

Изследване на топлосообменните характеристики на оребрен термосифонен водонагревател

Веселка Камбурова, Илия Илиев, Милен Венев

A study of Heat & Mass Transfer Characteristics of Fin-Tube Thermosyphon Water Heater: The paper presents construction of fin-tube thermosyphon water heater working with steam boiler PKG-4. The experimental data for different flow of flue gasses are presented. The Nusselt number and convection coefficient are calculated for staggered tube banks and for in-line array. The suitable methodology for calculations is choosed.

Key words: Convection coefficient, Fin tube, Heat exchanger, Nusselt number, Reynolds number Thermosyphon water heater.

ВЪВЕДЕНИЕ

При изгаряне на течни и газообразни горива с димните газове се отнася значително количество топлина, която може да бъде утилизирана. За тази цел са разработени редица топлообменни апарати за подгриване на питателна вода или въздух за горене. Едно от възможните конструктивни решения е термосифонен водонагревател с оребрени тръби от страна на димните газове.

В настоящата разработка е представен експериментален водонагревател с оребрени метални тръби за утилизация на топлина при изгаряне на природен газ/метан. Съоръжението е монтирано на изхода по димни газове на съществуващ парогенератор №2 от типа ПКГ-4 с топлинна мощност 2,88 MW в котелен цех на „Вини“ АД - гр. Сливен. Проведени са редица експерименти при различна степен на натоварване на парогенератора с цел определяне ефективността на водонагревателя. На база на резултатите от експеримента са определени коефициентите на топлопредаване от димните газове към оребрените тръби при различни режими на работа на парогенератора.

ФОРМУЛИРОВКА НА ПРОБЛЕМА

1. Опитна установка

Разработен е проект и е изработен експериментален образец на водонагревател, изнесен тип, състоящ се от три секции. Първа и втора секция са еднотипни, изработени от два реда по 18 броя коридорно разположени термосифонни оребрени тръби. Изпарителната зона е разположена в среда на димни газове, където тръбите са оребрени с алуминиеви ламели с цел интензифициране на топлообмена. Зоната за кондензация е разположена във водна среда, като тръбите на термосифона са гладки без оребряване. Циркулацията на водата около топлинните тръби в зоната за кондензация е реализирана на два хода.

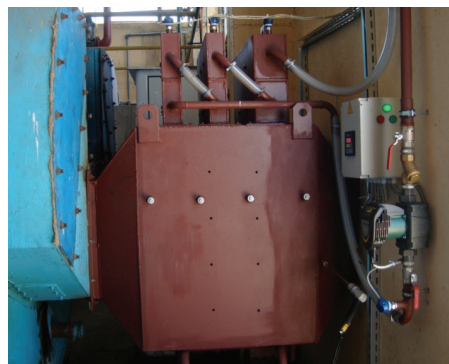
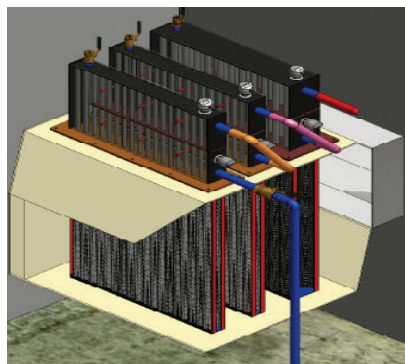
Третата секция на водонагревателя е изработена от 36 броя оребрени термосифонни тръби, разположени шахматно в три реда. Теплообменникът е предназначен за подгриване на вода, постъпваща от резервоара с химически очистена вода с температура в диапазона от 15°C до 65°C. Водонагревателят не влиза в контура под високо налягане на парогенератора. Разположението му е изцяло съобразено с разполагаемото пространство в котелното помещение. Геометричните размери на трите секции на разработения водонагревател са представени в Таблица 1. На фиг. 1 е показана схема на водонагревателя.

Водонагревателят е предназначен за утилизация на топлината на димните газове на изхода от парогенератор ПКГ- 4, произвеждащ 4 t/h суха наситена пара с работно налягане 13 bar и температура 194°C. Парогенераторът работи с коефициент на излишък на въздуха $\alpha \leq 1,15$. Димните газове напускат парогенератора

с температури в диапазона $150^{\circ}\text{C}\div 215^{\circ}\text{C}$. Те постъпват в топлообменника, където отдават част от топлината си на химически очистената вода (ХОВ). Живото сечение на водонагревателя е съобразено с желаните скорости на флуида за оптимален топлообмен. Хидравличните съпротивления са с ниски стойности и не влияят на работата на димосмукателния вентилатор и комина. Димните газове постъпват от лявата страна на водонагревателя в първа секция посредством преход с фланцеви връзки. Втора и трета секции са подредени последователно по пътя на димните газове.

Таблица 1. Основни характеристики на водонагревателя

Разположение на тръбите		шахматно	коридорно
Външен диаметър на тръбата	D mm	25	18
Външен диаметър на оребрена тръба	D_f mm	55	37
Височина ребро	h_p mm	15	9.5
Дебелина ребро	δ_p mm	0.2	0.6
Стъпка на оребряване	S_p mm	3	4.5
Коефициент на оребряване	-	17.08	7.59
Напречна стъпка	S_1 mm	56	38
Относителна стъпка	σ_1 -	2.24	2.11
Надлъжна стъпка	S_2 mm	49	38
Относителна стъпка	σ_2 -	1.96	2.11
Диagonalна стъпка	S_2' mm	56	
Относителна стъпка	σ_2' -	2.24	
Брой на тръбите в ред	n_1 бр.	12	18
Брой на редовете	z бр.	3	2
Дължина на тръбата	L mm	928	928
Коефициент на задръстване - фронтално	K_f	0.52	0.46
Коефициент на задръстване - diagonalно	K_d	1.18	
Хидравличен диаметър	D_h mm	1.52	0.73



Фигура 1. Общ вид на оребрен водонагревател с топлинни тръби [1]

Температурата на подхранващата вода преди да бъде монтиран топлообменника е 15°C . Циркулацията ѝ през топлообменника се осъществява

посредством циркуляционна помпа с честотно управление. Водата се подава от резервоара с ХВО. Предвидена е възможност по време на експеримента подгрятата вода да се връща в резервоара или да се изхвърля на канал. Разходът на вода може да се регулира в широк диапазон, което благоприятства провеждането на изпитания в различни работни режими.

2. Провеждане на експеримента

Експериментите са проведени на работещо оборудване при три различни натоварвания на парогенератора. Променян е и дебитът на химически очистената вода, постъпваща за нагряване във водонагревателя. При експериментите е осигурена възможност за промяна на нагрената повърхност чрез демонтаж на първа и втора секция, в които термосифоните са разположени коридорно.

По време на експериментите са измервани следните величини:

- Температура на димни газове в 4 точки (на входа на водонагревателя, на входа на втора и трета секция и на изхода от водонагревателя) - 8 канален микропроцесорен термометър с терморезистори Pt 100.
- Температура на питателна вода ((на входа на водонагревателя, на входа на втора и трета секция и на изхода от водонагревателя) -- 8 канален микропроцесорен термометър с терморезистори Pt 100.
- Разход на вода, преминаваща през водонагревателя - ултразвуков разходомер.
- Обемен разход на гориво - обемен разходомер.
- Съдържание на кислород, азотен оксид и въглероден диоксид в димните газове - газ анализатор TESTO.
- Скорост на димните газове в 12 точки след всяка секция на водонагревателя - тръба на Пито.

Отчетена е разликата между пълното и статично налягане в газохода. За максимална точност в пресмятанята скоростта на димните газове е изчислена на база горивен процес и сечения [4].

Резултатите от част от проведените експерименти са представени в Таблица 2. Разгледани са 3 режима на работа на котела, при което варират разходът и температурата на димните газове. Представени са температурите на димните газове и на водата по хода на топлообменника. С индекс 1 са означени температурите на входа на първата секция, индекс 2 - на входа на втората секция, индекс 3 - на входа на третата секция и индекс 4 - на изхода от топлообменника.

По разхода на димни газове и най-тясното сечение са изчислени скоростите на димните газове за коридорно и шахматно разпределение на тръбите. Резултатите са представени в Таблица 3.

Таблица 2. Резултати от експеримента

Разход вода	Разход на газ	Разход димни газове	t _{1H2O}	t _{2H2O}	t _{3H2O}	t _{4H2O}	t _{6ДГ}	t _{6ДГ}	t _{7ДГ}	t _{8ДГ}
m ³ /h	nm ³ /h	nm ³ /h	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
3.5	117.4	1364	26.0	27.0	28.0	33.7	155.0	153.0	147.0	96.0
3.3	166.6	1949	25.1	26.5	28.5	36.4	176.3	169.0	162.0	114.0
3.5	270	3158	26.9	29.9	31.8	44.4	203.5	190.8	181.0	141.5

3. Определяне на коефициента на топлопредаване от димните газове към оребрените тръби

Конвективният топлообмен в турбулентен поток в близост до повърхността на оребрена тръба е сложен процес, неподлежащ на строго теоретично описание. Проблемът се усложнява още повече при обтичане на оребрен тръбен сноп, тъй

като условията на обтичане на тръбите в първите и последващите снопове значително се различават. Първите два реда на снопа се обтичат от равномерен поток с малка турбулентност, а по нататък потокът се турбулизира. При напречно обтичане на оребрена тръба потокът се откъсва в задната половина от периметъра на тръбата и между тръбата и потока се формира клинообразна област с интензивно образуване на вихри, в която е възможно възникване на обратно течение. Силната завихреност на потока и генерираната от нея турбулентност от тази зона на откъсване се разпространява във външния поток. Увеличаването на турбулентността на външния поток подобрява топлоотдаването на тръбите в тръбния сноп и то нараства от ред на ред. В нашия случай този ефект не може да се наблюдава напълно, тъй като в секцията с коридорно разположение на тръбите има 2 реда, а в секцията с шахматно разположение - 3 реда тръби.

Таблица 3. Разход и скорости на димни газове

Величина	Дименсия	Шахматно	Коридорно
Димни газове - разход	nm ³ /s	0.38	0.38
Скорост газ	m/s	4.38	4.93
Димни газове - разход	nm ³ /s	0.54	0.54
Скорост газ	m/s	6.26	7.05
Димни газове - разход	nm ³ /s	0.88	0.88
Скорост газ	m/s	10.14	11.43

При напречно обтичане на сноп оребрени тръби се изчислява среден коефициент на топлопредаване $\alpha_{пр}$, тъй като коефициентът на топлопредаване е различен от повърхността на реброто и повърхността на тръбата. $\alpha_{пр}$ зависи от ефективността на ребрата E .

Авторите проведоха задълбочено литературно проучване на критериалните уравнения за изчисляване на топлопредаването при напречно обтичане на тръбен сноп. Представените критериални уравнения най-често имат вида:

$$Nu = C \cdot Re^n \cdot Pr^m, \quad (1)$$

където C , n и m са константи за дадения тип поток и геометрия на системата. В редица случаи при изчисляване на критерия на Нуселт се въвеждат и допълнителни коефициенти.

При изчисляване на критериите на подобие особено важна роля играят определящите параметри:

- определящ размер l_0 . От теорията на подобие не следва еднозначно кой размер трябва да се приеме като определящ. В работите на различни автори се среща голямо разнообразие на размери, прието като определящи. Поради това трябва да се подхожда много внимателно при избор на критериално уравнение.
- определяща температура - най-често се приема средната температура на газа.
- определяща скорост на потока - скорост в най-тясното сечение.

В резултат на проведеното проучване бяха избрани четири критериални зависимости, по които бе определен коефициентът на топлопредаване.

Според Engineering Science Data [6] за шахматно разположение на тръбите в снопа критерият на Нуселт се определя по:

$$Nu = 0.242 \cdot Re^{0.668} \cdot Pr^{0.33} \left(\frac{s}{l}\right)^{0.297} \left(\frac{x}{x_0}\right)^{-0.081} F_1 F_2 \quad (2)$$

при следните условия $2 \cdot 10^3 \leq Re \leq 4 \cdot 10^4$; $0.13 < \frac{s}{l} < 0.57$; $1.15 < \frac{x}{x_0} < 1.72$,

където F_1 - фактор за промяна на свойствата на флуида (само при високи температури), F_2 - фактор за броя на редовете тръби (за 3 реда $F_2 = 0.92$).

За коридорно разположение на тръбите :

$$Nu = 0.3 \cdot Re^{0.626} \cdot Pr^{0.33} \left(\frac{A}{A_T} \right)^{-0.376} \quad (3)$$

при следните условия $5 \cdot 10^3 \leq Re \leq 10^5$, ; $5 < \frac{A}{A_T} < 12$, където А - обща повърхност на един сектор, A_T - обща повърхност на тръбата за един сектор, D - външен диаметър на неоредбена тръба, D_f - външен диаметър на оредбена тръба, s - стъпка на оредбране, δ - дебелина на реброто, $l = (D_f - D)/2$ - дължина на реброто. Размерите са в m. Определящият размер е D.

$$A = \left[\frac{\pi}{2} (D_f^2 - D^2) \right] + \pi D_f \delta + \pi D s ; A_T = \pi D (s + \delta) \quad (4)$$

Резултатите от изчисленията са представени графично на Фигури 2 - 4 като вариант 1.

Външният диаметър на неоредбената тръба е приет като определящ и в методиката, описана в [5], според която за шахматно и коридорно разположение на тръбите:

$$Nu = 0.1378 \cdot Re^{0.718} \cdot Pr^{0.33} \left(\frac{s-\delta}{l} \right)^{0.3} \quad (5)$$

В този случай няма указани специални условия за стойностите на критерия на Рейнолдс. Резултатите от изчисленията са представени графично на Фигури 2 - 4 като вариант 2.

Редица автори [2, 3] приемат за определящ размер, който се изчислява по следната зависимост

$$l = \frac{A}{A_T} D + \sqrt{\frac{\pi}{4} (D_f^2 - D^2) \frac{A_f}{A_T}} \quad (6)$$

Препоръчва се критерия на Нуселт за шахматно разположение на тръбите в снопа да се изчислява по формулата:

$$Nu = 0.36 \cdot Re^n \cdot Pr^{0.33} C_2 C_s \varphi^{-0.5} \quad (7)$$

Критериалното уравнение (7) е в сила за $5 \cdot 10^3 \leq Re \leq 37 \cdot 10^4$, за коефициент на оредбране $1 \leq \varphi \leq 21.2$, за характерен размер $12 \leq l \leq 178$ mm и коефициент за форма на снопа $0.46 \leq C_s \leq 2.2$, C_2 е коефициент за броя на редовете в снопа и се определя по диаграма [2]. Степенният показател $n = 0.6\varphi^{0.07}$

За коридорно разположение:

$$Nu = 0.2 \cdot Re^n \cdot Pr^{0.33} C_2 C_s \varphi^{-0.7} \quad (8)$$

Критериалното уравнение (8) е в сила за $10^4 \leq Re \leq 37 \cdot 10^4$, за коефициент на оредбране $1 \leq \varphi \leq 18.5$, за характерен размер $27 \leq l \leq 178$ mm. Степенният показател $n = 0.65\varphi^{0.07}$.

Резултатите от изчисленията са представени графично на Фигури 2 - 4 като вариант 3.

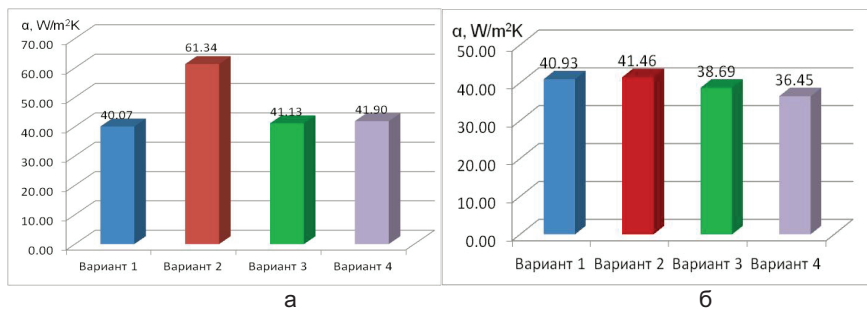
В четвъртия случай [2] като определящ размер е приета стъпката на оредбране s:

$$Nu = C Re^n \cdot Pr^{0.4} \left(\frac{D_f}{s} \right)^{-0.34} \left(\frac{l}{s} \right)^{-0.14} \quad (9)$$

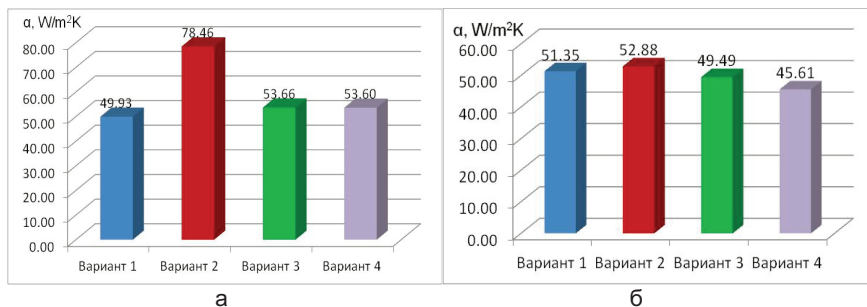
За коридорно разположение $C = 0.116$, $n = 0.72$, а за шахматно - $C = 0.25$, $n = 0.65$. Критериалното уравнение е в сила за $3 \cdot 10^3 \leq Re \leq 25 \cdot 10^3$ и $3 < \frac{D_f}{s} < 4.8$.

Резултатите от изчисленията са представени графично на Фигури 2 - 4 като вариант 4.

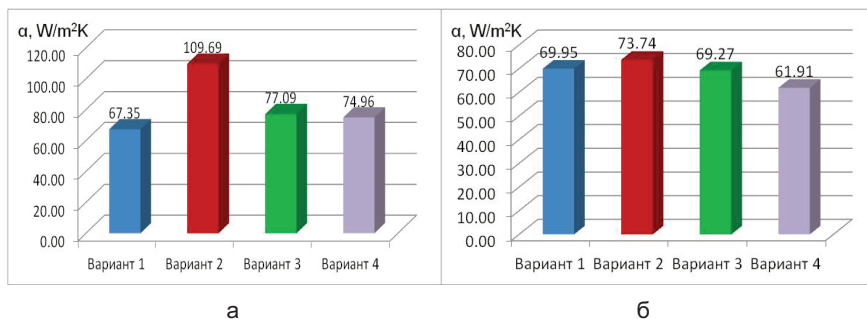
На фигури 3, 4 и 5 са представени коефициентите на топлопредаване α за шахматен сноп (секции 1 и 2) за трите изследвани скорости. За първите две секции стойностите на α при една и съща скорост са много близки, тъй като средните температури на потока се различават незначително.



Фигура 2. Коефициенти на топлопреминаване за коридорен сноп (а) $v = 4.93 \text{ m/s}$ и шахматен сноп (б) $v = 4.38 \text{ m/s}$



Фигура 3. Коефициенти на топлопреминаване за коридорен (а) $v = 7.05 \text{ m/s}$ и шахматен сноп (б) $v = 6.26 \text{ m/s}$



Фигура 4. Коефициенти на топлопреминаване за коридорен (а) $v = 11.43 \text{ m/s}$ и шахматен сноп (б) $v = 10.14 \text{ m/s}$

Анализът на получените резултати за коридорен сноп (секции 1 и 2) показва, че получените стойности за варианти 1, 3 и 4 са много близки. Стойността, изчислена по критериалното уравнение за Вариант 2 е с около 50 % по-голяма от останалите стойности и за трите разглеждани скорости на димните газове. Това отклонение се дължи по всяка вероятност на факта, че се използва едно и също критериално уравнение за изчисляване на коефициентите на топлопредаване при коридорно и шахматно разположение на сноповете. Поради това не се препоръчва използването на уравнение (5) за изчисляване на критерия на Нуселт за коридорно разположение.

Получените резултати за шахматно разположение на тръбите в снопа са много

близки и за трите разглеждани скорости на димните газове. Най-голямо отклонение от средната стойност се наблюдава при вариант 4, поради което не се препоръчва използването на критериално уравнение (9).

Получените резултати за α за коридорно и шахматно разположение при един и същ разход на димните газове са близки, като при шахматно разпределение са малко по-големи от тези при коридорно.

Така представените стойности на α за различните варианти трябва да се коригират със стойността на ефективността на реброто E , който за разглеждания случай е 0.96 и да се получи:

$$\alpha_{\text{пр.}} = \alpha \cdot E \quad (10)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработен е оребрен термосифонен водонагревател с три секции, предназначен за работа с парен котел ПКГ-4.

2. Изследвани са три режима на работа на котела. Измерени са разходите на димни газове и питателна вода и температурите на двата флуида на входа и изхода на всяка секция. Изчислена е скоростта в най-тясното сечение.

3. Разгледани са 4 критериални зависимости за изчисляване на критерия на Нуселт за коридорно и шахматно разположение на тръбите.

4. Направени са препоръки за зависимостите, които са най-подходящи за изчисляване на коефициента на топлопреминаване.

ЛИТЕРАТУРА

- [1]. Венев М., И. Илиев, В. Камбурова, А. Терзиев, Ст. Лазаров. Утилизация на отпадна топлина чрез оребрени термосифонни водонагреватели.// Топлотехника, 2014, брой 7, стр. 41-44, ISSN 1314-2550.
- [2]. Кравченко Е., С.Климович, Теплопередача, Минск, 2008
- [3]. Основы конструирования и теплообменных аппаратов, Нижний Новгород, 2009.
- [4]. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод), издание третье, переработанное и дополненное, Санкт-Петербург, 1998.
- [5]. Andrescu D., E. Cerchez, Flue gases recuperator using an ejector, TE-RE-RD 2013; 2nd International Conference of Thermal Equipment, Renewable Energy and Rural Development Baile Olanesti 20-22 June, Romania, PRINTECH, 2013, pp. 1-5, ISBN 1843 - 3359.
- [6]. Hewitt G. H., Shires G. L., Bott T. R. (1994). Process Heat Transfer, CRC Press Inc., ISBN 0-8493-9918-1, USA.

За контакти:

Доц. д-р инж. Веселка Камбурова, Русенски университет "Ангел Кънчев", GSM: 0885 955 347, e-mail: vkambourova@enconservices.com

Проф. д-р инж. Илия Илиев, Русенски университет "Ангел Кънчев", GSM: 0887 306 898, e-mail: iliev@enconservices.com

Маг. инж. Милен Венев, Русенски Университет, гр. Русе 7017, ул. "Студентска" №8, +359 883 333 425, m_venev@abv.bg

Докладът е рецензиран.