных труб, поверхность которых включает низкоэффективные участки, находящиеся в аэродинамической тени.

Выводы

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 внедре-

ние предлагаемых новых теплообменных поверхностей приведет к ощутимой экономии материальных и энергетических ресурсов.

ЛИТЕРАТУРА

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 Е.М., Терех О.М., Рогачов В.А., Бурлей В.Д.* Теплообмінна труба / Деклараційний патент на корисну модель. 4871. Україна. 15.02.2005 р., бюл. № 2.
7. *Письменный Е.М., Терех О.М., Рогачов В.А., Бурлей В.Д.* Теплообмінна труба / Патент України 2007 р. на корисну модель. № 25025. Україна. 25.07.2007р., бюл. №11.

Получено 07.08.2007 г.