

METODA PROJEKTOWANIA WYMIENNIKÓW CIEPŁA TECHNICZNYCH SYSTEMÓW ENERGETYCZNYCH ZE WZGLĘDU NA WYMAGANĄ NIEZAWODNOŚĆ TYCH SYSTEMÓW – CZĘŚĆ 1

Artykuł zawiera skrót obronionej rozprawy doktorskiej [13] i składa się z dwóch części. Pierwsza dotyczy działań wieloetapowego projektowania wymienników ciepła w prezentowanej metodzie, natomiast druga część zawiera opis działań weryfikujących to projektowanie. Całość – jako rozważana metoda – stanowi system działań:

- a) projektowania wymienników ciepła ze względu na pożądane wartości niezawodności tych wymienników, wynikające z wymaganej niezawodności technicznych systemów energetycznych, w których występują wymienniki ciepła,*
- b) weryfikujących to projektowanie.*

W tej części artykułu opisano działania wieloetapowego projektowania wymienników ciepła oraz informacyjne powiązania między tymi działaniami. Opisane działania w projektowaniu wymienników ciepła umożliwiają kreowanie relacji między wyróżnionymi wielkościami, w tym cechami wymienników ciepła, dobór i generowanie modeli tych relacji oraz wykreowanie systemu tych modeli w postaci określonych algorytmów. Przedstawiono również wybrane szczegółowe algorytmy odwzorowujące powyżej wskazane zagadnienia w odniesieniu do płaszczowo-rurowego skraplacza okrętowej turbiny parowej.

Słowa kluczowe: *metoda, projektowanie, weryfikacja, wymienniki ciepła, niezawodność.*

WSTĘP

Na podstawie rozpoznania stanu wiedzy, przedstawionego poniżej, stwierdzono potrzebę projektowania wymienników ciepła technicznych systemów energetycznych o określonych cechach tych wymienników, w szczególności ze względu na wymaganą niezawodność systemów, w których te wymienniki występują. Postrzegany problem techniki jest następujący: jak projektować wymienniki ciepła technicznych systemów energetycznych o niezawodności wynikającej z wymaganej niezawodności tych systemów? Problem ten zaimplikował następujący problem naukowy: jak tworzyć system modeli relacji między wyróżnionymi wielkościami w rozważanym projektowaniu? [13].

Postawiono hipotezę: rozwiązanie określonego problemu naukowego umożliwia rozwiązywanie wcześniej sformułowanego problemu techniki, a w konsekwen-

cji spełnienie postulatu wymaganej niezawodności technicznych systemów energetycznych, co stanowi jeden z istotnych warunków realizacji zadań, zapewnienia szeroko pojętego bezpieczeństwa i efektywnej eksploatacji tych systemów.

W opracowanej metodzie zawarto systemowe podejście do projektowania wymienników ciepła. Wyraża się ono poprzez zhierarchizowanie oraz dekompozycję działań projektowych i je weryfikujących. Wyróżnione działania powiązано informacyjnie, umożliwiając wielowariantowe projektowanie wymienników ciepła i wielostopniową weryfikację tego projektowania. Stanowi to system określonych działań, który z kolei umożliwia tworzenie systemu modeli relacji między wyróżnionymi wielkościami w rozważanym projektowaniu i jego weryfikacji. Projektowanie wymienników ciepła jest podporządkowane projektowaniu technicznych systemów energetycznych.

Wymagana niezawodność technicznych systemów energetycznych wynika przede wszystkim z potrzeby realizacji funkcji przez te systemy, konieczności zapewnienia szeroko pojętego bezpieczeństwa oraz efektywnej eksploatacji tych systemów [5]. Z kolei ze znajomości wartości wymaganej niezawodności w danym czasie rozważanych systemów wynika pożądana wartość niezawodności, w tym samym czasie, wymienników ciepła, które w tych systemach występują [5].

Niezawodność wymienników ciepła uznaje się za jedną z ich istotnych cech, gdyż umożliwia ona realizację postulatu wymaganej niezawodności technicznych systemów energetycznych. Jest to zgodne z filozoficzno-etycznymi uwarunkowaniami działań na rzecz niezawodności techniki wyrażonymi w [1]. Wymienniki ciepła nie tylko wymieniają określone ilości ciepła między płynami, ale także są niezawodne, nie wpływają negatywnie na funkcjonowanie technicznych systemów energetycznych pod każdym względem.

W celu rozpoznania stanu wiedzy w zakresie sformułowanych problemów techniki posłużono się następującymi źródłami informacji o publikacjach: informatyczne bazy danych, tj. Nauka Polska, Science Direct, BazTech, Knovel, oraz korespondencja elektroniczna z następującymi firmami: Alfa Laval, GEA, Danfoss, Sondex, Heatric, Conex, Faco i Yuba, także normy PN i ISO, biblioteki polskich wyższych uczelni technicznych oraz Instytutu Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku, Instytutu Energetyki w Warszawie i Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN w Warszawie, również wyszukiwarki internetowe, w tym m.in. Google.

Na podstawie rozpoznania stanu wiedzy, szczegółowo przedstawionego w rozprawie [13] stwierdzono, że nie są projektowane wymienniki ciepła o pożądanym niezawodnościach, wynikających z wymaganej niezawodności technicznego systemu energetycznego, w którym występują. Prace [2, 4] stanowią merytoryczną podstawę do rozwiązania określonego problemu. Ponadto, z dokonanego rozpoznania stanu wiedzy wynika, że nie podejmuje się interdyscyplinarnego projektowania wymienników ciepła w rozumieniu uwzględnienia w ich projektowaniu współzależności następujących ich cech: niezawodności, wielkości związanych z wymianą ciepła i przepływami płynów oraz stosownych kosztów. Takie interdyscyplinarne podejście ściśle scharakteryzowano w pracy [3]. Nie podej-

muje się również weryfikacji procesu projektowania wymienników ciepła, poza występującą cząstkową weryfikacją, np. w pracach [14, 16]. Wyróżnione zagadnienia uzasadniły potrzebę podjęcia opracowania metody projektowania wymienników ciepła technicznych systemów energetycznych ze względu na wymaganą niezawodność tych systemów. Natomiast utworzenie systemu modeli między wyróżnionymi wielkościami (problem naukowy do rozwiązania) było konieczne do wykreowania tej metody.

Najpierw wykreowano system działań, który składa się zarówno z działań projektowania wymienników, jak i z działań weryfikujących to projektowanie. Umożliwiło to wybór najkorzystniejszych rozwiązań projektów określonego wymiennika względem przyjętych kryteriów. Prace [6, 7–9, 15] stanowią merytoryczną podstawę w kreowaniu wskazanego powyżej systemu działań. Do wygenerowania systemu modeli relacji między wyróżnionymi wielkościami zaistniała potrzeba wykreowania modeli następujących relacji: między grubością osadów a czasem ich powstawania, między głębokością korozji a czasem, między naprężeniami cieplno-mechanicznymi określonych elementów określonego wymiennika ciepła a ciśnieniami płynów wymieniających ciepło i temperaturami tych płynów na wejściu oraz wyjściu z wymiennika ciepła, z których pozyskiwane wyniki obliczeniowe wykorzystuje się w doborze funkcji niezawodności określonych elementów, a także odpowiednich funkcji kosztów.

Wystąpiła potrzeba wykreowania funkcji kosztów względem prędkości przepływu płynów wymieniających ciepło oraz względem temperatury płynu chłodzącego na wyjściu z tych wymienników, a następnie optymalizacji wartości tych wielkości. Odnośnie do funkcji kosztów, na podstawie m.in. [18], dokonano identyfikacji składników kosztów branych pod rozwagę w projektowaniu wymienników ciepła.

W zakresie podjętego do rozwiązania problemu weryfikacji projektów wymienników ciepła brakowało głównie rozwiązania problemu wyboru wielkości, których wartości będą weryfikowane przy minimalizacji liczby tych wielkości, przy uwzględnieniu praktycznych uwarunkowań co do miejsca i czasu tej weryfikacji, sposobu określonych pomiarów oraz kosztów z tą weryfikacją związanych. Stwierdzono także, że brakuje odpowiednio opracowanej organizacji badań wymienników ciepła technicznych systemów energetycznych wraz ze sprzężeniami zwrotnymi wyników tych badań z kolejnymi projektowaniami wymienników ciepła.

1. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA DZIAŁAŃ W ROZWAŻANEJ METODZIE

Prezentowana metoda zawiera zbiór działań i relacji między nimi, co stanowi określony system działań. Zasadnicze działania w opracowanej metodzie przedstawiono na rysunku 1. Utworzenie zbioru danych stanowi identyfikację wielkości, których wartości są stałe w projektowaniu wymienników ciepła, a które wynikają z potrzeby realizacji funkcji (zadań) przez wymienniki ciepła w technicznych

systemach energetycznych. Dalej sformułowanie założeń obejmuje przyjęcie wartości wielkości, które ulegają zmianom (doborom) w procesie projektowania wymienników ciepła, aż do uzyskania satysfakcjonujących wyników projektowania wymienników ciepła. Następne działania są to: wieloetapowe projektowanie wymienników ciepła i wielostopniowa eksperymentalna weryfikacja projektowania wymienników ciepła.

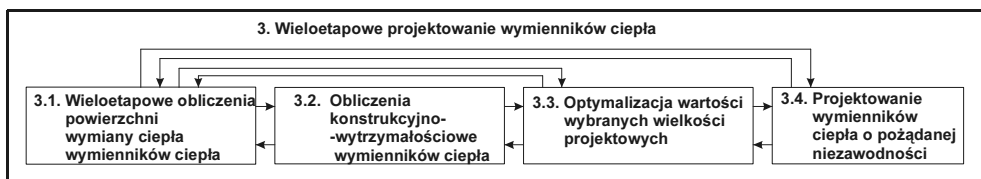


Rys. 1. Ogólny schemat systemu działań w projektowaniu wymienników ciepła i weryfikacji tego projektowania

Fig. 1. General scheme of the system of activities undertaken in designing heat exchangers and in verifying this designing

2. WIELOETAPOWE PROJEKTOWANIE WYMIENNIKÓW CIEPŁA

Schemat systemu działań wieloetapowego projektowania wymienników ciepła przedstawiono na rysunku 2. Wieloetapowe projektowanie wymienników ciepła są to działania, w których dokonuje się: wielokrotnego – iteracyjnego oszacowania powierzchni wymiany ciepła określonych wymienników ciepła, obliczeń konstrukcyjno-wytrzymałościowych tych wymienników, optymalizacji wybranych wielkości projektowych i projektowania wymienników ciepła o pożądanej niezawodności.



Rys. 2. Schemat systemu działań projektowych

Fig. 2. General scheme of the system of activities undertaken in designing heat exchangers

Zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 1 projektowanie to poprzedza utworzenie zbioru danych, np. $C_D = \{\dot{Q}, T'_1, T''_1, T'_2, \dot{m}_1, G_{wc \max}, L_{wc \max}, R_{wc}(t_z)\}$, oraz sformułowanie założeń np. $C_Z = \{T_2'', L_i, M_i, p_j, w_j, \sum F_j\}$.

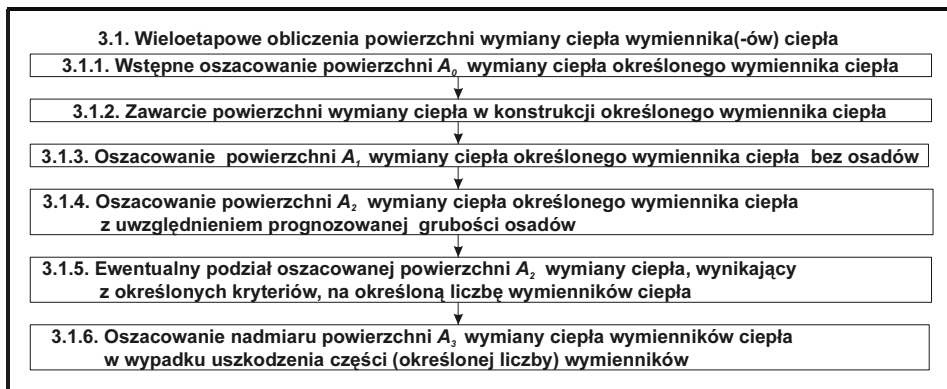
Wieloetapowe obliczenia powierzchni wymiany ciepła wymienników ciepła zdekomponowano na działania wskazane na rysunku 3.

Wstępnego oszacowania powierzchni A_0 wymiany ciepła określonego wymiennika ciepła dokonuje się z użyciem przekształconego równania Pécleta,

$$A_0 = \frac{\dot{Q}}{k_0 \Delta T_{sr}}, \quad (1)$$

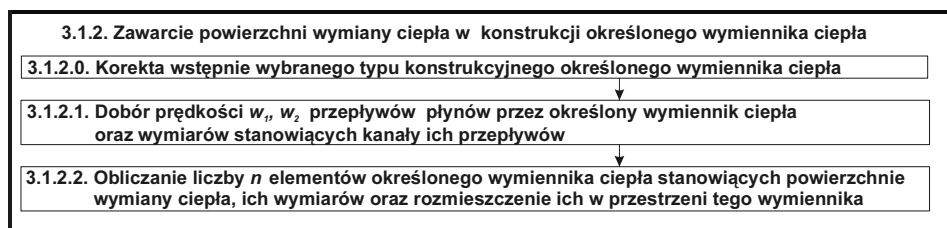
przy wstępnie założonej wartości współczynnika przenikania ciepła k_0 , korzystając z odpowiednich tablic oraz bez uwzględnienia osadów w wymienniku ciepła. Działanie zawarcia powierzchni wymiany ciepła w określonej konstrukcji wymiennika ciepła zdekomponowano na działania wskazane na rysunku 4.

Po wyborze typu konstrukcyjnego określonego wymiennika ciepła dobiera się wartości prędkości płynów wymieniających ciepło względem zakładanych rodzajów przepływów płynów, wyrażanych odpowiednimi liczbami Reynoldsa Re_1 i Re_2 . Dobiera się l_{ch} – liniowy wymiar charakterystyczny. Następnie oblicza się liczbę n elementów powierzchni wymiany ciepła (np. rur, płyt), które rozmieszcza się w przestrzeni wymiennika ciepła. Dalej doborom podlegają wszystkie elementy określonego wymiennika ciepła na podstawie katalogów producentów w celu pozyskania zbioru wielkości CI_i , określających cechy identyfikujące i -te dobierane elementy określonego wymiennika ciepła, w tym: cechy konstrukcyjne CK_i , cechy technologii wytwarzania CT_i , cechy jakości wytwarzania CJ_i ; $CI_i = \{CK_i, CT_i, CJ_i\}$ [12].



Rys. 3. Ogólny schemat działań projektowych wieloetapowego obliczenia powierzchni wymiany ciepła wymiennika(-ów) ciepła

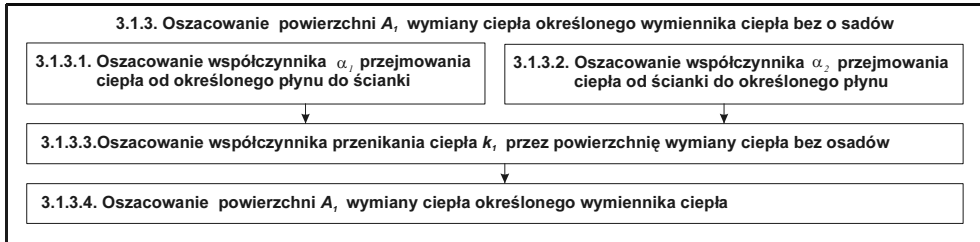
Fig. 3. General scheme of designing activities of multi-calculation of heat transfer area



Rys. 4. Schemat działań zawarcia powierzchni wymiany ciepła w określonej konstrukcji wymiennika ciepła

Fig. 4. General scheme of activities which include heat transfer area in the definite construction of the heat exchanger

Schemat działań oszacowania powierzchni wymiany ciepła określonego wymiennika ciepła bez osadów przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Schemat działań oszacowania powierzchni wymiany ciepła określonego wymiennika ciepła bez osadów

Fig. 5. General scheme of activities undertaken to estimate heat transfer area of the definite heat exchanger without fouling in this area

Działanie oszacowania wartości współczynników przyjmowania ciepła α_1 i α_2 odpowiednich płynów 1 i 2 związane jest z utworzeniem przedziałów wartości tych współczynników $[\alpha_{1,\min}, \alpha_{1,\max}]$ i $[\alpha_{2,\min}, \alpha_{2,\max}]$, które stanowią wyniki obliczeniowe z użytych określonych modeli do oszacowań tych współczynników. Następnie dokonuje się wyboru wartości α_1 i α_2 z tych określonych przedziałów do dalszych działań projektowych. Wyboru tego dokonuje się świadomie z jego konsekwencją na oszacowanie powierzchni wymiany ciepła A_1 i nadmiarowość tej powierzchni w dalszych działaniach.

W tym celu określa się zbiory cech $C_{proj,i}$, charakteryzujących rozważane zjawiska przyjmowania ciepła, które wyrażane są liczbami kryterialnymi. Po czym dokonuje się wyboru modeli, wiążących określone liczby kryterialne relatywnie do rodzajów i stanów skupienia płynów wymieniających ciepło w wymienniku. Przykład takiego postępowania przedstawiono na rysunku 6, odnośnie do oszacowania współczynnika przyjmowania ciepła α_2 .

Wielkości wejściowe: Re_2 , d_w i l w podanym na rysunku 6 przykładzie powstają z działania dotyczącego zawarcia powierzchni wymiany ciepła konstrukcji określonego wymiennika ciepła. Wielkości Re_2 i d_w wynikają z doboru prędkości w_2 przepływu wody chłodzącej skraplacz, a długość rur l wynika z obliczeń liczby n rur skraplacza i rozmieszczenia ich w jego przestrzeni.

Dalsze działania w omawianym zakresie wskazuje rysunek 5, gdzie k_1 oblicza się według wzoru:

$$k_1 = \frac{1}{\frac{A_{c0}}{A_{c1}\alpha_1} + \frac{A_{c0}}{A_{sr}} \delta_s + \frac{A_{c0}}{A_{c2}\alpha_2}}, \quad (2)$$

natomiast powierzchnię A_1 wymiany ciepła odpowiednio z wzoru (1).

Działanie oszacowania powierzchni A_2 wymiany ciepła określonego wymiennika ciepła, z uwzględnieniem prognozowanej grubości osadów, zdekomponowano na następujące działania: prognozowanie grubości narastania osadów na powierzchniach wymiany ciepła określonego wymiennika ciepła w zadanym czasie, oszacowanie współczynnika przenikania ciepła k_2 przez powierzchnię wymiany ciepła określonego wymiennika ciepła z osadami, oszacowanie powierzchni A_2 wymiany ciepła określonego wymiennika ciepła z uwzględnieniem prognozowanej grubości osadów.

W badaniach empirycznych tworzy się zbiór i -tych funkcji $\delta_{os,i} = f(\tau_i)_{\{C_{b,i}\}}$,

które wyrażają relacje między czasem τ_i , który należy do i -tych przedziałów $0 \leq \tau_i \leq \tau_{i,max}$, narastania osadów a i -tymi grubościami osadów $\delta_{os,i}$ na powierzchni wymiany ciepła, w określonych i -tych zbiorach cech $C_{b,i} = \{ [T_{i,min}, T_{i,max}], [\dot{m}_{i,min}, \dot{m}_{i,max}], [w_{i,min}, w_{i,max}], [L_{i,min}, L_{i,max}], [\sum b_{i,min}, \sum b_{i,max}], M_{r,i}, \sum F_i \}$.

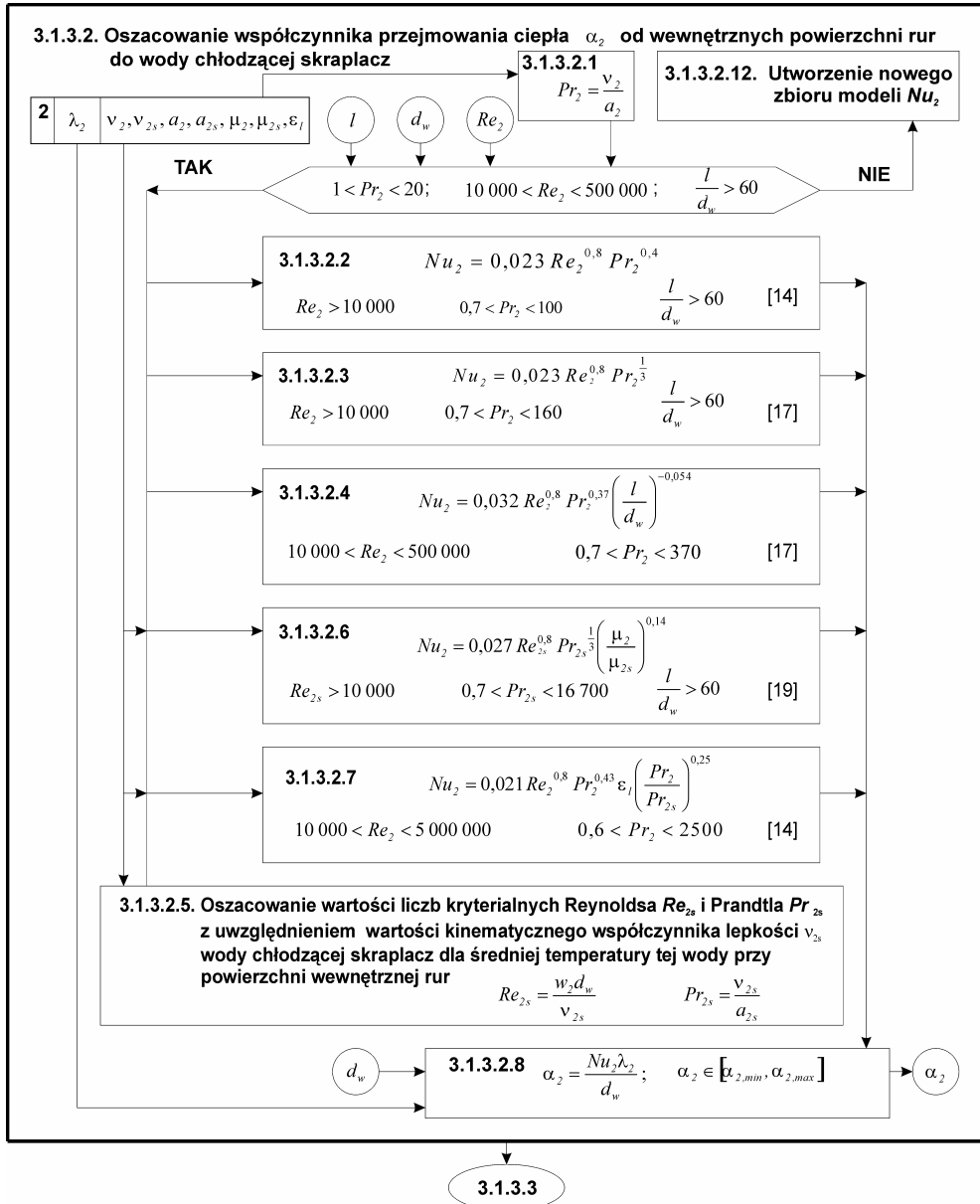
Wyróżnienie zbioru i -tych funkcji następuje ze względu na to, że płyny (indeks j) wymieniające ciepło w wymienniku ciepła mogą zmieniać swoje właściwości fizyczno-chemiczne $\sum F_{j,i}$, jak i ilość w nich zawartych mikroorganizmów $\sum b_{j,i}$, w różnych przedziałach czasu $0 \leq \tau_i \leq \tau_{i,max}$, podczas jego funkcjonowania w technicznym systemie energetycznym, np. w siłowni statku morskiego. Wówczas niemożliwe jest oszacowanie za pomocą jednej funkcji realnego przyrostu grubości osadów na powierzchni wymiany ciepła.

Przebieg procesu narastania osadów ściśle zależy od prędkości i temperatur płynów wymieniających ciepło, które zawierają się w określonym zbiorze danych albo założeń. Należy więc podjąć się prognozowania grubości osadów w i -tych przedziałach czasu τ_i , $0 \leq \tau_i \leq \tau_{i,max}$, w których występują określone warunki eksploatacyjne $C_{proj,i}$ przyjęte (prognozowane) w projektowaniu. Suma i -tych przedziałów czasu stanowi całkowity czas τ_z eksploatacji określonego wymiennika ciepła albo założony czas τ_c do jego czyszczenia. Po dokonaniu odpowiedniego wyboru funkcji $\delta_{os,i} = f(\tau_i)_{\{C_{b,i}\}}$ w ogólnym przypadku otrzymuje się:

$$\sum_{i=1}^n \delta_{os,j,i} = \sum_{i=1}^n f(\tau_i)_{\{C_{b,j,i}\}}, \quad (3)$$

przy czym $\delta_{os,i}$ stanowią wartości średnie z pomiarów, a funkcje tu wyrażone składane są przez projektanta z wyników badań na podobieństwo do funkcji sklepanych. Dalej oszacowuje się powierzchnię A_2 wymiany ciepła z użyciem wzoru (1), z uwzględnieniem prognozowanej grubości osadów w obliczeniach wartości k_2 po przekształceniu odpowiednio wyrażenia (2).

Pozostałe działania wskazane na rysunku 3, odnoszące się do podziału powierzchni wymiany ciepła A_2 i oszacowania nadmiaru powierzchni A_3 , przedstawiono w dalszej części tego artykułu.

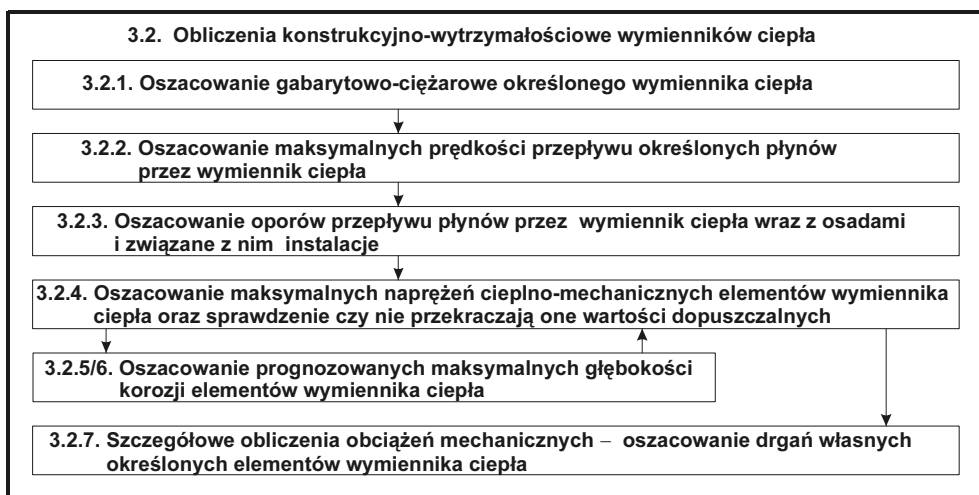


Rys. 6. Algorytm oszacowania współczynnika przejmowania ciepła od wewnętrznych powierzchni rur do wody chłodzącej skraplacz

Fig. 6. Algorithm for calculating the heat transfer coefficient of taking over the heat from the inside surfaces of the pipe wall to the water cooling the condenser

Na rysunku 7 wskazano schemat systemu działań obliczeń konstrukcyjno-wytrzymałościowych wymienników ciepła.

W działaniu oszacowania gabarytowo-ciężarowego określonego wymiennika ciepła sprawdzeniu podlegają i -te wymiary $L_{wc,i}$ oraz ciężar G_{wc} wymiennika wraz z płynami wymieniającymi ciepło, względem wartości maksymalnych $L_{wc\max,i}$ i $G_{wc\max}$, wynikających z projektowania technicznego systemu energetycznego, w którym ten wymiennik występuje. W wypadku przekroczenia wartości zakładanych $L_{wc\max,i}$ i $G_{wc\max}$ dokonuje się wyboru wielkości zawartych w zbiorze założeń, tj. prędkości przepływu określonego płynu przez wymiennik albo możliwej do zmiany temperatury określonego płynu, a następnie odpowiednio zmienia się ich wartości.



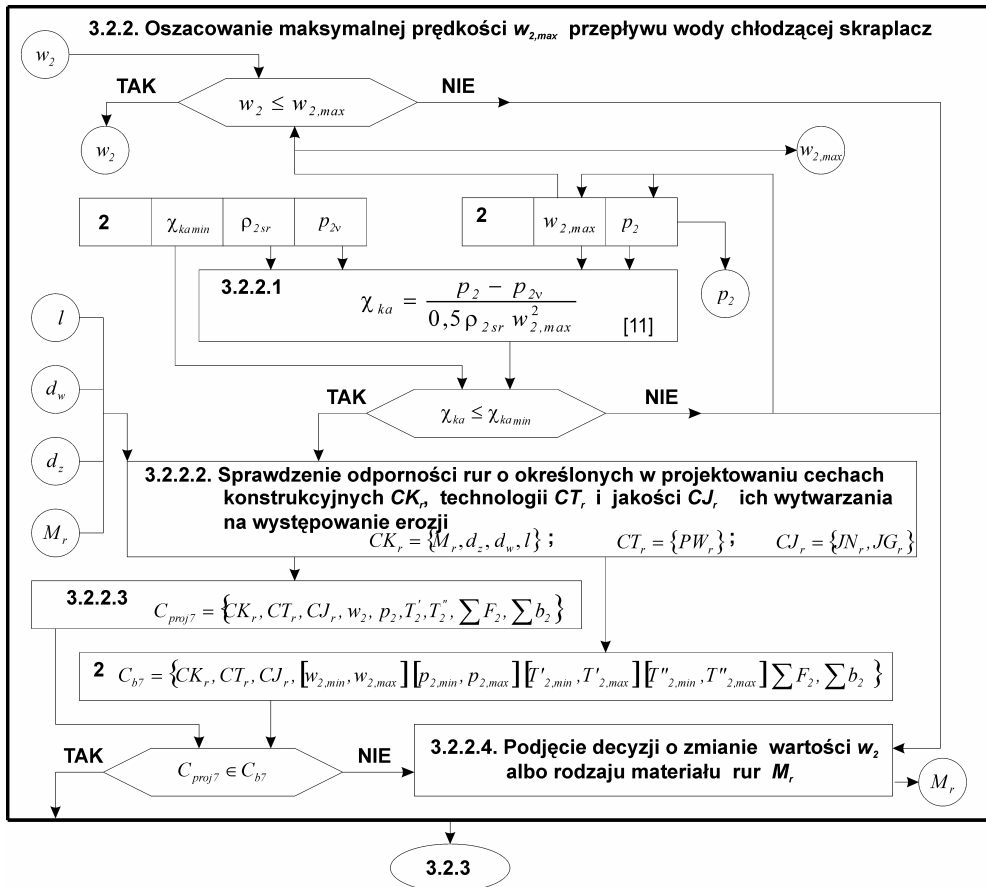
Rys. 7. Schemat systemu działań dotyczących obliczeń konstrukcyjno-wytrzymałościowych wymienników ciepła

Fig. 7. General outline of the system of activities undertaken to calculate the structural strength of heat exchangers

Oszacowanie maksymalnych prędkości przepływu określonych płynów przez wymiennik ciepła jest podejmowane w celu ograniczenia występowania zjawisk erozji i kawitacji w tym wymienniku podczas jego funkcjonowania w technicznym systemie energetycznym.

Doboru wartości projektowych maksymalnych prędkości $w_{i,\max}$ przepływu i -tych płynów przez określony wymiennik ciepła oraz ich ciśnień p_i statycznych dokonuje się po sprawdzeniu następującego warunku $\chi_{ka} \leq \chi_{ka,\min}$, gdzie wartość liczby kawitacji χ_{ka} wynika z projektowania, a $\chi_{ka,\min}$ wyznaczana jest empirycznie. Następnie sprawdza się odporność i -tych elementów wymienników ciepła na występowanie erozji poprzez porównanie zbiorów cech $C_{proj,i} \in C_{b,i}$,

gdzie $C_{proj,i}$ stanowi zbiór cech charakteryzujących zjawisko erozji, wynikający z obliczeń projektowych (np. C_{proj7} – rys. 8), a $C_{b,i}$ zbiór cech wynikający z badań empirycznych (np. C_{b7} – rys. 8). Przykład zilustrowano na rysunku 8.



Rys. 8. Algorytm oszacowania maksymalnej prędkości przepływu wody chłodzącej skraplacz

Fig. 8. Algorithm for calculating the maximum velocity of the flow of the water cooling the condenser

Wielkości wejściowe: w_2 , d_w , l , d_z , M_r w podanym na rysunku 8 przykładzie wynikają z działania, dotyczącego zawarcia powierzchni wymiany ciepła w konstrukcji określonego wymiennika ciepła. Wielkości w_2 i d_w wynikają z doboru prędkości w_2 przepływu wody chłodzącej skraplacz, a l , d_z , M_r wynikają z obliczeń liczby n rur skraplacza i rozmieszczenia ich w jego przestrzeni.

Obliczenia oporów przepływu płynów przez wymiennik ciepła oraz instalacje z nim związane wykonuje się z uwzględnieniem ich zanieczyszczeń osadami.

Całkowite opory przepływu Δp_{str} określonego płynu przez wymiennik ciepła i instalację z nim związaną oblicza się z następującej zależności [10]:

$$\Delta p_{str} = \sum_{i=1}^n \Delta p_{t,i} + \sum_{i=1}^n \Delta p_{m,i} + \Delta p_a. \quad (4)$$

W działaniu tym istotne jest oszacowanie oporów tarcia przepływów płynów przez określony wymiennik ciepła i instalację z nim związaną oraz oporów miejscowych przepływów tych płynów. Opory akceleracji Δp_a , wynikające z przyspieszenia płynu, z reguły są pomijane ze względu na mały ich wpływ względem oporów całkowitych przepływu płynu z wyjątkiem przepływu, podczas którego następuje zamiana fazy (odparowanie płynu) [10].

Dokonuje się identyfikacji i -tych elementów określonego wymiennika ciepła i instalacji z nim związanych względem oporów przepływów płynów. Następnie oblicza się i -te wartości współczynników oporów tarcia $\lambda_{str,i}$ z użyciem stosownych wzorów, określających te współczynniki względem rodzajów przepływów płynów przez te elementy oraz głównie względem stanów powierzchni tych elementów. Dalej wyznacza się i -te wartości współczynników oporów miejscowych ξ_i dla określonych i -tych elementów w drodze eksperymentów, które uwzględniają prędkości przepływów określonych płynów i wymiary charakteryzujące badane elementy.

Jednak oszacowywane wartości $\lambda_{str,i}$ mogą się znacznie różnić od wartości rzeczywistych ze względu na to, że stan powierzchni (chropowatość) wymiany ciepła oraz przewodów instalacji ulegają zmianie w czasie eksploatacji wymiennika ciepła wskutek erozji, kawitacji i narastania osadów. Dlatego wyznacza się przedziały wartości współczynników oporów tarcia $\lambda_{str,i} \in [\lambda_{str,i,min}, \lambda_{str,i,max}]$, które wynikają z użytych w tym celu wzorów, a następnie przedziały wartości oporów tarcia $\Delta p_{t,i} \in [\Delta p_{t,i,min}, \Delta p_{t,i,max}]$. Zwiększa to pewność, że w dalszej podjętych obliczeniach właściwie dobrane zostaną pompy oraz oszacowane poprawnie koszty całkowite określonego wymiennika ciepła wraz z instalacjami z nim związanymi. Do projektowania wprowadza się wartość maksymalną $\Delta p_{t,i,max}$ z określonego przedziału. Utworzeniu podlegają również przedziały wartości współczynników oporów miejscowych ξ_i dla i -tych elementów $\xi_i \in [\xi_{i,min}, \xi_{i,max}]$, a dalsze postępowanie jest analogiczne jak powyżej wskazane, dla wprowadzenia do dalszych obliczeń projektowych określonej wartości $\Delta p_{m,i,max}$ z określonego przedziału $\Delta p_{m,i} \in [\Delta p_{m,i,min}, \Delta p_{m,i,max}]$.

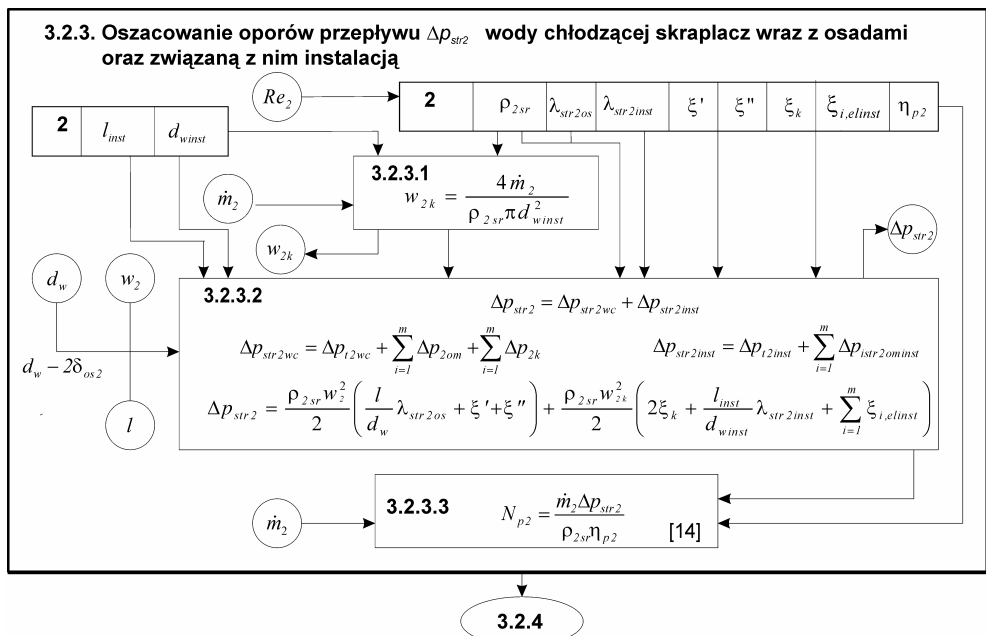
Na rysunku 9 przedstawiono powyższe zagadnienia, gdzie wielkości wejściowe: w_2 , d_w , l wynikają z działania dotyczącego zawarcia powierzchni wymiany ciepła w konstrukcji określonego wymiennika ciepła, wielkość m_2 wynika z działania wieloetapowego obliczenia powierzchni wymiany ciepła, a δ_{os2} wynika z działania prognozowania grubości narastania na powierzchniach wymiany ciepła określonego wymiennika ciepła w zadanym czasie.

Kolejne działanie obejmuje oszacowanie maksymalnych naprężeń cieplno-mechanicznych elementów wymiennika ciepła oraz sprawdzenie, czy nie przekraczają one wartości dopuszczalnych.

Dokonuje się identyfikacji elementów określonego wymiennika ciepła, które podczas funkcjonowania w określonych warunkach (warunki te są określane wartościami następujących wielkości: p_j , T_j' , T_j'') są najbardziej obciążone cieplnie i mechanicznie. Następnie wykonuje się obliczenia sprawdzające, czy wartości naprężeń cieplnych i mechanicznych σ_i nie przekraczają wartości maksymalnych dla tych elementów. W wypadku ich przekroczenia rozważa się zmianę w konstrukcji określonego wymiennika, wprowadzenie kompensatora naprężeń albo dokonuje się zmiany wartości wybranych wielkości, stanowiących wewnętrzne warunki eksploatacyjne wymiennika ciepła, np. ciśnień lub temperatury przynależnych do zbioru założeń.

W projektowaniu wymienników ciepła należy brać pod rozwagę zależność następujących wielkości:

$$\sigma_i = f(p_1, p_2, T_1', T_1'', T_2', T_2'', T_{ot}, M_i, L_i). \quad (5)$$



Rys. 9. Algorytm oszacowania oporów przepływu wody chłodzącej skraplacz wraz z osadami oraz związaną z nim instalacją

Fig. 9. Algorithm for calculating the pressure drop of the flow of the water cooling the condenser with the fouling on the inside heat transfer area and with the installation connected with it

Wartości wielkości σ_i wprowadza się do zbioru określającego cechy identyfikujące i -te elementy wymienników ciepła, który wykorzystuje się w doborze funkcji niezawodności i -tych elementów określonego wymiennika ciepła.

Prognozowania maksymalnej głębokości korozji elementów wymiennika ciepła dokonuje się ze względu na obliczenia maksymalnych naprężeń cieplno-mechanicznych (korozję uwzględnia się w powtórnych obliczeniach) oraz obliczenia dotyczące drgań własnych elementów wymienników ciepła. Natomiast postępowanie jest analogiczne do wcześniej przedstawionego prognozowania grubości narastania osadów na powierzchni wymiany ciepła.

Celem oszacowania drgań f_i własnych i -tych elementów wymienników ciepła jest wprowadzenie wartości f_i do zbioru wielkości określających cechy identyfikujące, który wykorzystuje się w doborze funkcji niezawodnościowych tych elementów. Obliczane wartości f_i wchodzi w skład zbioru wielkości, charakteryzujących warunki eksploatacyjne (obciążenia mechaniczne) elementów.

Optymalizacji podlegają wartości prędkości w przepływu określonych płynów przez wymienniki ciepła i temperatura T_2'' płynu chłodzącego na wyjściu z określonego wymiennika ciepła, ze względu na to, że występują w istotnych relacjach między określonymi wielkościami w projektowaniu wymienników ciepła. Podstawą powyższej optymalizacji jest ogólne równanie kosztów całkowitych $K_C(\tau)$ określonego wymiennika ciepła wraz z instalacjami z nim związanymi (w tym odnośnie do pomp, armatury, rurociągów i innych elementów łącznie z płynami wymieniającymi ciepło), w czasie τ .

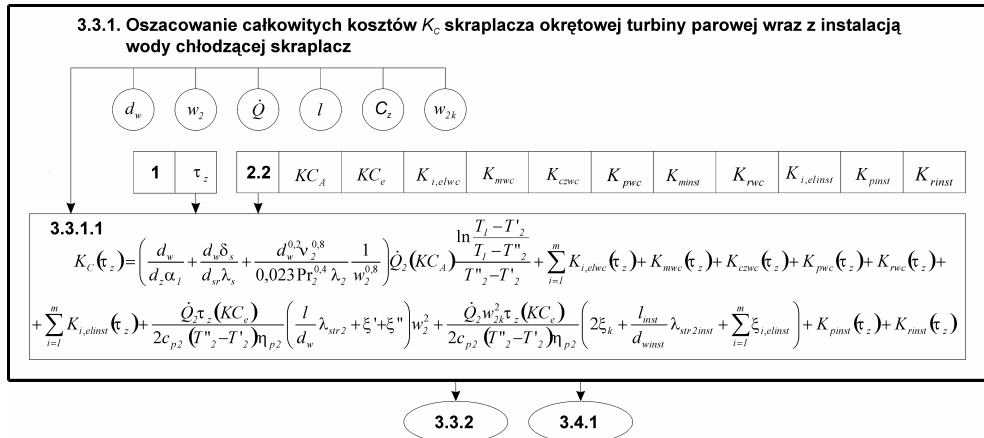
$$K_C(\tau) = K_{Iwc}(\tau) + K_{Inst}(\tau) + K_{Ewc}(\tau) + K_{Einst}(\tau), \quad (6)$$

gdzie:

- $K_{Iwc}(\tau)$ – koszty inwestycji określonego wymiennika ciepła, w czasie τ [zł],
- $K_{Inst}(\tau)$ – koszty inwestycji instalacji płynów wymieniających ciepło określonego wymiennika ciepła, w czasie τ [zł],
- $K_{Ewc}(\tau)$ – koszty eksploatacji określonego wymiennika ciepła, w czasie τ [zł],
- $K_{Einst}(\tau)$ – koszty eksploatacji instalacji płynów wymieniających ciepło określonego wymiennika ciepła, w czasie τ [zł].

Rysunek 10 przedstawia rozwinięcie równania (6).

Koszty inwestycji $K_{Iwc}(\tau)$ określonego wymiennika ciepła w czasie τ , zgodnie z publikacją [18], dotyczą całego okresu jego użytkowania. Są to koszty związane z inwestycją dotyczącą powierzchni wymiany ciepła, a także pozostałych elementów, z których składa się określony wymiennik ciepła, koszty i -tych elementów wymiennika ciepła $K_{i,elwc}(\tau)$, w tym koszty $K_{mwc}(\tau)$ montażu tego wymiennika i amortyzacji w przypadku, gdy inwestycja realizowana jest ze środków własnych.



Rys. 10. Algorytm oszacowania całkowitych kosztów skraplacza okrętowej turbiny parowej wraz z instalacją wody chłodzącej skraplacz

Fig. 10. Algorithm for calculating the overall costs of the condenser of marine steam turbine with the installation of water cooling the condenser

Koszty inwestycji instalacji $K_{inst}(\tau)$ płynów wymieniających ciepło określonego wymiennika ciepła są analogiczne jak wcześniej wskazane koszty odnośnie do wymiennika ciepła: koszty $K_{i,elinst}(\tau)$ elementów instalacji, koszty $K_{minst}(\tau)$ montażu instalacji.

W skład kosztów eksploatacji $K_{Ewc}(\tau)$ określonego wymiennika ciepła, w czasie τ wchodzi: koszty $K_{czw_c}(\tau)$ czyszczeń powierzchni wymiany ciepła określonego wymiennika ciepła, koszty $K_{rwc}(\tau)$ profilaktycznych wymian określonych elementów wymiennika ciepła, koszty przeglądów i remontów wymiennika ciepła oraz koszty $K_{pw_c}(\tau)$ diagnozowania wymiennika w czasie jego funkcjonowania w technicznym systemie energetycznym.

W skład kosztów eksploatacji $K_{Einst}(\tau)$ instalacji płynów wymieniających ciepło określonego wymiennika ciepła, w czasie τ wchodzi: koszty $K_{finst}(\tau)$ funkcjonowania instalacji (koszty pompowania płynów wymieniających ciepło, w tym koszty energii elektrycznej i płynów), koszty $K_{rinst}(\tau)$ przeglądów i remontów technicznych instalacji oraz koszty $K_{pinst}(\tau)$ diagnozowania instalacji w czasie funkcjonowania technicznego systemu energetycznego.

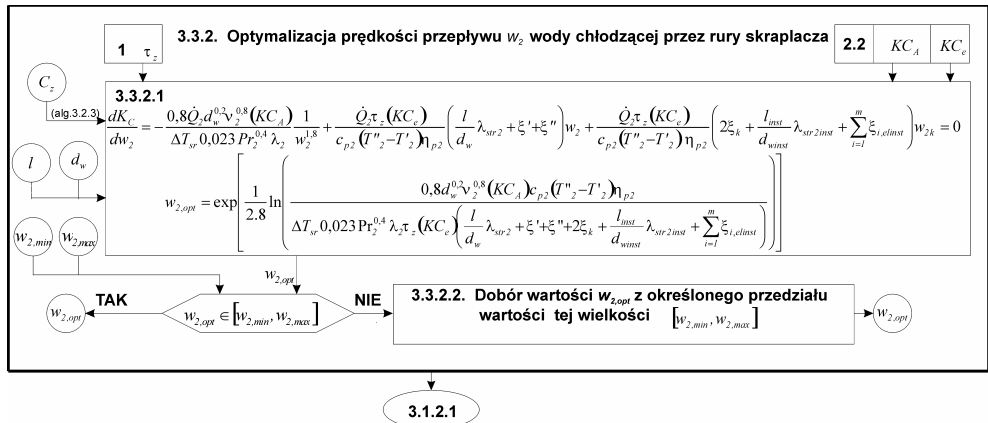
Za kryterium optymalizacji wartości wskazanych wielkości projektowych przyjmuje się minimum sumy kosztów całkowitych $\min \sum_{i=1}^n K_i(\tau)$ w czasie τ .

Czas τ jest wartością zadaną τ_z i stanowi okres, w którym rozważana jest optymalizacja, a wynika z przyjętego kryterium w optymalizacji technicznego systemu energetycznego, w którym określony wymiennik ciepła występuje.

W celu wyznaczenia $\min \sum_{i=1}^n K_i(\tau_z)$ w czasie τ_z określa się następujące zależności:

$$K_C(\tau_z) = f(w_1), \quad K_C(\tau_z) = f(w_2), \quad K_C(\tau_z) = f(T_2''). \quad (7)$$

Przykład obliczeń wartości wielkości optymalizowanej przedstawiono na rysunku 11.



Rys. 11. Algorytm optymalizacji prędkości przepływu wody chłodzącej przez rury skraplacza
Fig. 11. Algorithm for optimizing the velocity values of the flow of the cooling water through the pipes of the condenser

Ograniczenia prędkości w_2 określonego płynu, w jej optymalizacji, stanowią maksymalne i minimalne wartości tej wielkości $[w_{2,min}, w_{2,max}]$. Wartość minimalna $w_{2,min}$ wynika z relacji między tą prędkością przepływu określonego płynu a osadzaniem się zanieczyszczeń na powierzchni wymiany ciepła, wartość maksymalna $w_{2,max}$ wynika z relacji między prędkością przepływu określonego płynu a erozją i kawitacją.

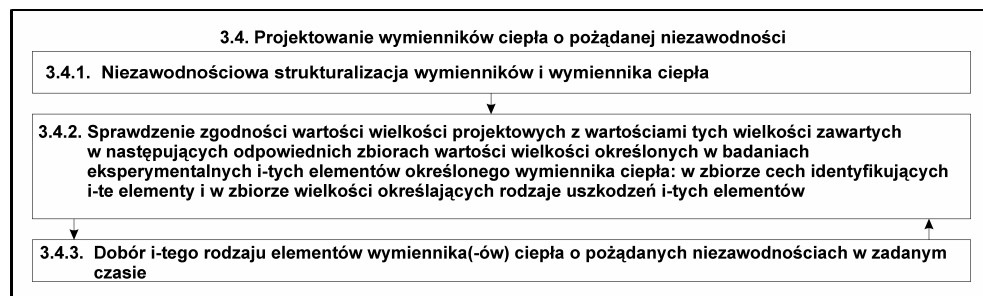
Ograniczenia temperatury T_2'' płynu chłodzącego na wyjściu z wymiennika ciepła stanowią maksymalne i minimalne wartości tej wielkości $[T_{2,min}'', T_{2,max}'']$. Wartość minimalna $T_{2,min}''$ jest ograniczona wartością temperatury na wejściu do wymiennika ciepła, a wartość maksymalna $T_{2,max}''$ wynika z relacji między tą temperaturą płynu chłodzącego a wytrącaniem się zanieczyszczeń (soli) na powierzchni wymiany ciepła.

Oszacowane optymalne wartości wyróżnionych wielkości, tj. prędkości $w_{2,opt}$ przepływu płynu chłodzącego i optymalnej temperatury $T_{2,opt}''$ tego płynu na wyjściu z wymiennika, wprowadza się ponownie do projektowania jako kolejne

sprężenie zwrotne po sprawdzeniu czy zawierają się we wcześniej określonych przedziałach: $[w_{2,\min}, w_{2,\max}]$ i $[T''_{2,\min}, T''_{2,\max}]$. Następnie dokonuje się powtórnych obliczeń projektowych określonego wymiennika ciepła oraz oszacowuje się jego koszty całkowite w zadanym czasie τ_z . Ostatecznie wartości wielkości optymalizowanych przyjmowane są w projektowaniu określonego wymiennika ciepła po spełnieniu wyróżnionych warunków projektowych, które odnoszą się do określonych cech wymiennika ciepła, w tym pożądanej wartości niezawodności $R_{wc}(t_z)$ wymiennika, w zadanym czasie (trwałości) t_z , określonych maksymalnych wymiarów $L_{wc,\max,i}$ wymiennika ciepła oraz jego maksymalnego ciężaru $G_{wc,\max}$ wraz z płynami wymieniającymi ciepło.

W algorytmach 3.3.1 i 3.3.2, przedstawionych na rysunkach 10 i 11, wszystkie wartości wielkości, które przyjmuje się w zbiorze założeń C_z , są wartościami obliczeniowymi w działaniach poprzedzających omawianą optymalizację. Wartości te przyjmuje się po uwzględnieniu określonych w tych działaniach warunków projektowych.

Projektowanie wymienników ciepła o pożądanej niezawodności przedstawiono na rysunku 12.



Rys. 12. Ogólny schemat projektowania wymienników ciepła o pożądanej niezawodności

Fig. 12. General scheme of designing heat exchangers of the desired reliability

Wymaganą niezawodnością technicznego systemu energetycznego, na podstawie [3], nazwano wartość tej niezawodności w zadanym czasie, wynikającą z potrzeby realizacji przeznaczonych mu zadań, konieczności zapewnienia szeroko pojmowanego bezpieczeństwa technicznego systemu energetycznego i jego otoczenia (ludzi, innych obiektów technicznych i środowiska przyrodniczego) oraz potrzeby efektywnej (optymalnej według kryteriów ekonomicznych) eksploatacji wskazanego systemu.

Pożądaną niezawodnością wymiennika ciepła nazwano wartość niezawodności wymiennika ciepła w zadanym czasie, wynikającą z wymaganej niezawodności technicznego systemu energetycznego, w którym ten wymiennik występuje. Oszacowania wartości definiowanej wielkości dokonuje się, wykorzystując metodę zawartą w [3].

Niezawodnościowa strukturalizacja wymienników i wymiennika ciepła.

Zagadnienia transformacji wymaganej niezawodności technicznego systemu energetycznego w pożądane niezawodności maszyn i urządzeń tego systemu podane są w pracy [3]. Na podstawie wartości pożądanej niezawodności określonego wymiennika ciepła, wynikającej z wymaganej niezawodności technicznego systemu energetycznego i miejsca tego wymiennika w strukturze niezawodnościowej tego systemu, w projektowaniu tegoż wymiennika ciepła określa się pożądane wartości niezawodności jego elementów. Poniższe przykładowe zależności ilustrują to postępowanie.

Wykreowano model niezawodności $R_{wc}(t)$ płaszczowo-rurowego wymiennika ciepła [12]. Model struktury niezawodnościowej wymiennika ciepła określono na podstawie modeli podstawowych struktur niezawodnościowych znanych z literatury przedmiotu oraz uwzględniono zadania (funkcje) do realizacji przez wymiennik ciepła, a także rodzaje uszkodzeń i konstrukcję określonego wymiennika ciepła. Model ten wyraża się jako

$$R_{wc}(t) = [R_{1,i}(t)]^2 [R_{2,i}(t)]^2 R_3(t) [R_{4,i}(t)]^n [R_{5,i}(t)]^2 [R_{6,i}(t)]^m, \quad (8)$$

a składa się z niezawodności następujących elementów: każdej z dwóch ścian sitowych $R_{1,i}(t)$, każdej z dwóch pokryw $R_{2,i}(t)$, płaszcza $R_3(t)$, każdej i -tej z n liczby rur $R_{4,i}(t)$, każdej z dwóch uszczeltek $R_{5,i}(t)$, każdej i -tej z m śrub złączniowych $R_{6,i}(t)$.

Biorąc pod rozwagę model (8), pożądaną wartość niezawodności $R_{wc}(t_z)$ określonego wymiennika ciepła w zadanym czasie (trwałości) t_z , wyodrębnia się podsystemy określonych elementów wymiennika ciepła, a następnie oszacowuje się pożądane wartości niezawodności i -tych elementów, które, będąc w relacjach między sobą, stanowią model wyszczególnionych podsystemów, np. rozważając niezawodność $[R_{4,i}(t_z)]^n$ podsystemu rur, pożądana wartość niezawodności n -tej rury wynosi:

$$R_{4,i}(t_z) = \left[R_{wc}(t_z)^{\frac{1}{6}} \right]^{\frac{1}{n}}. \quad (9)$$

Zakłada się tu, że zostały przeprowadzone eksperymentalne badania i -tych elementów określonego wymiennika ciepła w celu oszacowania funkcji niezawodności $R_i(t) = f(t_i)_{\{CI_{e,i}, W_{e,i}, W_{m,e,i}\}}$, i -tych elementów w zadanych i -tych przedziałach czasu $0 \leq t_i \leq t_{i,\max}$, przez producentów elementów wymienników ciepła. W tych badaniach uwzględnia się cechy identyfikujące $CI_{e,i}$ i -te elementy określonego wymiennika ciepła, warunki ich eksploatacji $W_{e,i}$ i rodzaje ich uszkodzeń $W_{m,e,i}$. Po czym sprawdza się, czy wartości wielkości projektowych

$CI_i, W_{ep,i}, W_{ru,i}$ zawierają się w następujących odpowiednich zbiorach wartości, wielkości określonych w badaniach eksperymentalnych i -tych elementów – przykład zilustrowano na rysunku 13. Na tej podstawie podejmuje się decyzje o przyjęciu w projektowaniu określonego wymiennika ciepła i -tych rozważanych elementów oraz funkcji niezawodności $R_i(t)_{\{CI_i, W_{ep,i}, W_{ru,i}\}}$ tych elementów.

W przytoczonych przykładach algorytmów na rysunkach 13 oraz 14 wszystkie wartości wielkości w zbiorze założeń C_z są wartościami obliczeniowymi w działaniach poprzedzających omawiane zagadnienia, po uwzględnieniu wszystkich występujących w tych działaniach warunków projektowych.

Następnie porównuje się pożądane wartości niezawodności rozważanych i -tych elementów $R_i(t_z)$, pozyskanych (w pierwszej kolejności) w drodze strukturalizacji wymienników ciepła z wartością niezawodności $R_i(t_z)_{\{CI_{e,i}, W_{e,i}, W_{ru,e,i}\}}$ rodzajowo takich samych i -tych elementów o niezawodności pozyskiwanych w drodze badań empirycznych – rysunek 14.

Na rysunku 14 przedstawiono również możliwość wyboru dalszych działań projektowych w wypadku, gdy nie są dostępne elementy o określonych wartościach niezawodności w zadanym czasie.

Wykorzystując funkcje niezawodności $R_i(t) = f(t_i)_{\{CI_{e,i}, W_{e,i}, W_{ru,e,i}\}}$ i -tych elementów określonego wymiennika ciepła, odczytuje się wartości niezawodności $R_i(t_z)_{\{CI_{e,i}, W_{e,i}, W_{ru,e,i}\}}$ tych elementów, w zadanym czasie t_z . Umożliwia to wprowadzanie tych wartości niezawodności elementów do określonych struktur niezawodnościowych i obliczanie niezawodności wymiennika ciepła albo wymienników ciepła funkcjonujących w określonej strukturze niezawodnościowej w zadanym czasie na etapie ich projektowania. W wyborze tym należy się kierować indywidualnymi przesłankami, które wynikają z funkcjonowania projektowanego wymiennika(-ów) ciepła w technicznym systemie energetycznym.

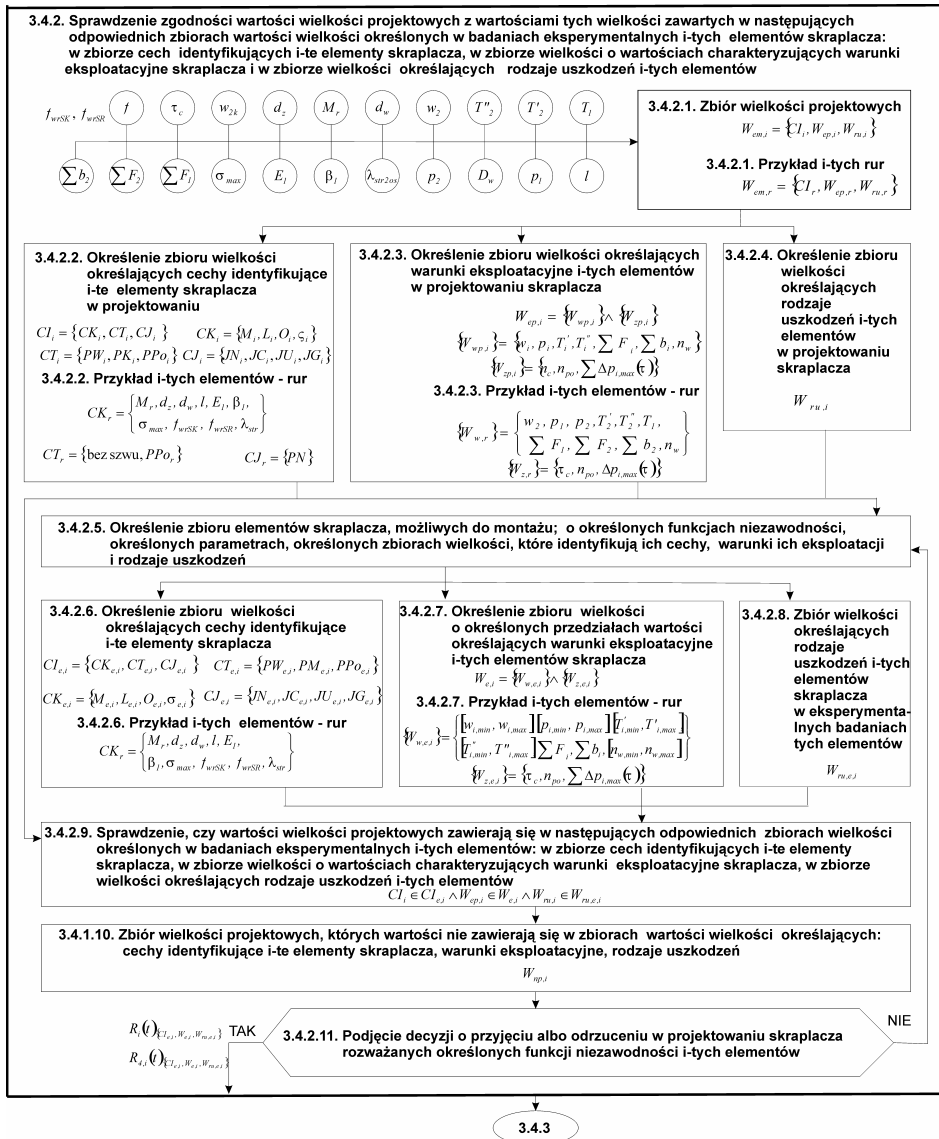
Jeśli występuje potrzeba zwiększenia niezawodności określonego wymiennika ciepła, to możliwy jest podział powierzchni A_2 , np. na dwa wymienniki ciepła. W takim przypadku można rozważyć system wymienników ciepła o strukturze równoległej $R_r(t_z)$ lub o strukturze z rezerwą niepracującą $R_{np}(t_z)$. Przykład dotyczy struktury równoległej, co wyraża się:

$$R_r(t_z) = 1 - [1 - R_{wcl/2}(t_z)]^2, \quad (10)$$

gdzie $R_{wcl/2}(t_z)$ oznacza wartość niezawodności każdego wymiennika ciepła w zadanym czasie trwałości t_z , w określonej strukturze. W celu oszacowania wartości $R_{wcl/2}(t_z)$ przyrównuje się pożądaną wartość niezawodności określonego wymiennika ciepła $R_{wc}(t_z)$ w zadanym czasie (trwałości) t_z do wartości niezawodności wybranej struktury wymienników ciepła, np. $R_{wc}(t_z) = R_r(t_z)$. Po czym oszacowaniu podlegają niezawodności każdego z dwóch $R_{wcl/2}(t_z)$ wymienników

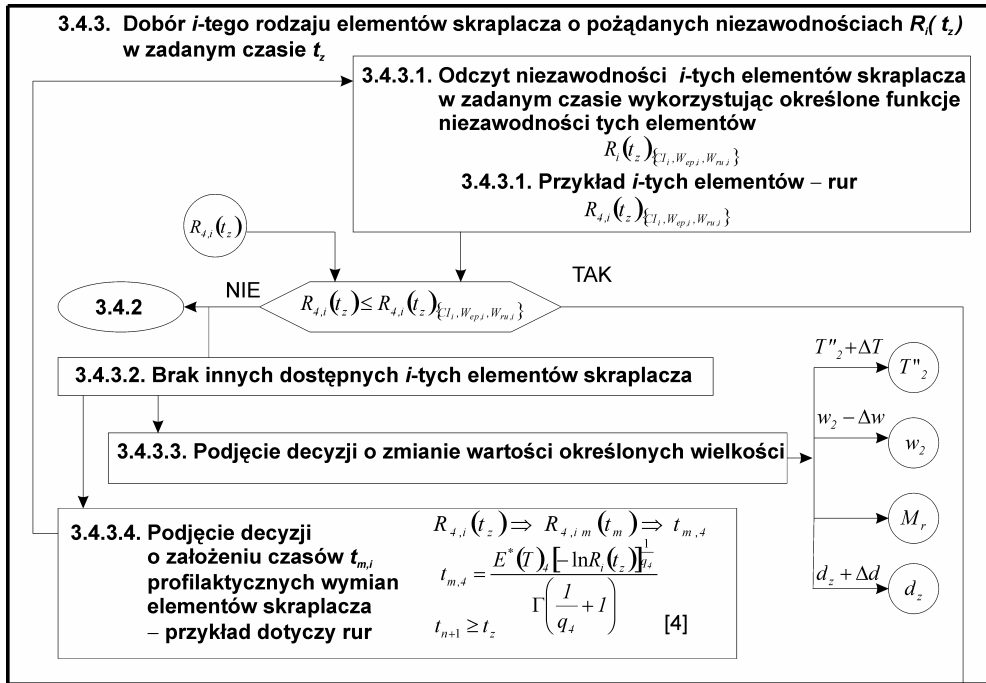
ciepła funkcjonujących w branych pod rozwagę strukturach niezawodnościowych, dla systemu dwóch wymienników ciepła funkcjonujących w strukturze równoległej:

$$R_{wc1/2}(t_z) = 1 - [1 - R_r(t_z)]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$



Rys. 13. Algorytm sprawdzenia zgodności wartości wielkości projektowych z wartościami tych wielkości zawartych w odpowiednich zbiorach wielkości określonych w badaniach eksperymentalnych i-tych elementów skraplacza

Fig. 13. Algorithm for checking the conformity of the design data values with the values of these data contained in the appropriate sets in the experimental investigations of i-number elements of the condenser



Rys. 14. Algorytm doboru i -tego rodzaju elementów skraplacza o pożądanых niezawodnościach w zadanym czasie

Fig. 14. Algorithm for selecting the elements of the condenser of the desired reliability in the set time

Podziału oszacowanej powierzchni wymiany ciepła, którą zawiera się w określonej liczbie wymienników ciepła, dokonuje się ze względu na stawiane kryteria projektowe, które odnoszą się do: całkowitych wymiarów określonego wymiennika ciepła $L_{wc,i} \leq L_{wc,max,i}$, maksymalnego ciężaru określonego wymiennika ciepła wraz z płynami wymieniającymi ciepło $G_{wc} \leq G_{wc,max}$, pożądaney wartości niezawodności $R_{wc}(t_z)$ określonego wymiennika ciepła w zadanym czasie (trwałości) t_z $R_{wc}(t_z) \leq R_{wc}(t_z)_{\{Cl_{wc}, W_{ep,wc}, W_{ru,wc}\}}$, gdzie wartość niezawodności wymiennika ciepła $R_{wc}(t_z)_{\{Cl_{wc}, W_{ep,wc}, W_{ru,wc}\}}$ wynika z doborów i -tych elementów wymiennika ciepła o określonej niezawodności w zadanym czasie t_z oraz w określonych warunkach.

Nadmiar powierzchni wymiany ciepła oszacowuje się, gdy powierzchnię A_2 wymiany ciepła dzieli się np. na dwa wymienniki ciepła, a strumień ciepła wymieniany jest tylko przez jeden wymiennik. W takim przypadku następują zmiany wartości: prędkości w_2 przepływu określonego płynu przez wymiennik ciepła oraz masowego natężenia przepływu \dot{m}_2 tego płynu, wskutek wyłączenia z eksploatacji wymiennika uszkodzonego. Powierzchnię wymiany ciepła zwiększa się względem oszacowanej powierzchni A_2 o wartość, która zapewnia wymianę danej ilości ciepła w nowo określonych warunkach eksploatacyjnych określonego funkcyjnego

jącego wymiennika ciepła w technicznym systemie energetycznym. Taki przypadek projektowy wymaga powtórnych obliczeń projektowych ze względu na zmianę wartości wcześniej wskazanych wielkości w_2 i \dot{m}_2 . Dodatkowo prognozowaniu podlega grubość osadów, ponieważ wyróżnione wielkości w_2 i \dot{m}_2 mają istotny wpływ na proces osadzania się osadów na powierzchni wymiany ciepła. Ostatecznie do obliczeń korekty oszacowania powierzchni wymiany ciepła wprowadza się wartość większej grubości osadów, co wyraża wartość współczynnika przenikania ciepła k_n , uwzględniająca nowo oszacowane grubości osadów. Wówczas obliczeniu podlega wartość powierzchni A_3 .

Wnioski zostaną podane w drugiej części artykułu.

Wykaz ważniejszych oznaczeń wielkości oraz symboli

- A_{c0} – powierzchnia odniesienia w obliczaniu i -tego współczynnika przenikania ciepła k_i [m^2],
- A_{c1} – powierzchnia wymiany ciepła określonego wymiennika ciepła, po stronie płynu chłodzonego (grzewczego) [m^2],
- A_{c2} – powierzchnia wymiany ciepła określonego wymiennika ciepła, po stronie płynu chłodzącego (podgrzewanego) [m^2],
- A_{sr} – średnia (logarytmiczna dla powierzchni cylindrycznych) wartość powierzchni wymiany ciepła, obliczana z użyciem wartości A_{c1} i A_{c2} [m^2],
- a_2 – współczynnik wyrównywania temperatury wody chłodzącej skraplacz [m^2/s],
- $C_{proj,i}$ – zbiór cech charakteryzujących określone i -te rozważane zjawisko (proces), wartości określonych w tym zbiorze cech są uwzględniane w projektowaniu,
- $c_{p,j}$ – średnie ciepło właściwe j -tego płynu przy stałym ciśnieniu p [J/kgK],
- D_w – średnica wewnętrzna płaszczu skraplacza [m],
- d_w – średnica wewnętrzna rur skraplacza [m],
- d_{winst} – średnica wewnętrzna rur instalacji wody chłodzącej skraplacz [m],
- d_z – średnica zewnętrzna rur skraplacza [m],
- E_I – moduł sprężystości rur skraplacza [N/m^2],
- f_{wrSK} – częstotliwość drgań własnych rury skraplacza, w przęśle skrajnym [Hz],
- f_{wrSR} – częstotliwość drgań własnych rury skraplacza, w przęśle środkowym [Hz],
- G_{wemax} – maksymalny ciężar określonego wymiennika ciepła wraz z płynami wymieniającymi ciepło [N],
- JC_i – certyfikaty specjalistyczne producentów i -tych elementów skraplacza,
- JG_i – gwarancje producentów na i -te elementy skraplacza,
- JN_i – normy wykonania i -tych elementów skraplacza,
- JU_i – uprawnienia do produkcji i -tych elementów skraplacza,
- KC_A – cena powierzchni wymiany ciepła skraplacza [$zł/m^2$],
- KC_e – cena energii elektrycznej [$zł/kWh$],
- L_i – wymiary i -tych elementów określonego wymiennika ciepła [m],
- $L_{wemax,i}$ – maksymalne wymiary określonego wymiennika ciepła [m],
- l – długość rur skraplacza [m],

- l_{inst} – długość instalacji wody chłodzącej skraplacz [m],
 M_i – rodzaj (symbol i nazwa) materiałów i -tych elementów (indeks r – rur) określonego wymiennika ciepła,
 \dot{m}_j – masowe natężenie przepływu j -tego płynu wymieniającego ciepło [kg/s],
 Nu – liczba Nusselta,
 N_{p2} – moc pompy wody chłodzącej skraplacz [W],
 n – liczba rur skraplacza,
 n_c – liczba czyszczeń rur skraplacza w zadanym czasie τ_z ,
 n_{po} – liczba przekroczeń maksymalnych obciążeń cieplnych skraplacza, w określonym przedziale czasu,
 n_w – liczba włączeń albo wyłączeń z eksploatacji skraplacza w zadanym czasie τ_z ,
 O_i – odległości między i -tymi elementami określonego wymiennika ciepła,
 Pr – liczba Prandtla,
 PK_i – kolejność montażu i -tych elementów określonego wymiennika ciepła,
 PPO_i – rodzaj technologii połączeń i -tych elementów określonego wymiennika ciepła,
 PW_i – rodzaj technologii wytwarzania i -tych elementów określonego wymiennika ciepła,
 p_j – ciśnienie określonego j -tego płynu wymieniającego ciepło w wymienniku ciepła [Pa],
 p_{2v} – prężność pary wodnej (podczas przepływu wody chłodzącej) w określonej temperaturze w skraplaczu [Pa],
 Re – liczba Reynoldsa,
 $R_{wc}(t_z)$ – pożądana wartość niezawodności określonego wymiennika ciepła, w zadanym czasie (trwałości) t_z ,
 \dot{Q} – strumień ciepła wymieniany między płynami w określonym wymienniku(-ach) ciepła [W],
 T_j' – temperatura j -tego płynu na wejściu do określonego wymiennika ciepła [K],
 T_j'' – temperatura j -tego płynu na wyjściu z określonego wymiennika ciepła [K],
 T_{ot} – temperatura otoczenia [K],
 W_{em} – zbiór wielkości, których wartości stanowią wyniki projektowe określonego wymiennika ciepła,
 W_e – zbiór wielkości pomiarowych wynikający ze zbioru $[W_{em}]$,
 $W_{ep,i}$ – określony w projektowaniu wymiennika ciepła zbiór wielkości, których wartości charakteryzują warunki eksploatacyjne i -tych elementów tego wymiennika,
 $W_{ru,i}$ – zbiór wielkości, których wartości charakteryzują rodzaje uszkodzeń i -tych elementów określonego wymiennika ciepła, branych pod rozwagę w jego projektowaniu,
 $W_{ru,e,i}$ – zbiór wielkości, których wartości charakteryzują rodzaje uszkodzeń badanych i -tych elementów określonego wymiennika ciepła, które to badania są podejmowane w celu oszacowania rozkładów prawdopodobieństwa trwałości tych elementów,
 $W_{wp,i}$ – określony w projektowaniu zbiór wielkości, których wartości charakteryzują wewnętrzne warunki eksploatacyjne i -tych elementów określonego wymiennika ciepła,
 $W_{zp,i}$ – określony w projektowaniu zbiór wielkości, których wartości charakteryzują zewnętrzne warunki eksploatacyjne i -tych elementów określonego wymiennika ciepła,
 w_j – prędkość przepływu określonego j -tego płynu wymieniającego ciepło [m/s],
 w_{2k} – prędkość przepływu wody chłodzącej przez króćce wejściowe do skraplacza [m/s],
 β_l – współczynnik rozszerzalności liniowej rur skraplacza [1/K],

- $\Delta p_{inst2ominst}$ – opór miejscowy przepływu wody chłodzącej przez określony i -ty element instalacji [Pa],
- Δp_{str2} – opory przepływu wody chłodzącej przez skraplacz i instalację wody chłodzącej [Pa],
- $\Delta p_{inst2inst}$ – opory przepływu wody chłodzącej przez instalację tej wody odnoszącej się do skraplacza [Pa],
- $\Delta p_{m,i}$ – opór miejscowy przepływu płynu przez i -ty element traktowany jako opór miejscowy wymiennika ciepła i instalacji z nim związanej, indeksy $i = 1, 2, \dots, n$ stanowią numery oporów [Pa],
- Δp_{str2wc} – opory przepływu wody chłodzącej przez skraplacz z osadami [Pa],
- $\Delta p_{t,i}$ – opór tarcia przepływu płynu przez i -ty element wymiennika ciepła i instalacji z nim związanej, indeksy $i = 1, 2, \dots, n$ stanowią numery oporów [Pa],
- Δp_{l2inst} – opory tarcia przepływu wody chłodzącej przez instalację tej wody odnoszącej się do skraplacza [Pa],
- Δp_{l2wc} – opory tarcia przepływu wody chłodzącej przez skraplacz z osadami [Pa],
- Δp_{2k} – opór miejscowy przepływu wody chłodzącej przez króciec wejściowy skraplacza [Pa],
- Δp_{2om} – opór miejscowy przepływu wody chłodzącej przez określony element skraplacza [Pa],
- ΔT_{sr} – średnia różnica temperatur między płynami wymieniającymi ciepło [K],
- δ_s – grubość ścianki elementu (rury, płyty) powierzchni wymiany ciepła określonego wymiennika ciepła [m],
- ε_l – współczynnik rozbiegu hydraulicznego uwzględniany przy przejmowaniu ciepła przy przepływie turbulentnym wody chłodzącej wewnątrz rur skraplacza,
- η_{p2} – sprawność pompy wody chłodzącej skraplacz,
- λ_s – współczynnik przewodzenia ciepła ścianki elementu powierzchni wymiany ciepła [W/mK],
- $\lambda_{str2inst}$ – współczynnik oporów tarcia, przy przepływie wody chłodzącej, wewnętrznych powierzchni instalacji skraplacza,
- λ_{str2os} – współczynnik oporów tarcia, przy przepływie wody chłodzącej, wewnętrznych powierzchni rur skraplacza z osadami,
- λ_2 – współczynnik przewodzenia ciepła wody chłodzącej skraplacz [W/mK],
- μ_2 – dynamiczny współczynnik lepkości wody chłodzącej skraplacz, wartość dla średniej temperatury wody chłodzącej przy ścianie wewnątrz rur skraplacza [kg/ms],
- ν_2 – kinematyczny współczynnik lepkości wody chłodzącej skraplacz, wartość dla średniej temperatury w osi (rdzeniu) przepływającej wody [m²/s],
- $\xi_{i,elinst}$ – współczynnik oporu miejscowego i -tego elementu instalacji wody chłodzącej skraplacz,
- ξ_k – współczynnik oporu miejscowego króćca wejściowego, przez który wpływa woda chłodząca do skraplacza,
- ξ' – współczynnik oporu miejscowego na wejściu wody chłodzącej do rur skraplacza,
- ξ'' – współczynnik oporu miejscowego przy wyjściu wody chłodzącej z rur skraplacza,
- ρ_{2sr} – średnia wartość gęstości wody chłodzącej skraplacz [kg/m³],
- Σb_j – zawartości określonych mikroorganizmów w i -tym płynie wymieniającym ciepło w wymienniku ciepła,
- ΣF_j – fizyczno-chemiczne właściwości określonego j -tego płynu przepływającego przez określony wymiennik ciepła,
- $\Sigma \Delta p_{j,max}(\tau)$ – suma przekroczeń dopuszczalnych zmian wartości ciśnień j -tych płynów w określonym czasie τ w określonych wymiennikach ciepła,
- $\sigma_{i,max}$ – maksymalna wartość naprężenia i -tego elementu określonego wymiennika ciepła [N/m²],
- τ_c – czas do czyszczenia skraplacza [h],
- τ_z – zadany czas funkcjonowania skraplacza w siłowni okrętowej [h].

LITERATURA

1. Czajgucki J.Z., *Filozoficzno-etyczne uwarunkowania działań na rzecz niezawodności techniki*, materiały konferencji „Inżynieria jakości w przedsiębiorstwach produkcyjnych, usługowych i sektorze publicznym”, praca zbiorowa pod red. P. Grudowskiego, M. Dobrzyńskiego, J. Preihsa i P. Waszczura, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2009, s. 52–57.
2. Czajgucki J.Z., *Filozoficzno-naukowo-dysertacyjne problemy modelowania i symulacji relacji niezawodnościowych w wieloaspektowych systemach*, Symulacja w Badaniach i Rozwoju, Polskie Towarzystwo Symulacji Komputerowej, Kwartalnik, 2010, Vol. 1, No. 1, Warszawa 2010, s. 7–16.
3. Czajgucki J.Z., *Metoda realizacji postulatu wymaganej niezawodności spalinowych silowni okrętowych w procesie ich projektowania*, Wydawnictwo Uczelniane Wyższej Szkoły Morskiej w Gdyni, Gdynia 1991.
4. Czajgucki J.Z., *Modelowanie relacji między wymaganą niezawodnością obiektów technicznych a niezawodnościami elementów w procesie projektowania*, materiały XXVI Zimowej Szkoły Niezawodności „Problemy niezawodności obiektów technicznych”, Sekcja Podstaw Eksploatacji KBM PAN, Szczyrk 1998, s. 46–51.
5. Czajgucki J.Z., *O procesie rozwiązywania problemu projektowania niezawodności energetycznych nadsystemów technicznych*, Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, 1992, z. 2(90), s. 289–304.
6. Czajgucki J.Z., *Principles of Modelling of Processes and Exemplary of Interpretation of These Principles with Reference to Technology, Systems Science*, 2009, Vol. 35, No. 1, p. 15–21.
7. Czajgucki J.Z., Łukaszewski K., *O systemowym projektowaniu wymienników ciepła ze względu na ich wyróżnione cechy*, materiały konferencji „Projektowanie i zarządzanie realizacją produkcji”, Uniwersytet Zielonogórski, Zielona Góra 2005, s. 169–172.
8. Dietrych J., *System i konstrukcja*, WNT, Warszawa 1985.
9. Gasparski W., *Projektoznawstwo*, WNT, Warszawa 1988.
10. Jankowski Z., Kurpisz Ł., *Obliczenia hydrauliczne wymienników ciepła*, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1981.
11. Jeżowiecka-Kabsch K., Szewczyk H., *Mechanika płynów*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2001.
12. Łukaszewski K., *Eksploatacyjne badania niezawodności wymienników ciepła wspomagane komputerowo*, materiały XII Szkoły Komputerowego Wspomagania Projektowania, Wytwarzania i Eksploatacji, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa – Jurata 2008, s. 225–230.
13. Łukaszewski K., *Metoda projektowania wymienników ciepła technicznych systemów energetycznych ze względu na wymaganą niezawodność tych systemów*, rozprawa doktorska pod kier. J.Z. Czajguckiego, Gdynia 2011.
14. Pudlik W., *Wymiana i wymienniki ciepła*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2008.
15. Rohatyński R., *Systemowe ujęcie procesu projektowo-konstrukcyjnego podstawą komputerowego wspomagania projektowania*, [w:] *Problemy metodologii i komputerowego wspomagania projektowania technicznego*, pod red. R. Rohatyńskiego i D. Miller, t. 2, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1994.
16. *Schell and tube exchangers technical manual*, Yuba Heat Transfer, 2001.
17. Staniszewski B., *Wymiana ciepła*, PWN, Warszawa 1980.
18. Szargut J., Ziębik A., *Podstawy energetyki cieplnej*, PWN, Warszawa 1998.
19. Wiśniewski S., Wiśniewski T.S., *Wymiana ciepła*, WNT, Warszawa 2000.

THE METHOD OF DESIGNING OF HEAT EXCHANGERS OF TECHNICAL POWER SYSTEMS IN VIEW OF THE REQUIRED RELIABILITY OF THESE SYSTEMS – PART 1

Summary

In this paper a system of actions in designing of heat exchangers has been contained. This paper presents some information connections between designing actions. Information feedbacks have been demonstrated. Process of designing of heat exchangers has been developed. The actions of multi-verifying of heat exchangers designing will be presented in next paper. Relations between features of heat exchangers have been demonstrated. Actions described in designing of heat exchanger allow the creation of relation between defined scalar quantities, selection or generation of models of these relations. The system of models of the relations between the scalar quantities has been created.

Keywords: *method, design, verification, heat exchangers, reliability.*