

УДК 536.24:533.6.011

ТЕРЕХ А.М.¹, БАГРИЙ П.И.¹,
ЛИТВИНЕНКО Н.Н.², НИКОЛАЕНКО Ю.Е.², СЕМЕНЯКО А.В.¹

¹Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”

²Министерство промышленной политики Украины

ИСПЫТАНИЯ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА МОДУЛЯ ВОЗДУШНОГО ОХЛАДИТЕЛЯ

Проведено теплотехнічні випробування дослідного зразка модуля повітряного охолоджувача. В якості теплообмінної поверхні використовувалися нові плоско-овальні труби з неповним оребренням. Перевагами такого типу труб є їх низький аеродинамічний опір, високі теплопередавальні характеристики, висока технологічність, що визначає малі строки окупності теплообмінного обладнання з таких труб.

Проведены теплотехнические испытания опытного образца модуля воздушного охладителя. В качестве теплообменной поверхности использовались новые плоско-овальные трубы с неполным оребрением. Преимуществом такого типа труб является их низкое аэродинамическое сопротивление, высокие теплопередающие характеристики, высокая технологичность, определяющие малые сроки окупаемости теплообменного оборудования из таких труб.

We have performed heat-engineering tests of an experimental sample of the module of air cooler. New plate-oval tubes with incomplete fins were used as a heat-exchange surface. Advantages of such type of tubes consist of their low aerodynamic resistance, good heat transfer characteristics, and high adaptability to manufacture, determining small terms of pay-back period of heat-exchange equipment with such tubes.

c_p – массовая теплоемкость;
 k – коэффициент теплопередачи;
 t – температура воды;
 E – коэффициент эффективности ребра;
 F – площадь фронтального сечения на выходе;
 G – расход;
 H – полная внешняя поверхность труб;
 P – давление;
 Q – тепловосприятие;
 W – скорость потока;
 α – коэффициент теплоотдачи;
 δ – толщина стенки;
 λ – коэффициент теплопроводности;
 θ – температура воздуха;
 Δt – среднелогарифмический температурный напор;
 ΔP – аэродинамическое сопротивление.

Индексы:

в – вода;
вн – внутренний;
воз – воздух;
вых – выход;
гл – гладкий;
ж – живое сечение;
исп – испытание;
к – конвективный;
н – набегающий;
пр – приведенный;
рас – расчетный;
рб – ребро;
с – свободное поперечное сечение;
1 – вход;
2 – выход.

Введение

В настоящее время высокие темпы развития различных отраслей промышленности (химической, нефтеперерабатывающей, газотранспортной и др.), создание новых технологий требует решения одной из важнейших задач: сокращения всех видов энергетических и материальных за-

трат, снижения потребления пресной воды, острый дефицит которой в Украине ощущается на протяжении последних лет. Такую задачу можно решить только при внедрении в производство аппаратов воздушного охлаждения (АВО), использование которых в различных технологических процессах позволяет, в частности, сократить потребление охлаждающей пресной воды до 70...80 % [1].

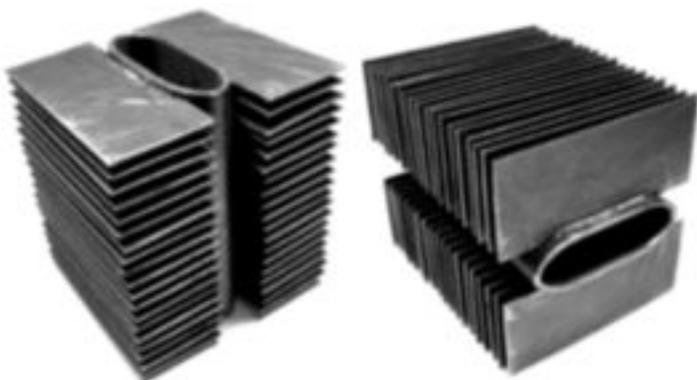


Рис. 1. Плоско-овальная труба НТУУ „КПИ” с неполным поперечным оребрением.

В качестве поверхностей нагрева в АВО в основном используются биметаллические оребренные трубы круглого профиля [2–6]. Однако такие трубы довольно дорогие из-за использования алюминия и энергозатратные при производстве. Кроме того, аэродинамическое сопротивление пакетов оребренных труб круглого профиля в 1,3...1,5 раза выше, чем у пакетов из труб овального или плоско-овального профилей [1,7].

В НТУУ “КПИ” разработан новый тип оребренных труб плоско-овального профиля с неполным оребрением [8,9] (рис. 1), которые могут использоваться в качестве элементов теплообменных поверхностей. Применение таких труб в различных теплообменных устройствах позволяет достигать высокой степени развития поверхности, получать достаточно высокий уровень теплосъема с погонного метра длины труб и значительно снизить аэродинамическое сопротивление. При изготовлении таких труб используется высокопроизводительная и дешевая технология контактной сварки, обеспечивающая практически идеальный термический контакт между ребром и стенкой несущей трубы.

В работе [1] представлены некоторые результаты проведенных в НТУУ “КПИ” экспериментальных исследований теплообмена и аэродинамического сопротивления шахматных пучков плоско-овальных труб с неполным оребрением. Используя результаты исследований [1,7], было проведено сравнение таких пучков труб с пучками труб кругло-ребристого профиля по теплоаэродинамической эффективности. Сравнитель-

ный анализ показал конкурентоспособность плоско-овальных труб по отношению к кругло-ребристым стальным и биметаллическим трубам с поперечным оребрением.

Широкое использование труб плоско-овального профиля с неполным оребрением невозможно без проведения на первом этапе внедрения теплотехнических испытаний, сопоставления и анализа расчетных и фактических данных.

На основании экспериментальных данных по теплообмену и аэродинамическому сопротивлению в НТУУ “КПИ” был спроектирован опытный образец модуля воздушного охладителя тепловой мощностью 25 кВт с теплообменной поверхностью в виде шахматного пучка плоско-овальных труб с неполным оребрением.

Теплотехнические испытания проведены на разработанном в НТУУ “КПИ” и изготовленном совместно с Институтом электросварки им. Е.О. Патона опытном модуле воздушного охладителя.

Конструкция модуля воздушного охладителя

Воздушный охладитель представляет собой компактную конструкцию, объединяющую в себе теплообменную секцию и осевой вентилятор (рис. 2).

Секция лежит на раме прямоугольного сечения, выполненной из швеллера. К раме приварены четыре опорные стойки, на которых крепится вся конструкция модуля охладителя. Осевой вентилятор подсоединяется через переходной фланец и диффузор к теплообменной секции. Воздух, перемещаемый вентилятором снизу вверх, омывает внешнюю ребристую поверхность труб. Таким образом, осуществляется однопоточная схема поперечного обтекания теплообменной секции, работающей под наддувом. Движение охлаждаемой воды происходит внутри плоско-овальных труб.

Теплообменная секция состоит из трубного пучка и двух водяных камер, герметично соединенных между собой. Для направления потока воздуха в межтрубное пространство на боковых сторонах секции установлены ограждающие листы (рис.2). На рис.3 схематично изображена теплообменная секция охладителя. В табл. 1 приведены геометрические характеристики секции.



а



б

Рис. 2. Общий вид воздушного охладителя с теплообменной секцией из плоско-овальных труб с неполным оребрением: а – графическая модель; б – фотография воздушного охладителя.

Теплообменная секция изготовлена из плоско-овальных труб с неполным оребрением, расположенных в шахматном порядке (рис. 4). Труб-

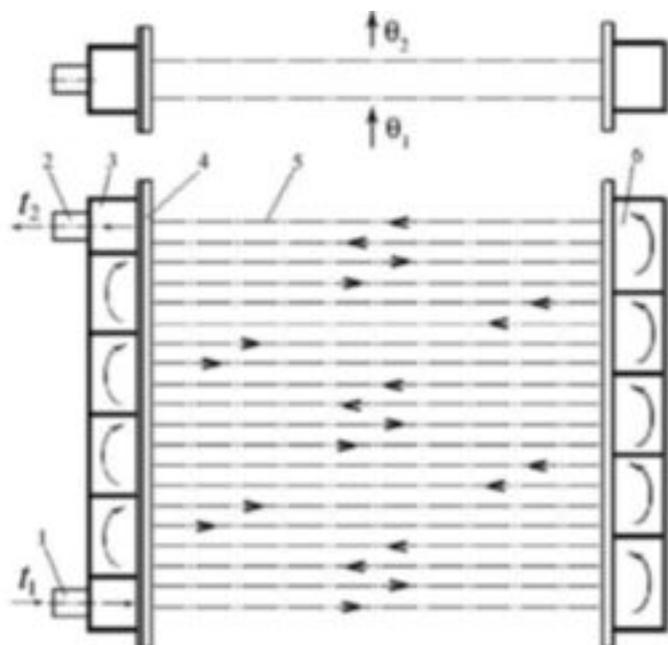


Рис. 3. Схема теплообменной секции воздушного охладителя:

- 1 – входной патрубок; 2 – выходной патрубок;
3 – передняя камера; 4 – трубная решетка;
5 – пучок труб; 6 – задняя камера.**

ный пучок имел двухрядную по ходу воздуха компоновку с числом труб в каждом ряду, равном 10. Соединение труб с трубными досками осуществлялось электродуговой сваркой. В табл. 2 представлены конструктивные характеристики труб, которые использовались при изготовлении теплообменной секции.

Подвод горячей и отвод охлажденной воды осуществлялся через патрубки диаметром 38 мм. Выходной патрубок имел “воздушник” для контроля заполненности водой трубного пучка и выпуска воздуха. Через входной патрубок горячая вода попадала в первый отсек передней камеры и поступала одновременно в две трубы первого и второго по ходу воздуха рядов пучка. Пройдя эти трубы, вода в отсеке задней камеры разворачивалась на 180° и через две соседние трубы первого и второго рядов поступала обратно в следующий отсек передней камеры.

Результаты испытаний модуля воздушного охладителя

Для теплотехнических испытаний модуля охладителя разработан и изготовлен экспериментальный стенд, принципиальная схема которого показана на рис.5. На стенде использовалась за-

Табл. 1. Конструктивные характеристики теплообменной секции

Наименование величины	Обозн.	Значения
Поперечный шаг труб	S_1 , мм	65,0
Продольный шаг труб	S_2 , мм	60,0
Количество труб в одном поперечном ряду	z_1	10
Количество поперечных рядов	z_2	2
Общее количество труб	n	20
Длина одной трубы	L , м	0,7
Полная поверхность труб со стороны воздуха	H , м ²	20,5
Внутренняя поверхность труб со стороны воды	$H_{\text{вн}}$, м ²	1,275
Размеры сечения на выходе для прохода воздуха	$A \times B$, м	0,7x0,685

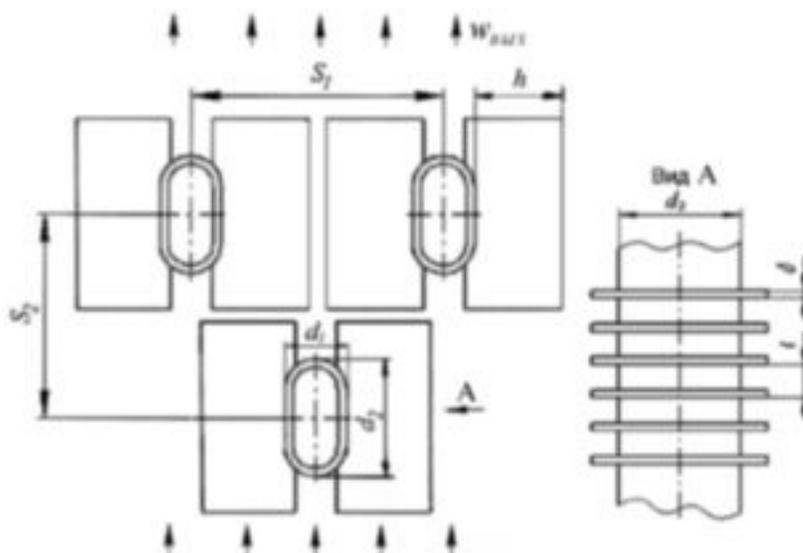


Рис. 4. Геометрические характеристики пучка плоско-овальных труб с неполным обрешением (обозначения величин – в табл.1 и 2).

мкнутая система циркуляции воды. В водяной бак (3) вода поступала из водопроводной магистрали, расход ее контролировался ротаметром (6). Поступающая в воздушный охладитель из водяного бака вода предварительно нагревалась в водогрейном котле (2). Уровень воды в баке контролировался с помощью гидростатического уровнемера (7). Для организации вынужденного движения воды в контуре использовался питательный насос (4), который обеспечивал расход воды через воздушный охладитель (1) до 0,4 кг/с. Расход воды определялся расходомерным устройством (5). Охлажденная в секции вода поступала обратно в водяной бак.

Теплотехнические испытания охладителя проводились при постоянных расходах теплоносителей.

При этом измерялись следующие рабочие параметры охладителя: температуры воды и воздуха на входе и выходе из секции, расход воды, скорость воздуха на выходе из секции, давление воды на входе и выходе, аэродинамическое сопротивление секции. Для этого на входном и выходном патрубках охладителя закреплялись штуцеры-наконечники (9,10), предназначенные для установки в них стеклянных термометров и манометров для измерения температуры и давления воды на входе и выходе из охладителя. Для измерения температур воды и воздуха использовались ртутные термометры с ценой деления 0,1С.

Температуры стенки несущей трубы и ребра на входе и выходе воды измерялись при помощи 6 медь-константановых термопар (11) диаметром

Табл. 2. Конструктивные характеристики оребренных труб

Наименование величины	Обозн.	Значения
Поперечный размер несущей трубы	d_1 , мм	15,0
Продольный размер несущей трубы	d_2 , мм	42,0
Коэффициент оребрения	ψ	15,16
Поверхность одного погонного метра трубы	$H_{\text{ПМ}}$, м ²	1,533
Материал труб и ребер	–	Углеродистая сталь

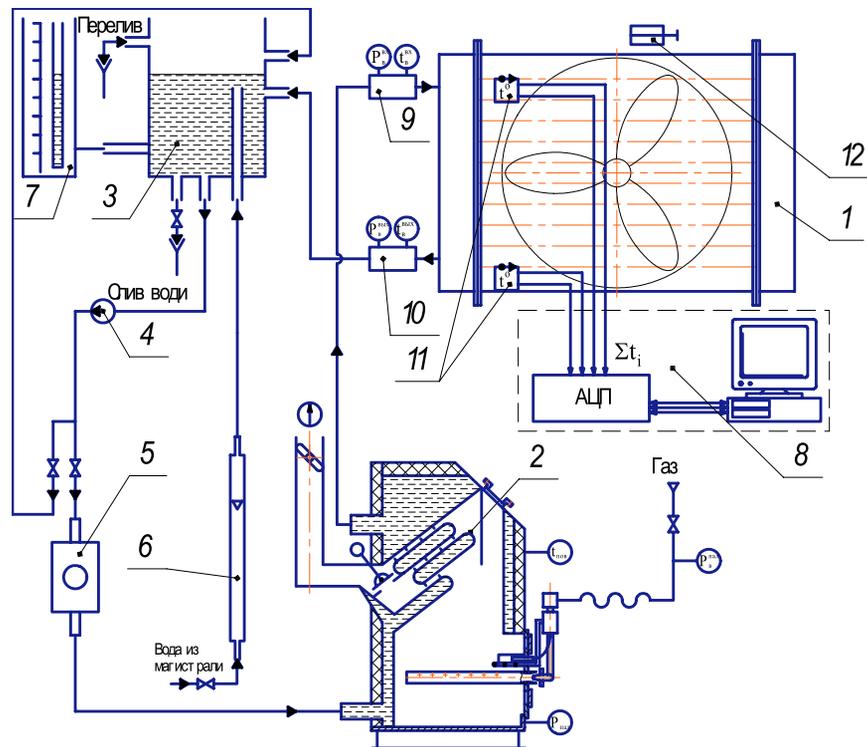


Рис. 5. Схема испытательного стенда.

провода 0,08 мм. Сигналы от термопар поступали в аналогово-цифровой преобразователь I-7018 (8), подключенный к переносному компьютеру, и автоматически записывались. Термопары T1, T2 и T5, T6 располагались в кормовой части несущей трубы второго по ходу воздуха ряда соответственно на входе и выходе воды из охладителя. Термопары T3, T7 закреплялись на середине высоты кормовой части торца ребра. Схема расположения термопар на трубах и ребрах показаны на рис. 6. Данные по измерениям температуры стенки несущей трубы позволили при проведении испытаний оценить $\alpha_{\text{пр}}$ и сравнить его с расчетным значением.

Измерения скоростей и температур воздуха на выходе из проточной части теплообменной сек-

ции производились по рекомендациям [10] в 16 точках электронным анемометром-термометром TMA-10 (12), позволявшим измерять значения скорости с точностью 0,01 м/с, температуры – 0,1С. На рис.6,а приведена схема размещения точек измерения температур и скоростей охлаждающего воздуха на выходе из секции.

По данным измерений температур и скоростей воздуха в шестнадцати равновеликих мерных сечениях, на которые было разбито выходное окно короба, определялись средняя температура и средняя скорость на выходе из секции по формулам:

$$\theta_2 = \frac{\sum_{i=1}^{16} \theta_i}{16} ; W_{\text{вых}} = \frac{\sum_{i=1}^{16} W_i}{16} ,$$

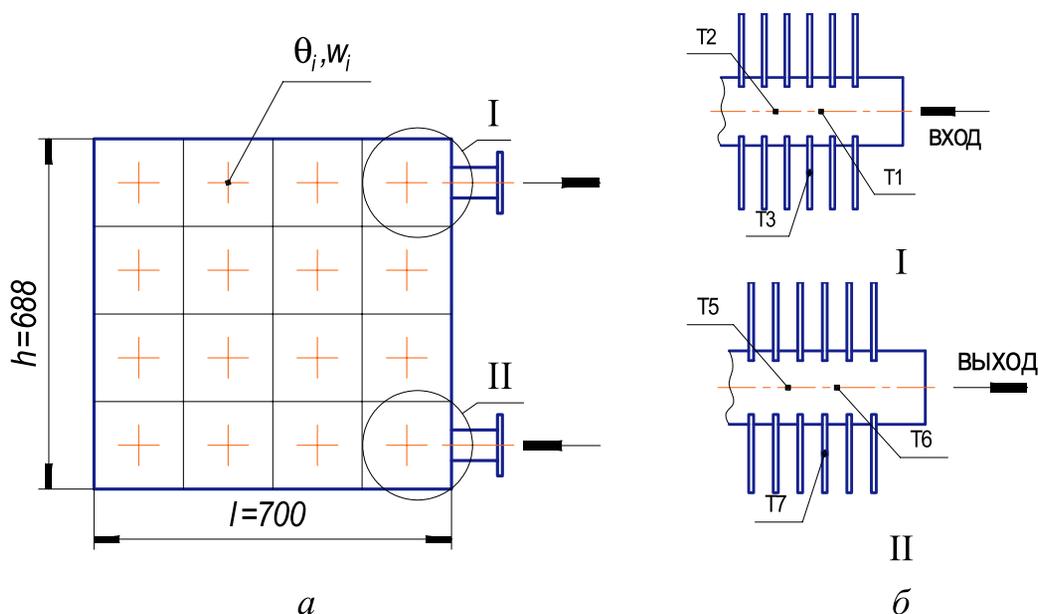


Рис. 6. Размещение точек измерения температур и скоростей: а – выходное окно модуля; б – размещение термопар на оребренной трубе.

где θ_i , W_i – температура и скорость воздуха в i -ой точке сечения.

По значению средней скорости на выходе и площади свободного поперечного сечения секции определялся средний расход воздуха на выходе:

$$G_{\text{воз}} = W_{\text{вых}} F_C.$$

Зная входные и выходные температуры, а также расходы теплоносителей, определялось количество теплоты, отданное водой Q_B и воспринятое воздухом $Q_{\text{воз}}$:

$$Q_B = G_B c_p^B (t_1 - t_2),$$

$$Q_{\text{воз}} = G_{\text{воз}} \rho c_p (\theta_2 - \theta_1).$$

Отношение величин Q_B и $Q_{\text{воз}}$ дает расхождение балансов в процентах, составляющее $< 4\%$, что является приемлемой величиной для такого типа теплотехнических испытаний [10] и указывает на стабильность исследуемого режима, правильность методики измерений и обработки материалов испытаний. В табл. 3 приведены результаты испытаний модуля воздушного охладителя.

Полученные при проведении испытаний данные позволили определить коэффициент теплопередачи от воды к воздуху:

$$k_{\text{исп}} = \frac{Q}{H \Delta t}$$

Расчетные значения коэффициента теплопередачи определялись по формуле

$$k_{\text{рас}} = \frac{\psi}{\frac{H}{H_{\text{вн}}} \frac{1}{\alpha_B} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{\text{пр}}}}$$

Коэффициент тепловой эффективности $\psi = 0,9$ принят по рекомендациям [7,11], коэффициент теплоотдачи от воды к стенке трубы α_B рассчитывался по [12].

Приведенный коэффициент теплоотдачи $\alpha_{\text{пр}}$ рассчитывался по известной зависимости [7, 11]

$$\alpha_{\text{пр}} = \alpha_k \left(\frac{H_{\text{рб}}}{H} E + \frac{H_{\text{гл}}}{H} \right)$$

Коэффициент эффективности ребра плоскостной оребренной трубы E , входящий в выражение для $\alpha_{\text{пр}}$ и зависящий от материала, формы, размеров ребра, а также от длины линии его контакта с несущей трубой, определялся экспериментально.

Для измерения потерь давления воздуха, проходящего через секцию в две смежные стенки

Табл. 3. Результаты испытаний модуля охладителя

№ п/п	Наименования	Обозн.	Размерность	Результат
Воздушный тракт				
1	Температура воздуха на входе в модуль	θ_1	°С	15,6
2	Температура воздуха на выходе из модуля	θ_2	°С	25,0
3	Скорость воздуха на выходе из модуля	$W_{\text{вых}}$	м/с	4,3
7	Барометрическое давление	B	мм рт.ст.	743
8	Расход воздуха	$G_{\text{воз}}$	м ³ /с	2,11
9	Скорость воздуха в живом сечении секции	$W_{\text{ж}}$	м/с	6,86
10	Тепловосприятие со стороны воздуха	$Q_{\text{воз}}$	кВт	24,0
11	Аэродинамическое сопротивление секции	$\Delta P_{\text{исп}}$	Па	42,0
Водяной тракт				
12	Температура воды на входе в модуль	t_1	°С	79,5
13	Температура воды на выходе из модуля	t_2	°С	61,5
14	Давление воды на входе в модуль	P_1	кПа	132
15	Давление воды на выходе из модуля	P_2	кПа	125
18	Расход воды	$G_{\text{в}}$	кг/с	0,33
19	Скорость воды в трубах	$W_{\text{в}}$	м/с	0,43
20	Тепловая мощность со стороны воды	$Q_{\text{в}}$	кВт	24,9
21	Величина расхождения теплового баланса (вода-воздух)	ΔQ	%	3,6
22	Гидравлическое сопротивление модуля	$\Delta P_{\text{в}}$	кПа	7
24	Коэффициент теплопередачи	$k_{\text{исп}}$	Вт/(м ² ·К)	24,4

диффузора и в две стенки измерительного корпуса, вмонтированы штуцера для отбора статического давления. Перепад статического давления определялся микроманометром ММН – 240 (5) II классом точности 1,0. Полученные данные при испытании сравнивались с расчетными данными и определялось расхождение в процентах между ними.

По показаниям манометров, установленных на входе и выходе воды из теплообменной секции, определялось гидравлическое сопротивление внутри секции труб, которое удовлетворительно согласуется с расчетной методикой определения сопротивления внутри труб [13].

Полученные при испытании значения $k_{\text{исп}}$ сравнивались с расчетными и эксперименталь-

ными данными, полученными при исследовании теплообмена пучков плоско-овальных труб с неполным оребрением [14]. В табл. 4 приведены значения коэффициентов теплопередачи, полученные как расчетным путем, так и при проведении испытаний.

Выводы

1. Испытания подтвердили заявленные характеристики теплообмена и аэродинамического сопротивления пакетов плоско-овальных труб с неполным оребрением, что позволяет рекомендовать данный тип развитой поверхности для внедрения в промышленность.

Табл. 4. Сравнение расчетных и полученных при испытании данных

№ п/п	Наименования	Обозн.	Результат		Расхождение, δ , %
			Испытания	Расчет	
1	Аэродинамическое сопротивление секции, Па	ΔP	42,0	46,6	9,9
2	Теплопродуктивность, кВт	Q	24,9	26,55	6,2
3	Коэффициент теплопередачи, Вт/(м ² ·К)	k	24,4	25,9	6,1

2. Предлагаемый тип оребренных труб обладает высокой технологичностью, теплопередающими характеристиками и низким аэродинамическим сопротивлением, что определяет малые сроки окупаемости теплообменного оборудования из таких труб.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Письменный Е.Н.* Новые эффективные развитые поверхности теплообмена для решения задач энерго-и ресурсосбережения// Пром. теплотехника. – 2007. – Т.29, №5. – С. 7–16.

2. *Берлинер Ю.И., Балашов Ю.А.* Технология химического и нефтяного аппаратостроения. – М.:Машиностроение, 1976. – 256 с.

3. *Мулин В.П., Черников Н.И.* Новый технологический процесс и оборудование для оребрения труб лентой// Кузнечно-штамповочное производство. – 1985. – №12. – С. 20.

4. *Бурков В.В.* Алюминиевые теплообменники сельскохозяйственных и транспортных машин. – Л.: Машиностроение, 1985. – 239 с.

5. *Кунтыш В.Б., Кузнецов Н.М.* Тепловой и аэродинамический расчеты оребренных теплообменников воздушного охлаждения. – С-Пб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петерб. отд., 1992. – 280 с.

6. *Бессонный А.Н., Дрейцер Г.А., Кунтыш В.Б. и др.* Основы расчета и проектирования теплооб-

менников воздушного охлаждения: Справочник. – С-Пб.: Недра, 1996. – 512 с.

7. *Письменный Е.Н.* Теплообмен и аэродинамика пакетов поперечно-оребранных труб. – К.: Альтерпрес, 2004. – 244 с.

8. *Письменный С.М., Терех О.М., Рогачов В.А., Бурлей В.Д.* Теплообмінна труба // Декларацийний патент на корисну модель. Україна. – №4871.15.02.2005. Бюл. № 2.

9. *Письменный С.М., Терех О.М., Рогачов В.А., Бурлей В.Д.* Теплообмінна труба. //Патент на корисну модель. Україна. № 25025 25.07.2007. Бюл. №11.

10. *Крюков Н.П.* Аппараты воздушного охлаждения – М.:Химия, 1983. – 168 с.

11. *РТМ 108.030.140-87* Расчет и рекомендации по проектированию поперечно - оребренных конвективных поверхностей нагрева стационарных котлов. – 1988. – 30 с.

12. *Михеев М.А., Михеева И.М.* Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1973. – 320 с.

13. *Локшин В. А. и др.* Гидравлический расчет котельных агрегатов (Нормативный метод). – М.: Энергия, 1978. – 256 с.

14. *Багрий П.И., Терех А.М., Рогачев В.А.* Сравнение тепловой эффективности шахматных пучков поперечно-оребранных труб различного профиля//Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2007. – №6/5 (30). – С. 51-56.

Получено 06.02.2008 г.