

Andrzej W. WALEWSKI

Wacław WOJNAR

Stanisław PEKALA

Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych
Politechnika Śląska

PAROWE PODGRZEWACZE POWIETRZA KOTŁÓW ENERGETYCZNYCH

Konstrukcja, obliczenia, badania

Streszczenie. Przedstawiono zarys aktualnego stanu techniki w budowie wstępnych parowych podgrzewaczy powietrza (PPP) kotłów energetycznych. Omówiono problemy konstrukcyjne i eksploatacyjne tych wymienników ciepła. Przeprowadzono analizę znanych konstrukcji rozwiniętych ciśnieniowych powierzchni wymiany ciepła w aspekcie wyboru elementu grzewczego dla PPP. Zamieszczono wyniki prób przemysłowych i badań eksperymentalnych wybranych rur. Zaprezentowano koncepcję parowych podgrzewaczy powietrza nowej generacji. Przedstawiono metodykę obliczeń, doboru i optymalizacji PPP dla obiektów energetycznych.

1. WPROWADZENIE

W okresach niskich temperatur otoczenia powietrze doprowadzane do kotłów energetycznych poddawane jest wstępnemu podgrzewowi w podgrzewaczach rekuperacyjnych zasilanych parą o średnich i niskich parametrach. Tak przygotowane powietrze wprowadzone jest do kotłowych podgrzewaczy powietrza.

Kotły energetyczne wyposażone są w regeneracyjne obrotowe podgrzewacze powietrza (ROPP) dwóch typów [1]:

- systemu LJUNGSTRÖM
- systemu ROTHEMÜHLE.

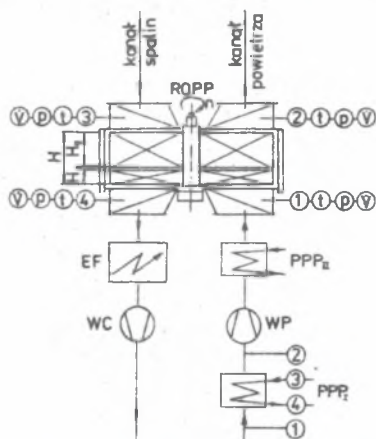
Opracowane są koncepcje regeneracyjnych niecyklicznych podgrzewaczy powietrza systemu stacjonarnego, ale rozwiązania te są w fazie modelowych badań doświadczalnych.

Wstępny podgrzew powietrza zapobiega obniżeniu temperatury ścianek wypełnienia na zimnym końcu wirnika (statora) ROPP poniżej punktu rosy kwasu siarkowego. Zapobiega zatem wystąpieniu zjawisk niskotemperaturowej korozji siarkowej [1].

W niektórych rozwiązaniach konstrukcyjnych układu spaliny - powietrze wstępny podgrzew zapobiega oblodzeniu wentylatorów podmuchu i kanałów zimnego powietrza.

Wstępne parowe podgrzewacze powietrza (PPP) są zatem nieodzownym elementem układu spaliny - powietrze nowoczesnych kotłów o wysokich parametrach pracy.

Schemat nitki układu podgrzewu powietrza wyposażonego w ROPP i PPP przedstawia rys. 1.



Rys. 1. Schemat blokowy nitki układu podgrzewu powietrza z ROPP systemu LJUNGSTRÖM i wstępnym PPP.

Fig. 1. Schematic diagram of air preheating line arrangement equipped with LJUNGSTRÖM regenerative rotating air preheater and a steam-heated air preheater.

Legenda:

- ROPP - regeneracyjny obrotowy podgrzewacz powietrza
- PPP_{I,II} - parowy podgrzewacz powietrza I i II stopnia
- EF - elektrofiltr
- WC - wentylator ciągu
- WP - wentylator podmuchu
- H - wysokość całkowita wypełnienia, mm
- Hg, Hz - wysokość wyp. gorącego i zimnego końca, mm
- oznaczenie punktu pomiarowego
- punkt pomiaru strumienia czynnika
- punkt pomiaru ciśnienia
- punkt pomiaru temperatury

2. PROBLEMY KONSTRUKCYJNE I EKSPLOATACYJNE PPP

Urządzenia te stanowią niewielki gabarytowo element konstrukcji kotła i może z tego względu przez wiele lat ich konstrukcja, metodyka obliczeń, optymalizacji i doboru powierzchni grzewczej nie była rozwijana i unowocześniana.

Dotychczas urządzenia te, zwane potocznie kaloryferami, budowane były w postaci wielorzędowych pęczków stalowych żebrowanych rur osadzonych w obudowie tworzącej prostokątny kanał powietrza. Śrubowo nawijane stalowe żebro z taśmy o przekroju prostokątnym było co kilka podziałek przyspawane do rury rdzeniowej. W celu podwyższenia odporności na korozję rura była pokrywana cynkiem, głównie metodą ogniowo-zanurzeniową.

Zdarzało się, że niewłaściwie nałożona wewnętrzna powłoka cynkowa złuszczała się w postaci płatków i piasku. Złuszczenia zbierały się w komorach zbiorczych i utrudniały przepływ czynnika grzewczego. Cynk stanowił także duże utrudnienie przy spawalniczych pracach remontowych, co było jedną z przyczyn złej jakości spoin i równocześnie pogarszało warunki bhp. Wkład rurowy stanowiący powierzchnię grzewczą wymiennika stanowiło wiele rzędów gęsto upakowanych rur.

Takie rozwiązanie powierzchni grzewczej miało wiele wad:

- 1^o Niemożliwość intensyfikacji wymiany ciepła ze względu na:
 - niski stopień rozwinięcia powierzchni ożebrowanej;
 - słabe przyleganie stopy żebra do rury rdzeniowej;
 - materiał żebra o niskim współczynniku przewodzenia ciepła;
 - niewłaściwy kształt żebra.
 - 2^o Wysokie opory aerodynamiczne rurowego wkładu grzewczego.
 - 3^o Niedostateczna odporność na korozję atmosferyczną i korozję siarkową wkładu rurowego przy zabudowie PPP pod ROPP (przy eksploatacyjnym myciu wypełnień wymiennika regeneracyjnego).
 - 4^o Utrudniony remont wkładu rurowego
 - niemożliwość lokalizacji przecieku czynnika grzewczego ze względu na gęste upakowanie wielu rzędów rur;
 - niemożliwy, bez demontażu całego bloku podgrzewacza lub części wkładu grzewczego, remont lub wymiana uszkodzonej rury grzewczej.
 - 5^o Duża masa podgrzewacza.
- Dodatkowo występowały wady konstrukcyjne i wykonawcze bloku wymiennika:
- niemożliwość całkowitego odwodnienia;
 - brak zdolności dylatacyjnych rur grzewczych, przeszywnienie konstrukcji;
 - niska dyspozycyjność.

Wady te wnikliwie przedstawiono w stanie techniki projektów wynalazczych [2,3].

Sygnalizowane przez elektrownie krajowe i inwestycje eksportowe trudności eksploatacyjne (remontowe, bhp) i niemożliwe do usunięcia wady były motorem podjęcia prac w celu modernizacji wstępnych parowych podgrzewaczy powietrza [4, 5].

3. ANALIZA RÓŻNYCH TYPÓW CIŚNIENIOWYCH POWIERZCHNI WYMIANY CIEPŁA. WYBÓR ELEMENTU GRZEWczego PPP

Rekuperacyjne wymienniki ciepła typu para wodna - gaz ze względu na niskie wartości współczynnika wnikania ciepła po stronie czynnika gazowego, w celu intensyfikacji wymiany ciepła, wymagają jednostronnie rozwiniętej powierzchni wymiany ciepła.

Najlepszym przykładem takiego rozwiązania jest rura poprzecznie ożebrowana.

W technice światowej znane są różne typy rur ożebrowanych:

1. Żeliwne rury żebrowane wg PN-76/M-34650 [6]
2. Odlewane żeliwne rury żebrowe na rurze stalowej tzw. rury obżeliwione [7]
3. Żeliwne rury żebrowe z rozciągającą rurą stalową [7]
4. Rury ożebrowane z taśmą stalową [8]
 - odmiana A - z ożebrowaniem śrubowym fałdowanym
 - odmiana B - z ożebrowaniem śrubowym niefałdowanym
 - odmiana C - z ożebrowaniem śrubowym niefałdowanym spawanym
 - odmiana D - z ożebrowaniem śrubowym z żebrami zawalcowanymi w rowku.
5. Rury ożebrowane taśmą aluminiową o żebrach w kształcie litery L (odmiana L) [9, 10].
6. Rury ożebrowane taśmą aluminiową o żebrach w kształcie podwójnej litery L (odmiana LL) [9, 10].
7. Rury ożebrowane taśmą aluminiową o żebrach w kształcie litery L z nagnieceniami rury podstawowej (odmiana LG) [9, 10].
8. Rury ożebrowane taśmą aluminiową o żebrach w kształcie litery I zagniatanych w rowkach rury podstawowej (odmiana G) [9, 10].
9. Rury z metali kolorowych (mosiądz, miedź, Cu-Ni-Fe) z żebrami prostokątnymi lamelowymi.
10. Rury monometalowe niskożebrowane typu RMN METALCHEM [11].
11. Inne typy rur żebrowanych produkowanych przez f-my zagraniczne [12+20].
12. Integralne bimetalowe rury wysokożebrowane typu RBW METALCHEM [11].

Przedstawione konstrukcje (z wyjątkiem odmian ujętych w punkcie 11) produkowane są przez przemysł krajowy.

Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych Politechniki Śląskiej od szeregu lat prowadzi badania i analizy nowych wysoko rozwiniętych ciśnieniowych i bezciśnieniowych powierzchni wymiany ciepła. Prace prowadzone były w ramach rozwiązania programu badawczego CPBP 02.18 kierunek 2.

Wszystkie typy rur poddano analizie w celu wyboru optymalnego rozwiązania dla przedmiotowego zastosowania.

Analiza obejmowała:

- stopień rozwinięcia powierzchni, ε [-]
- jednostkową powierzchnię grzewczą, F [m^2/m]
- ciężar jednostkowy, i [kg/m^2]
- materiał rury rdzeniowej i żebra,
- odporność na korozję atmosferyczną,
- prostotę technologii budowy rurowego wkładu grzewczego.

Rury ożebrowane typu 1, 2, 3 są odporne na korozję ale jednostkowa powierzchnia grzewcza, ciężar jednostkowy tych rur, koszt, kłopotliwy proces produkcji a głównie produkowane typowymiary eliminują je dla przedmiotowych zastosowań.

Stalowe rury ze spiralnymi żebrami stalowymi typu 4 wykonuje się przez nawijanie żebra z taśmy stalowej na rurę rdzeniową. Żebro co kilka podziałek przyspawane jest punktowo do rury rdzeniowej, a dla podziałki żeber

$s < 8$ mm spiralne żebro spawane jest jedynie na końcach rury.

Rury stalowe z aluminiowymi żebrami spiralnymi typu 5, 6, 7, 8 wykonuje się przez nawijanie żebra z taśmy aluminiowej na rurę rdzeniową. Stopa żebra może być zaciskana w rowku lub nakładana na rurę rdzeniową (podstawową) w kształcie litery L lub podwójnego LL. Te zabiegi mają na celu lepszy docisk stopy żebra do rury rdzeniowej dla poprawienia przewodzenia ciepła i próbie odizolowania wrażliwej na korozję stalowej rury rdzeniowej.

Rury z żebrami nawijanymi, przedstawione pod pozycją 4 + 8, charakteryzują się wyższym stopniem rozwinięcia powierzchni i niższym ciężarem jednostkowym.

Proponowane przez wytwórcę typowymiary sytuują te konstrukcje w zakresie analizowanych zainteresowań. Stalowa rura rdzeniowa umożliwia stosowanie techniki spawania przy kompozycji pęczka wkładu grzewczego.

Kształt żebra o przekroju prostokątnym oraz przyleganie stopy żebra do rury rdzeniowej są niezadawalające. Rury z żebrami nawijanymi nie są odporne na korozję.

Istnieje możliwość wykonania rur ożebrowanych (rury rdzeniowej) z materiałów odpornych na korozję (10H18N9T, mosiądz, miedź, Cu-Ni-Fe), ale wobec bardzo wysokich cen tych materiałów, trudności technologicznych łączenia rur z dnami sitowymi komór zbiorczych i niedostępność na krajowym rynku ten wariant analizy odrzucono.

Ewentualne zabezpieczenia antykorozyjne rur stalowych żebroanych przez ocynkowanie, aluminiowanie czy niklowanie (metodą ogniowo - zanurzeniową, galwaniczną, natryskiem plazmowym i in.) dla przedmiotowych zastosowań jest technologią drogą i niepewną. Ponadto takie zabezpieczenie wprowadza nowe elementy trudności technologicznych przy spawaniu.

Znane są konstrukcje wymienników ciepła z rur zabudowanych w pakietach ze wspólnymi żebrami lamelowymi prostokątnymi oraz z rur z indywidualnymi żebrami lamelowymi o różnym kształcie. Wykonane są one zazwyczaj z metali kolorowych (mosiądz, miedź) o wysokim współczynniku przewodzenia ciepła λ . Styczność lamelowego żebra z rurą rdzeniową jest niezadawalająca. Ze względu na użyte materiały występują trudności technologiczne łączenia rur z dnami sitowymi.

Rury monometalowe niskożebrowane typu RMN METALCHEM 10 charakteryzują się zbyt niskim stopniem rozwinięcia powierzchni. Rury niskożebrowane stalowe są wrażliwe na korozję, a wykonane z materiałów kolorowych są drogie i nie mogą być łączone prostymi metodami spawania.

W świecie produkcja rur wysokożebrowanych o gęstej podziałce żebra $s = (1 + 5)$ mm obejmuje bardzo wiele typów konstrukcji o różnych, niekiedy bardzo skomplikowanych kształtach, z całej gamy materiałów. Powierzchnie te produkowane przez firmy zachodnie, amerykańskie i japońskie [12 ÷ 20] są dostępne na rynkach, ale bardzo drogie. Nie mogą być zatem brane pod uwagę przy opracowaniu koncepcji krajowej powtarzalnej wielkoseryjnej produkcji parowych podgrzewaczy powietrza.

3.1. Wybór elementu grzewczego dla parowych podgrzewaczy powietrza

Z przedstawionej analizy oraz w oparciu o własne prace i doświadczenia autorów [22 + 24] wynika, że optymalnym rozwiązaniem konstrukcyjnym rurowej powierzchni grzewczej PPP jest powierzchnia wykonana z:

INTEGRALNYCH BIMETALOWYCH RUR WYSOKOŻEBROWANYCH typu RBW METALCHEM [11]

Rury typu RBW METALCHEM wykonuje się przez rotacyjne walcowanie na zimno, w układzie walców tarczowych, gładkiej grubościennej rury aluminiowej na stalowej rurze rdzeniowej. Rura rdzeniowa wykonana może być ze stali K10, K18, R35 lub z dowolnego materiału o wymaganej wytrzymałości, a rura żebrowa (żebrowana koszulka aluminiowa) z aluminium Al 99,5.

Sposób produkcji tych rur polega na tym, iż grubościenną rurę aluminiową nasuwa się na rurę rdzeniową, zaciska na obu końcach w celu uniemożliwienia "wypływu" rury żebrowej poza rurę rdzeniową, a następnie poddaje procesowi walcowania żeber. W pierwszej fazie procesu kształtowania żebra na powierzchni gładkiej rury powstają małe wyżłobienia, które następnie są pogłębiane. Metal przeznaczony do uformowania żebra zostaje przez narzędzie wyciskany ku górze i postępująco, równomiernie pocieniany, aż do momentu uzyskania śrubowego żebra o założonym profilu.

W wyniku procesu walcowania uzyskuje się dokładne i ścisłe połączenie między rurą rdzeniową i koszulką żebrowaną. Połączenie to gwarantuje bardzo korzystne warunki przewodzenia ciepła.

Dzięki zastosowaniu przez producenta do walcowania narzędzi o specjalnej konstrukcji (układ 3 walców w rozstawie $\alpha_0 120^\circ$ złożonych z 14 ÷ 21 tarcz) rury typu RBW posiadają najwyższe światowe standardy techniczne.

Rury RBW METALCHEM cechują następujące parametry:

- wysoki stopień rozwinięcia powierzchni, ϵ [-]
- duża jednostkowa powierzchnia grzewcza, F [m^2/m]
- niski ciężar jednostkowy, i [kg/m^2]
- optymalny ze względu na wymianę ciepła i wytrzymałość materiałów i kształt żebra,
- doskonałe przyleganie stopy żebra do rury rdzeniowej,
- całkowita izolacja stalowej ciśnieniowej rury rdzeniowej od czynnika zewnętrznego przez osłonięcie jej żebrowaną koszulką aluminiową,
- opanowana, ciągła i wysoko wydajna produkcja
- relatywnie niski koszt,
- możliwość stosowania technologii spawania.

4. WYBÓR UKŁADU POWIERZCHNI GRZEWCZEJ PPP

4.1. Opis techniczny bimetalowej rury ożebrowanej

Typoszereg produkcyjny [11] rur bimetalowych wysokożebrowanych obejmuje 8 typów rur pod względem parametrów geometrycznych i materiałów.

Rys. 2 prezentuje cechy geometryczne rur typu RBW METALCHEM.

Tablica 1 podaje zestawienie wartości wymiarów rur.

4.2. Materiał rury grzewczej

Z uwagi na projektowaną technologię produkcji rurowego wkładu grzewczego w formie pęczka rur spawanych w dnach sitowych komór zbiorczych lub w rurowych komorach zbiorczych rura rdzeniowa musi być wykonana ze stali konstrukcyjnych. Najlepsze do przedmiotowych zastosowań są rury kotłowe [21] K10 III^o lub K18 III^o. Rura żebrowa (koszulka ożebrowana) wykonana jest z aluminium o specjalnym składzie i właściwościach Al 99,5.

4.3. Wybór rury grzewczej

Uwzględniając specyficzne warunki pracy urządzenia, wielkie strumienie powietrza, duże prędkości, zapylenie atmosferyczne, konieczność cyklicznego mycia, czyste medium grzewcze na powierzchnię grzewczą wybiera się rurę :

RBW - 00 - 25 - 57 - 5,0

Komputerowe programy obliczeniowe [28] przewidują możliwość zastosowania rury o innych parametrach geometrycznych. Wartości geometrycznych wielkości charakterystycznych wybranej rury (wg rys. 2) podawane są dla każdego wariantu obliczeń w tablicy wydruku końcowego.

4.4. Wybór układu geometrycznego powierzchni grzewczej

Rurowy wkład grzewczy wymiennika projektowany jest w postaci układu pęczkowego.

Układ rur w pęczku może być:

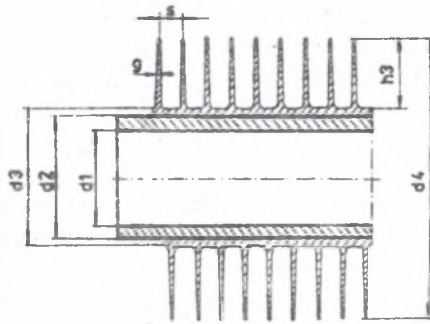
- przestawny,
- heksagonalny (przestawny regularny),
- korytarzowy.

Z uwagi na wymaganą intensyfikację wymiany ciepła ale niewielkie równocześnie opory aerodynamiczne preferowane są układy przestawne pęczka o podziałkach rur:

- podziałka poprzeczna: $s_1 = (1,4 + 2,5) d_4$,
- podziałka wzdłużna: $s_2 = (1,0 + 2,3) d_4$.

Przepływ wzajemny czynników wymieniających ciepło przewidziano:

- przeciuprądowy,
- współprądowy,
- krzyżowy.



Rys. 2. Cechy geometryczne bimetalowej rury ożebrowanej typu RBW METALCHEM

Fig. 2. Geometrical parameters of RBW METALCHEM type bimetallic finned tube

TABLICA 1. ZESTAWIENIE PARAMETRÓW GEOMETRYCZNYCH RUR RBW METALCHEM

Lp.	Typ rury ożebrowanej	Wymiary geometryczne mm						Jedn. pow.grz. $F \text{ m}^2/\text{m}$
		d1	d2	d3	d4	s	g	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.	RBW-00-16-38-5,0			17,5		5,0	0,50	0,41
2.	RBW-00-16-38-2,8	10,2 ÷	16	17,0	38±1	2,8	0,35	0,69
3.	RBW-00-16-38-2,3	12,4		17,0		2,3	0,30	0,82
4.	RBW-00-25-57-5,0			27,0		5,0	0,60	0,88
5.	RBW-00-25-57-2,8	15,0 ÷	25	26,5	57±1	2,8	0,35	1,50
6.	RBW-00-25-57-2,3	21,0		26,5		2,3	0,30	1,80
7.	RBW-00-38-70-5,0	25,4 ÷	38	40,0		5,0	0,60	1,16
8.	RBW-00-38-70-2,5	32,8			70±1	2,8	0,35	1,98

UWAGA : 1. Rury rdzeniowe wg PN-74/H-74252 mogą posiadać różną grubość ścianki

d2 = 16 $g_{\xi\xi}$ = 1,8 2,0 2,3 2,6 2,9 mm

d2 = 25 $g_{\xi\xi}$ = 2,0 2,3 2,6 2,9 3,2 3,6 4,0 4,5 5,0 mm

d2 = 38 $g_{\xi\xi}$ = 2,6 2,9 3,2 3,6 4,0 4,5 5,0 5,6 6,3 mm

2. Średnica wewnętrzna d1 rury rdzeniowej przyjmuje wartości zależne od grubości ścianki $g_{\xi\xi}$.

5. TESTY PRZEMYSŁOWE I BADANIA EKSPERYMENTALNE BIMETALOWYCH RUR WYSOKOŻEBROWANYCH

Dla oceny niezawodności, wytrzymałości mechanicznej oraz odporności na korozję wybraną rurę grzewczą poddano długotrwałym próbom przemysłowym w obiektach energetycznych: w El.HALEMBA, El.ŁAGISZA, FKS SPOLANA w Neratowicach (CSFR).

Powierzchnia ożebrowana omywana była w czasie prób różnymi mediami: gorącym powietrzem, spalinami oraz suchym SO_3 . Rury chłodzone były powietrzem w przepływie swobodnym.

Rura rdzeniowa i ożebrowana koszulka aluminiowa wykazały zadawalającą wytrzymałość mechaniczną, erozyjną i wysoką odporność na korozję atmosferyczną i niskotemperaturową korozję siarkową.

Uznano, że testy przemysłowe [22] dały pozytywne wyniki i wybrany element może stanowić powierzchnię grzewczą PPP.

Kolejne analizy dotyczyły badań eksperymentalnych. Publikowane w literaturze wyniki badań cieplnych [23, 25, 26] są powtarzalne, obejmują w swym zakresie parametry geometryczne wybranej rury i pęczka oraz zakresy warunków hydrodynamicznych mediów dla przedmiotowych zastosowań.

Natomiast prezentowane wyniki badań aerodynamicznych różnych badaczy [25+27] różnią się bardzo istotnie (nawet do 100 %).

Z tych względów zespół autorów przeprowadził na zbudowanej instalacji eksperymentalnej AT-3 własne badania oporów przepływu układów pęczkowych rur bimetalowych wysokożebrowanych.

Zastosowane rozszerzone zakresy pomiarowe parametrów hydrodynamicznych i geometrycznych i uzyskane wyniki badań pozwoliły na opracowanie uogólnionych korelacji do obliczeń aerodynamicznych wymienników ciepła z wkładem grzewczym z tych rur.

Wyniki kilku zadań badawczych realizowanych w ramach CPBP 02.18 kier. 2 opublikowano w [24].

Uzyskane formuły pozwoliły na prowadzenie obliczeń cieplnych i aerodynamicznych parowych podgrzewaczy powietrza dla konkretnych obiektów energetycznych.

6. METODYKA OBLICZEŃ I DOBORU PPP DLA OBIEKTU ENERGETYCZNEGO

Obliczenia doboru PPP dla zadanych założeń wejściowych obiektu energetycznego stanowią wariantowe obliczenia cieplne i aerodynamiczne rurowego wkładu grzewczego.

Tok obliczeń przedstawiają poniższe algorytmy skrócone.

6.1. Algorytm obliczeń cieplnych (skrót).

Obliczenia wymiany ciepła pomiędzy czynnikami w rurowym wkładzie grzewczym przebiegają według sekwencyjnych operacji:

1. Bilans cieplny wymiennika

$$Q = V_p (i_2 - i_1) = D_w (i_3 - i_4) \quad [\text{kW}] \quad (1)$$

2. Strumień wymienianego ciepła

$$Q = A k \Delta t \quad [\text{kW}] \quad (2)$$

3. Współczynnik przenikania ciepła

$$k = \frac{1}{\frac{\varphi_1}{\alpha_{ow}} + \frac{\varphi_1}{\alpha_w} + \frac{\varphi_2 \delta_2}{\lambda S t} + \frac{\varphi_3 \delta_3}{\lambda A_1} + \frac{1}{\alpha_z} + \frac{1}{\alpha_{op}}} \quad [\text{W/m}^2\text{K}], \quad (3)$$

$$\text{gdzie: } \varphi_1 = \frac{A_r}{A_1}, \quad \varphi_2 = \frac{A_r}{A_2}, \quad \varphi_3 = \frac{A_r}{A_3}$$

$$A_r = \frac{\pi}{4} (d_4^2 - d_3^2) + \pi d_4 s + \pi d_3 (s - g)$$

$$A_1 = \pi d_1 s, \quad A_2 = \pi d_{St} s, \quad A_3 = \pi d_{A1} s$$

$$d_{St} = (d_2 - d_1) \ln \frac{d_2}{d_1}, \quad d_{A1} = (d_3 - d_2) \ln \frac{d_3}{d_2}$$

$$\delta_2 = \frac{d_2 - d_1}{2}, \quad \delta_3 = \frac{d_3 - d_2}{2}.$$

4. Zastępczy współczynnik wnikania ciepła

$$\alpha_z = \alpha_p \left(\frac{A_z}{A_r} E \psi_\alpha \xi + \frac{A_r - A_z}{A_r} \right), \quad (4)$$

gdzie:

$$A_z = 2 \frac{\pi}{4} (d_4^2 - d_3^2) + \pi d_4 g,$$

$$\alpha_p = \frac{Nu \lambda_p}{d_3}.$$

5. Liczba kryterialna Nusselta dla pęczka rur o określonej geometrii wg [26]

$$Nu = C_1 C_2 \left(\frac{G_1}{G_2} \right)^c \left(\frac{s}{d_3} \right)^d \left(\frac{h_3}{d_3} \right)^e Re^f Pr^i \left(\frac{Pr}{Pr_{śc}} \right)^j. \quad (5)$$

Współczynniki regresji dla korelacji (5) przyjmuje się wg [26].

6.2. Algorytm obliczeń aerodynamicznych

Opory przepływu czynnika gazowego przez układ pęczkowy rur ożebrowanych określa się wg formuły:

$$\Delta p = Eu w^2 \rho z_2, \quad [\text{Pa}] \quad (6)$$

$$Eu = C Re^m \left(\frac{s_1}{d_3}\right)^n \left(\frac{s_2}{d_3}\right)^p. \quad (7)$$

Współczynniki regresji C , m , n , p dla korelacji uogólnionej (7) wyznaczono metodą liniowej regresji wielokrotnej [29] i przedstawiono w [24].

Przedstawione obliczenia realizowane są przy użyciu własnych komputerowych programów użytkowych HEAT-01 i HEAT-10 [28].

Klony programów są strukturalnie podobne, a różnią się sposobem wprowadzania danych w zależności od dostępnych parametrów technicznych.

Przyjęte założenia główne obejmują:

- wybrana geometria kanału powietrza: a , b ,
- zadane wartości geometrii rury ożebrowanej i pęczka: d_1 , d_2 , d_3 , d_4 , h_3 , g , s , s_1 , s_2 , z_1 , z_2 , z , l_1 .

Dane wejściowe stanowią:

- strumień czynnika grzewczego: Dw ,
- temperatura czynnika grzewczego na wlocie: t_3 ,
- strumień czynnika ogrzewanego: Vp ,
- temperatura czynnika ogrzewanego na wlocie: t_1 .

Dla takich założeń program wykonuje:

- obliczenia geometrii powierzchni grzewczej: Ar , Az , ξ , A ,
- obliczenia wymiany ciepła: Q , t_1 , t_2 , t_3 , t_4 , Δt , w , Re , k ,
- obliczenia oporów przepływu czynnika ogrzewanego: Δp , Eu .

Wyniki obliczeń zestawiane są w postaci alfanumerycznych tablic wydruku końcowego.

Zaprezentowane obliczenia wykonywane są dla różnych obciążeń kotła i związanych z tym parametrów termodynamicznych mediów. Wykonywane są obliczenia dotyczące możliwości regulacyjnych wymiennika, a na ich podstawie sporządza się charakterystyki eksploatacyjne PPP.

Analiza kompletu tablic wydruku końcowego pozwala wybrać optymalny układ geometryczny bloku wymiennika i układ rurowego wkładu grzewczego. Na tej podstawie przedstawiona zostaje koncepcja parowego podgrzewacza powietrza do realizacji projektu wstępnego, a następnie kompletnej dokumentacji konstrukcyjnej.

6. NOWA GENERACJA PAROWYCH PODGRZEWACZY POWIETRZA

Realizowany cykl komputerowych obliczeń cieplnych i aerodynamicznych rurowego wkładu grzewczego jest podstawą koncepcji rozwiązania technicznego parowego podgrzewacza powietrza.

W ramach zawartego Porozumienia... [4] opracowano we współpracy Politechniki Śląskiej w Gliwicach i RAFAKO w Raciborzu koncepcję dwóch podstawowych typów parowego podgrzewacza powietrza nowej generacji:

(A) PPP dla poziomego kanału powietrza,

(B) PPP dla pionowego kanału powietrza.

Rozwiązania chronione są prawem ochronnym na wzór użytkowy [2] i projektem wynalazczym [3].

Przedmiot ogólnego rozwiązania technicznego PPP prezentują rys. 3 i 4 : W prostokątnym kanale powietrza 1 o wymiarach $a \times b$ umieszczone są sekcje grzewcze, każda złożona z 2 lub 3 rzędów rur grzewczych 2 o długości l_1 części ożebrowanej. Rury osadzone są w sekcyjnych komorach zbiorczych 3, wlotowej i wylotowej, połączonych z kolektorami 4 czynnika grzewczego wlotowym i wylotowym. Sekcje grzewcze podzielone są na segmenty. Kolektory wyposażone są w zawory regulacyjne.

Między skrajnymi rurami sąsiednich sekcji zachowana jest odległość $200+800\text{mm}$ w celu stworzenia komór remontowych 5 wkładu rurowego, do których prowadzą okna wiazowe 6 zamknięte pokrywami 7.

Takie rozwiązanie posiada szereg zalet:

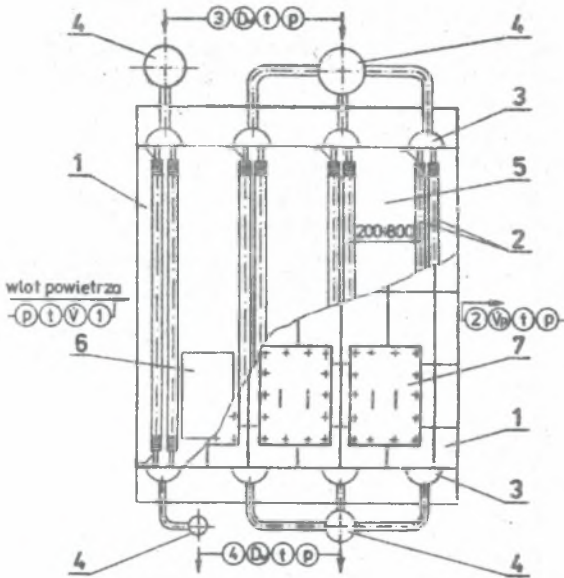
- 1) swobodna dylatacja rur grzewczych,
- 2) trwałość połączeń spawanych,
- 3) dostęp remontowy do każdej rury grzewczej,
- 4) możliwość pełnej kontroli szczelności rur i wymiany uszkodzonych rur bez demontażu wkładu rurowego,
- 5) całkowita odwadnialność wymiennika,
- 6) możliwość prowadzenia regulacji strumienia wymienianego ciepła.

Parowe podgrzewacze powietrza nowego typu (A) pracują w najnowocześniejszej polskiej Elektrowni BEŁCHATÓW (kocioł BB 1150) we wszystkich 12 blokach energetycznych. Wymienniki pracują bezawaryjnie z dotrzymaniem projektowych parametrów. Ich konstrukcja i eksploatacja uzyskała wysoką ocenę Elektrowni.

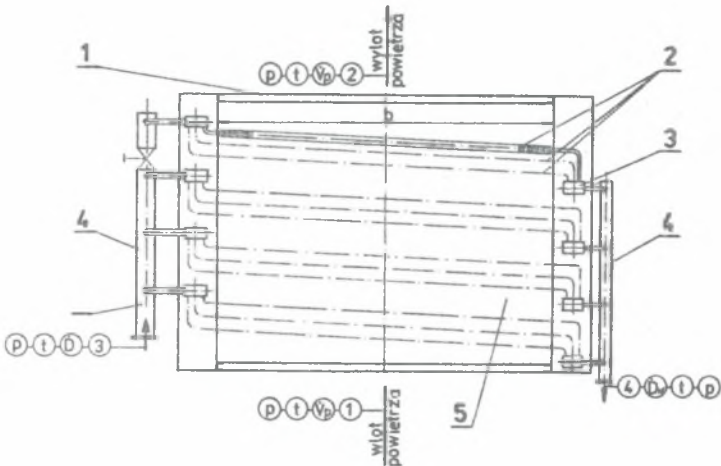
Podgrzewacze typu (B) zbudowano dla EL. "OPOLE" (kocioł BP 1150) i EL. "TAIYUAN" (kocioł BP 1025) (ChRL).

Realizowane są projekty PPP dla EL. "KOZIENICE"; EL. "ODRA DOLNA" i EC. Z. A. WŁOCŁAWEK.

Przewiduje się, że w ramach prac remontowych bloków wszystkie krajowe elektrownie wyposażone zostaną w parowe podgrzewacze powietrza nowej generacji.



Rys. 3. Koncepcja układu geometrycznego parowego podgrzewacza powietrza dla poziomego kanału powietrza
 Fig. 3. Concept of an geometrical layout of a steam-heated air preheater for a horizontal air channel



Rys. 4. Koncepcja układu geometrycznego parowego podgrzewacza powietrza dla pionowego kanału powietrza.
 Fig. 4. Concept of an geometrical layout of a steam-heated air preheater for a vertical air channel.

7. PODSUMOWANIE

Pełny kilkuletni cykl prac analitycznych, badawczych i konstrukcyjnych realizowanych we współpracy Politechniki Śląskiej w Gliwicach i Raciborskiej Fabryki Kotłów RAFAKO w Raciborzu, na podstawie zawartego porozumienia, dał podstawy do opracowania typoszeregu nowej generacji parowych podgrzewaczy powietrza. Budowę PPP podjęły ZUCH METALCHEM w Kędzierzynie-Koźlu i RAFAKO w Raciborzu.

Wymienniki wg zaprezentowanych rozwiązań mogą stanowić wyposażenie wszystkich kotłów elektrowni i elektrociepłowni zawodowych i przemysłowych. W tym zamyśle opracowano projekty dwóch podstawowych typów wymiennika. Konceptje rozwiązań technicznych PPP zawierają najnowocześniejsze rozwiązania, a budowane urządzenia dotrzymują najwyższych światowych standardów produkcyjnych, o czym świadczą referencje ze zrealizowanych kontraktów.

Objaśnienie oznaczeń

A	powierzchnia grzewcza, m^2
a	szerokość kanału dla przepływu powietrza, mm
b	wysokość kanału dla przepływu powietrza, mm
d(1+4)	średnica rury wg oznaczeń na rys. 2,
Dw	strumień czynnika grzewczego, kg/h
E	współczynnik efektywności żebra wg [26],
Eu	liczba Eulera,
F	jednostkowa powierzchnia grzewcza, m^2/m ,
g	średnia grubość żebra, mm
h3	wysokość żebra, mm
11, 12	entalpia czynnika ogrzewanego na wlocie i wylocie, kJ/m^3
13, 14	entalpia czynnika grzewczego na wlocie i wylocie, kJ/kg
k	współczynnik przenikania ciepła, W/m^2K
l1	długość ożebrowania, mm
Nu	liczba Nusselta,
Q	strumień wymienianego ciepła, kW
Re	liczba Reynoldsa,
s	podziałka ożebrowania, mm
s1	podziałka poprzeczna rur w pęczku, mm
s2	podziałka wzdłużna rur w pęczku, mm
t1, t2	temperatura czynnika ogrzewanego na wlocie i wylocie, $^{\circ}C$
t3, t4	temperatura czynnika grzewczego na wlocie i wylocie, $^{\circ}C$
w	prędkość czynnika ogrzewanego, m/s
Vp	strumień czynnika ogrzewanego, m^3/h
z	całkowita ilość rur w pęczku wkładu grzewczego,
z1	ilość rur w pierwszym rzędzie pęczka wkładu grzewczego,
z2	ilość rzędów rur w pęczku wkładu grzewczego,

$C_1, C_2, c, d, e, f, i, j$ - stałe wg [26],
 C, m, n, p - stałe wg [24],
 α_p współczynnik wnikania ciepła po str. czynnika ogrzewanego, W/m^2K
 α_w współczynnik wnikania ciepła po str. czynnika grzewczego, W/m^2K
 α_z zastępczy współczynnik wnikania ciepła, W/m^2K
 $\frac{1}{\alpha_{ow}}$ opór cieplny osadu po stronie czynnika grzewczego, m^2K/W
 $\frac{1}{\alpha_{op}}$ opór cieplny osadu po stronie czynnika ogrzewanego, m^2K/W
 Δp opory przepływu powietrza przez wkład grzewczy, Pa
 Δt średnia różnica temperatur czynników, K
 ε stopień rozwinięcia powierzchni
 $\lambda_p, \lambda_{st}, \lambda_{Al}$ współczynnik przewodzenia ciepła dla powietrza, stali, aluminium, W/mK
 ξ współczynnik uwzględniający zmianę grubości żebra trapezowego
 $\delta_1 = \frac{s_1}{d_3}$ podziałka poprzeczna względna
 $\delta_2 = \frac{s_2}{d_3}$ podziałka wzdłużna względna
 ρ średnia gęstość powietrza, kg/m^3
 ψ_a współczynnik uwzględniający wpływ nierównomierności rozkładu współczynnika wnikania ciepła po powierzchni żebra na efektywność rury ożebrowanej

LITERATURA

- [1] Baran M., Walewski A.W., Thamm J.: Regeneracyjne obrotowe podgrzewacze powietrza. Kierunki rozwoju konstrukcji i badań doświadczalnych. Gospodarka Paliwami i Energią 1982, nr 8-9, s.7+13.
- [2] Urząd Patentowy PRL: Parowy podgrzewacz powietrza kotłów energetycznych. Wzór użytkowy. Prawo ochronne Nr 41985.
- [3] Urząd Patentowy PRL: Parowy podgrzewacz powietrza kotłów energetycznych. Projekt wynalazczy P-258508 z mocą od dnia 1986.03.20.
- [4] Porozumienie o współpracy w dziedzinie modernizacji i rozwoju konstrukcji podgrzewaczy powietrza kotłów energetycznych między RAFAKO w Raciborzu, ZUCH METALCHEM w Kędzierzynie-Koźlu i IMIUE Politechniki Śląskiej. Gliwice 1985.02.15.
- [5] Walewski A.W., Czepelak J., Wojnar W., Żyła J.: Nowa generacja wstępnych podgrzewaczy powietrza. Parowy podgrzewacz powietrza dla kotła BB 1150. Ogólnokrajowa Konferencja N-T nt.: Bloki 360 MW. Materiały konferencyjne Bełchatów 1985.
- [6] Polska Norma PN-76/M-34650: Żeliwne żebrze podgrzewacze wody. Części.
- [7] Szopa M., Weber J.: Podgrzewacze wody z żeliwnymi rurami o ściankach wzmocnionych rurą stalową. Gospodarka Paliwami i Energią 1981, nr 7-8, s. 27+29.
- [8] ZACH CHEMET w Tarnowskich Górach: Rury ożebrowane z taśmą stalową. Wyciąg z normy branżowej BN-71/2256-02. Tarnowskie Góry 1983.

- [9] ZACH CHEMET w Tarnowskich Górach: Rury ożebrowane dla chłodnic powietrza. Norma zakładowa ZN-77/2252/0498. Tarnowskie Góry 1977.
- [10] ZACH CHEMET w Tarnowskich Górach: Rury ożebrowane do wymienników ciepła chłodzonych powietrzem atmosferycznym. Materiały firmowe. Tarnowskie Góry.
- [11] ZUCH METALCHEM w Kędzierzynie Koźlu: Integralne rury żebrowane. Katalog firmowy. Kędzierzyn Koźle 1986.
- [12] R & G Schmale Metallwerke GmbH & Co. KG: Rippenrohre für Wärmeübertrager. Katalog firmowy. Menden 1978.
- [13] Extended Surface Tube Company: Finned Tubes. Katalog firmowy. Corby, Northants 1979.
- [14] Wieland - Werke AG Metallwerke: GEWA - Rippenrohre. Katalog firmowy. Ulm 1980.
- [15] Thyssen Schalker Verein GmbH: Rheistahl - Wärmeaustauscher. Katalog firmowy. Hilden 1980.
- [16] GEA Luftkühlgesellschaft Happel GmbH Co: GEA Forscht - Plant - Baut Katalog firmowy. Herne 1980.
- [17] H.D.Eichelberg Co. GmbH Metallwerke: Eicofin Rippenrohre. Katalog firmowy. Menden 1989.
- [18] Airco - Fin b.v.: Airco - Fin Products. Katalog firmowy. Nieuwe Pekela 1988.
- [19] Mitsui Engineering Shipbuilding Co., Ltd: Mitsui - Yuba Air - Cooled, Heat Exchangers. Katalog firmowy. Tokyo 1980.
- [20] Ungarische Aluminium - Werke: Erzeugnisse des Leichtmetallwerkes. Katalog firmowy. Székesfehérvár 1989.
- [21] Polska Norma PN-74/H-74252: Rury stalowe bez szwu kotłowe.
- [22] Badania rozwiniętych ciśnieniowych powierzchni wymiany ciepła w aspekcie możliwości zastosowania na elementy kotłów. Problem resortowy R.I.5 Temat 08.11. Sprawozdanie z realizacji zadania badawczego. Materiał niepublikowany. Gliwice 1984.
- [23] Analiza badań wymiany ciepła i oporów przepływu w pęczkach rur ożebrowanych i uściślenie metodyki obliczania powierzchni ogrzewanych z wysokożebrowanych rur bimetalowych. Problem resortowy MNiSzW Nr R.I.5. Sprawozdanie z realizacji zadania badawczego. Materiał niepublikowany. Gliwice 1985.
- [24] Walewski A.W., Czepelak J., Pękala St., Wojnar W.: Badania doświadczalne oporów przepływu układów pęczkowych bimetalowych rur ożebrowanych. Zeszyt Naukowy Politechniki Śląskiej, ENERGETYKA z. 104, Gliwice 1988.
- [25] Stasjuljavičjus Ju., Skrinska A.: Teplootdača poperečno obtekaemych pučkov rebristych trub. Izdatel'stvo MINTIS, Vil'njus 1974.
- [26] Žukauskas A.A.: Konvektivnyj perenos v teploobmennikach. Izdatel'stvo NAUKA, Moskva 1982.
- [27] Idel'čik I.E.: Spravočnik po gidravličeskim soprotivlenijam. Mašinostroenie, Moskva 1975.
- [28] Użytkowy program komputerowy HEAT-01, HEAT-10. Program obliczeniowy wymiany ciepła i oporów przepływu wkładu rurowego parowego podgrzewacza powietrza. Politechnika Śląska, Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych. Gliwice 1988.
- [29] Volk W.: Statystyka stosowana dla inżynierów. WNT, Warszawa 1965.

ПАРОВЫЕ ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОТЛОВ,
КОНСТРУКЦИЯ, ВЫЧИСЛЕНИЯ, ИССЛЕДОВАНИЯ

Резюме

В статье дается обзор актуального состояния техники в создании вступных паровых воздухоподогревателей (ПВП) энергетических котлов. Представлено конструкционные и эксплуатационные проблемы этих теплообменников. Анализировано известные конструкции ребристых труб для использования в качестве нагревательного элемента для ПВП. Рассмотрены результаты промышленных испытаний и экспериментальных опытов набранных труб. Представлено тоже конструкция ПВП нового поколения. В статье предложены методы расчета, выбора и оптимизации ПВП для энергетических объектов.

STEAM - HEATED AIR PREHEATERS OF SCALE BOILERS
Design, calculation, research

Summary

A state of art in the design of steam heated air preheaters for large scale boilers is presented. Problems arising in the desiging process and operation of these exchangers are discussed. In order to select optimal preheater heating element an analysis of the existing types of the extended heat exchange surfaces is carried out. Results of industrial environment and laboratory experiments for a chosen type of heating element are included. A new generation steam - heated air preheaters is developed. An algorithm of calculations, choice and optimization of these heat exchangers for a given energetic plant is presented.