

METODA PROJEKTOWANIA WYMIENNIKÓW CIEPŁA TECHNICZNYCH SYSTEMÓW ENERGETYCZNYCH ZE WZGLĘDU NA WYMAGANĄ NIEZAWODNOŚĆ TYCH SYSTEMÓW – CZĘŚĆ 2

Artykuł stanowi drugą część skrótu rozprawy doktorskiej [10]. Zawiera on opis wielostopniowej eksperymentalnej weryfikacji projektowania wymienników ciepła. Do tej weryfikacji należą: wieloetapowa eksperymentalna bieżąca weryfikacja projektów wymienników ciepła i postprojektowa weryfikacja użytych modeli relacji między wielkościami w projektowaniu wymienników ciepła. Tę pierwszą, bieżącą weryfikację przeprowadza się na rzeczywistych wymiennikach ciepła, funkcjonujących w określonym technicznym systemie energetycznym i na modelach tych wymienników. Natomiast postprojektową weryfikację przeprowadza się w okresie długotrwałej eksploatacji wymienników ciepła funkcjonujących w określonym systemie energetycznym. Przedstawiono również wybrane szczegółowe algorytmy odwzorowujące wskazane działania weryfikujące w odniesieniu do płaszczowo-rurowego skraplacza okrętowej turbiny parowej. W zakończeniu podano wnioski wynikające z obu części artykułu.

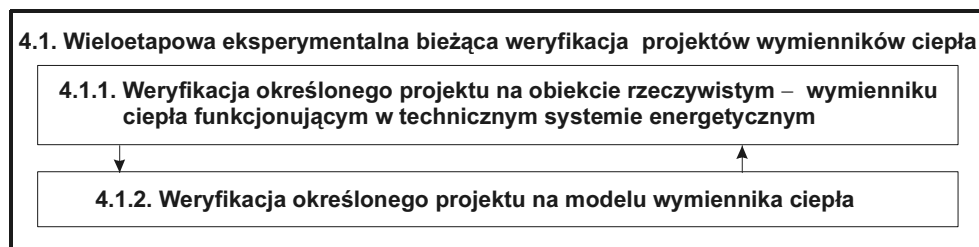
Słowa kluczowe: metoda, projektowanie, weryfikacja, wymienniki ciepła, niezawodność.

WSTĘP

W artykule przedstawiono wykreowane działania weryfikacji procesu projektowania wymienników ciepła. Wskazano wybrane i zhierarchizowane wielkości weryfikujące. Wyboru wielkości weryfikujących dokonano z uwzględnieniem minimalnej liczby pomiarów odnośnie do określonych działań weryfikujących, miejsca tej weryfikacji, a dalej kosztów z tym związanych. Na podstawie zgodności lub rozbieżności wartości weryfikowanych (projektowanych) i je weryfikujących (badanych) wnioskuje się o poprawności procesu projektowania, a następnie podejmuje się kolejne uporządkowane działania weryfikujące. Działania weryfikujące podzielono i zakwalifikowano do tzw. wieloetapowej bieżącej weryfikacji projektów wymienników ciepła oraz tzw. postprojektowej weryfikacji użytych modeli relacji między wielkościami w projektowaniu wymienników ciepła. Następnie opisano organizację badań wymienników ciepła i wskazano sprzężenia zwrotne między wynikami tych badań a działaniami projektowymi, które podejmowane są w następnych projektach wymienników ciepła.

1. DZIAŁANIA WERYFIKUJĄCE PROJEKTOWANIE WYMIENNIKÓW CIEPŁA

Zasadnicze działania wielostopniowej eksperymentalnej weryfikacji projektowania wymienników ciepła przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat wielostopniowej eksperymentalnej weryfikacji projektowania wymienników ciepła – oznaczenia numerów działań weryfikujących proces projektowania oraz algorytmów dalej przedstawionych nawiązują do pierwszej części artykułu

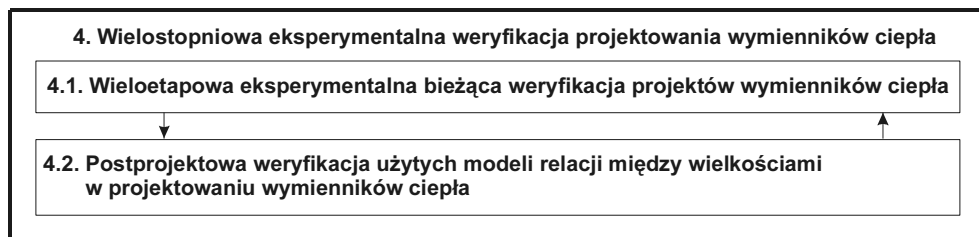
Fig. 1. *General scheme of multi-verification of designing heat exchangers – marking the numbers of activities verifying the designing process and algorithms presented further on refers to the first part of the article*

Wieloetapowa eksperymentalna bieżąca weryfikacja projektów wymienników ciepła stanowi działania weryfikujące podstawowe funkcje wymienników ciepła w technicznym systemie energetycznym. Są to działania eksperymentalnej weryfikacji na obiekcie rzeczywistym i modelowej, jeżeli podstawowe funkcje wymienników ciepła są nieprawidłowe.

Postprojektowa weryfikacja użytych modeli relacji między wielkościami w projektowaniu wymienników ciepła obejmuje wyróżnione działania weryfikujące określone modele w czasie długotrwałej eksploatacji wymienników ciepła. Weryfikacja ta ma na celu pozyskanie informacji o tych modelach do dalszych projektów wymienników ciepła i ewentualnie ich doskonalenie w badaniach empirycznych – poznawczych, w przypadku wykrycia rozbieżności między wynikami projektowymi a pozyskanymi w weryfikacji. Takie podejście zapewnia ciągłość sprzężenia zwrotnego między eksploatacją wymienników ciepła a ich projektowaniem.

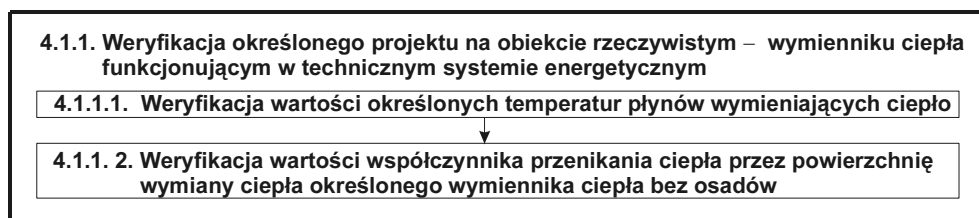
Działania wieloetapowej eksperymentalnej bieżącej weryfikacji projektów wymienników ciepła przedstawiono na rysunku 2.

Weryfikację określonego projektu na obiekcie rzeczywistym – wymienniku ciepła funkcjonującym w technicznym systemie energetycznym zdekomponowano na następujące działania, które przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 2. Schemat wieloetapowej eksperymentalnej bieżącej weryfikacji projektów wymienników ciepła

Fig. 2. General scheme of experimental current multi-verification of the designs of heat exchangers



Rys. 3. Schemat weryfikacji określonego projektu na obiekcie rzeczywistym – wymienniku ciepła funkcjonującym w technicznym systemie energetycznym

Fig. 3. General scheme of verification of the definite design on the real object – the heat exchanger during its exploitation in the technical energy system

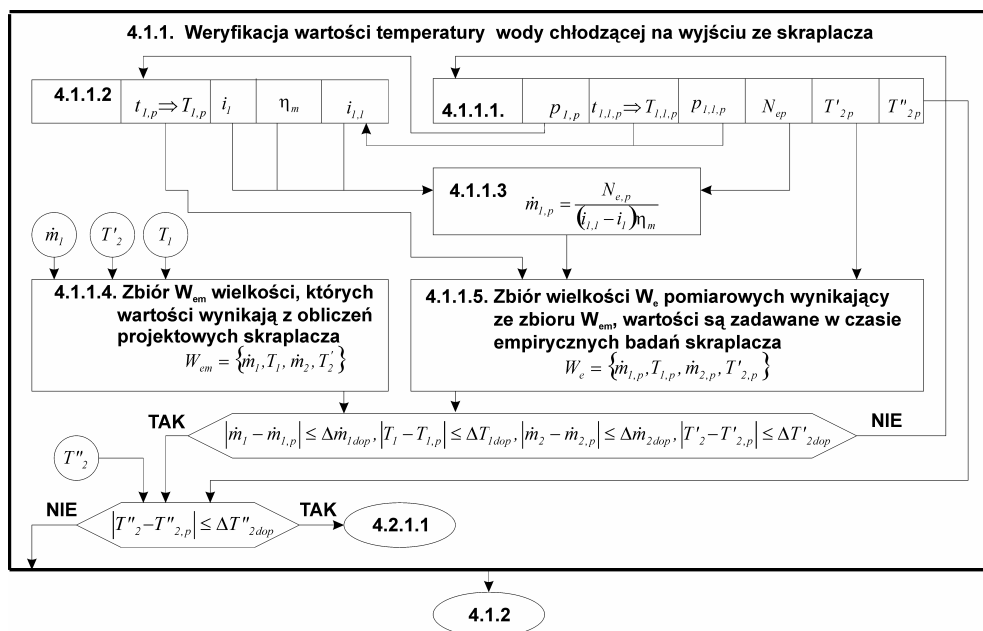
W doborze metod pomiarowych określonych wielkości w weryfikacji wyników projektowania wymienników ciepła należy uwzględnić istotne czynniki warunkujące dokładność pomiaru tych wielkości, która wyrażona jest tu jako wartość błędów pomiarowych $\pm\Delta x$ dla określonej wielkości x pomiarowej. Dokładność pomiarów $\pm\Delta x$ musi być adekwatna do przebiegu badanych procesów. Na podstawie prac m.in. [5, 7, 12, 14] wskazano następujące czynniki, mające wpływ na wiarygodność pomiarów: jakość czujników i ich lokalizacje na rzeczywistych i modelowych obiektach, jakość toru pomiarowego i systemu przetworników oraz jakość systemu archiwizacji wyników pomiarów.

Informacje odnośnie do metod i dokładności pomiaru temperatur, ciśnień (sposobu wyznaczania spadków ciśnień), właściwości płynów i masowych natężeń przepływu płynów wymieniających ciepło w wymiennikach ciepła zawiera norma [13].

Celem działania weryfikacji wartości określonych temperatur płynów wymieniających ciepło jest pośrednie wnioskowanie o strumieniu wymienianego ciepła \dot{Q} między płynami w wymienniku. Sprawdzeniu podlega wartość temperatury T_2'' płynu chłodzącego (podgrzewanego) na wyjściu z wymiennika ciepła, która jest wyznaczona w projektowaniu określonego wymiennika ciepła, z wartością $T_{2,p}''$ zmierzoną na wymienniku ciepła funkcjonującym w technicznym systemie energetycznym, po sprowadzeniu eksploatacji tego wymiennika do warunków

projektowych $W_{em} = \{\dot{m}_1, \dot{m}_2, T_1', T_1'', T_2'\}$. W wypadku, gdy sprawdzana różnica wartości przekracza wartość dopuszczalną w określonych warunkach, tzn. $|T_2'' - T_{2,p}''| > \Delta T_{2dop}'$, wówczas przechodzi się do kolejnych następujących po sobie działań weryfikujących, mających na celu identyfikację przyczyn wystąpienia tej różnicy wartości. Przykład – rysunek 4.

Następnie weryfikacji podlega wartość współczynnika przenikania ciepła k_1 przez powierzchnię A_2 wymiany ciepła bez osadów. Sposób postępowania w celu sprawdzenia wartości wielkości k_1 jest analogiczny jak w poprzednim działaniu. Przykład tej weryfikacji przedstawiono na rysunku 5.



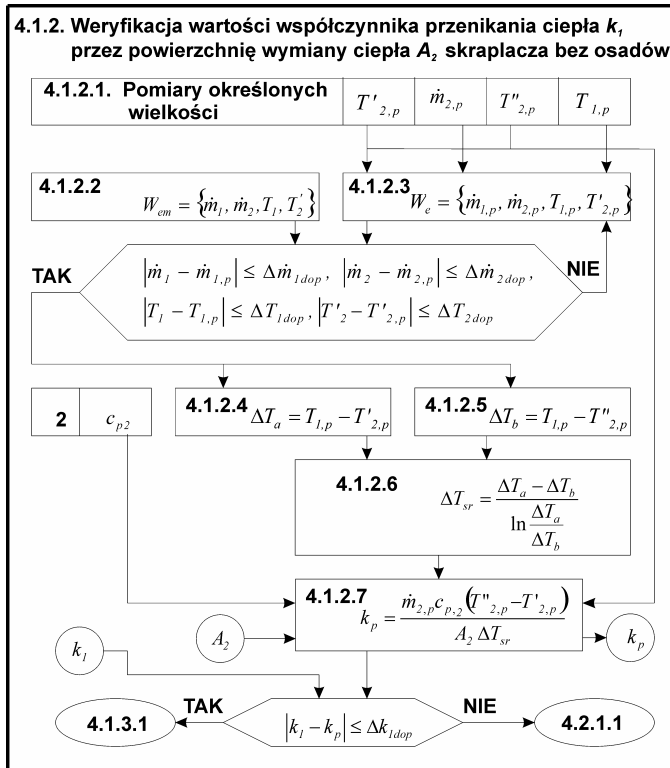
Rys. 4. Algorytm weryfikacji temperatury wody chłodzącej na wyjściu ze skraplacza
Fig. 4. Algorithm for verifying the cooling water temperature at the output of the condenser

W wypadku znaczących różnic między wartością k_1 wyznaczoną w projektowaniu a $k_{1,p}$, wynikającą z pomiarów stosownych wielkości na wymienniku ciepła funkcjonującym w technicznym systemie energetycznym, w określonych warunkach, tzn. $|k_1 - k_{1,p}| \leq \Delta k_{1dop}$, przechodzi się do dalszych działań weryfikujących przeprowadzanych na modelu wymiennika ciepła.

Kolejne działanie, weryfikacji określonego projektu na modelu wymiennika ciepła, zdekomponowano na następujące działania wyrażone na rysunku 6.

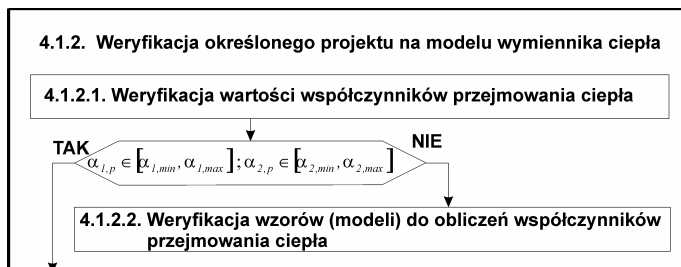
Weryfikację wartości współczynników przejmowania ciepła α_1 i α_2 po obu stronach powierzchni wymiany ciepła przeprowadza się na modelu określonego

wymiennika ciepła, który zawiera cechy podobieństwa konstrukcji tego wymiennika CK_i , cechy CI_i identyfikujące jego i -te elementy, ich cechy jakości CJ_i i technologii CT_i wytwarzania, a także kryteria podobieństwa warunków eksploatacyjnych W_e określonego wymiennika ciepła.



Rys. 5. Algorytm weryfikacji wartości współczynnika przenikania ciepła przez powierzchnię wymiany ciepła skraplacza bez osadów

Fig. 5. Algorithm for verifying the value of the overall heat transmission coefficient through heat transfer area without fouling



Rys. 6. Schemat działania weryfikacji określonego projektu na modelu wymiennika ciepła

Fig. 6. General scheme of verification of the definite design carried out on the model of the heat exchanger

Podczas przeprowadzanych badań empirycznych ustaleniu podlega zgodność wartości wielkości pomierzonych, zawartych w zbiorze W_e , określających warunki funkcjonowania modelu wymiennika ciepła z wartościami projektowymi zawartymi w zbiorze W_{em} (np. rys. 7).

Przykłady algorytmów odnośnie do weryfikacji wartości współczynników przejmowania ciepła po obu stronach powierzchni wymiany ciepła przedstawiono na rysunkach 7 i 8.

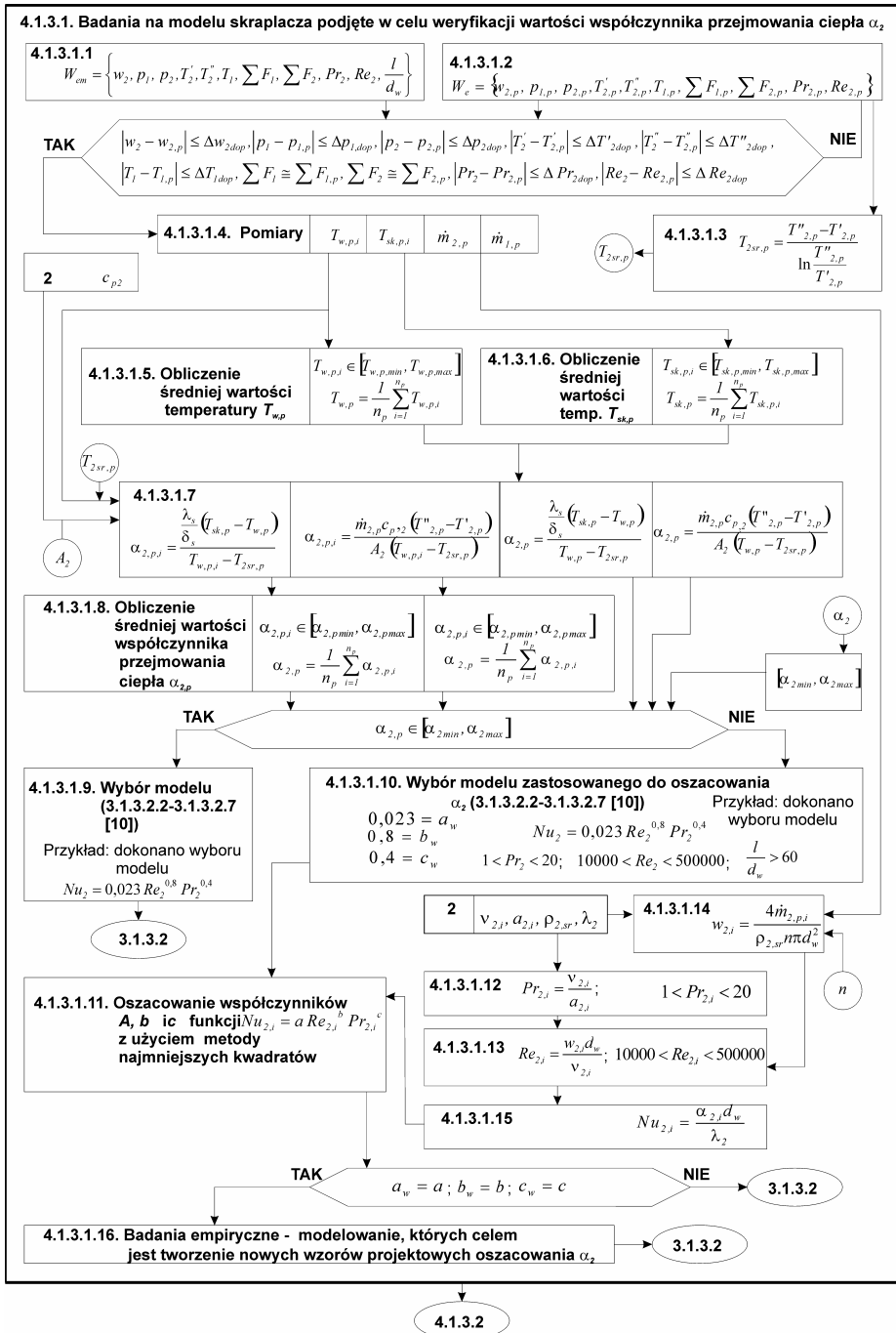
W przypadku, gdy płyn przepływający przez wymiennik ciepła nie zmienia stanu skupienia, wówczas do oszacowania współczynnika przejmowania ciepła stosuje się równanie Newtona oraz skojarzenie równań Newtona i Fouriera – rysunek 7, algorytm 4.1.3.1.7.

Takie postępowanie umożliwia pozyskanie czterech różnych wyników wartości średniego współczynnika przejmowania ciepła dla przyjętych warunków, co w istocie ukazuje rozbieżność wartości wyników i ich zakres.

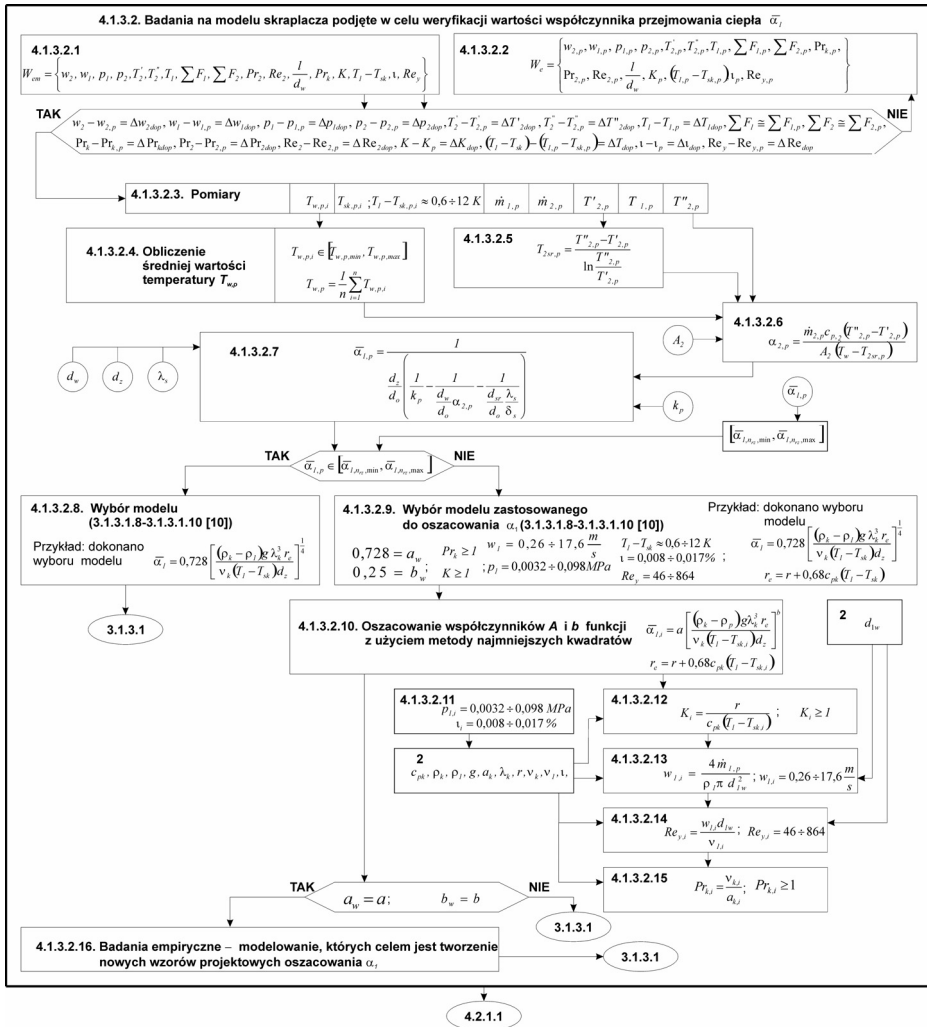
Jako wartość weryfikującą współczynnik przejmowania ciepła wybiera się najmniejszą z otrzymanego przedziału wyników, ponieważ zapewnia to, że w realnych wymiennikach ciepła zostanie wymieniona określona ilość ciepła. Można również wybrać inną wartość tej wielkości, np. średnią, ze świadomością ryzyka.

W wypadku, gdy następuje zmiana stanu skupienia płynu chłodzonego, wówczas występuje trudność opisu tego zjawiska z użyciem modeli wcześniejszych. Z tego punktu widzenia uzasadnione jest użycie do oszacowania współczynnika przejmowania ciepła realnej (pozyskanej w drodze wcześniej określonych pomiarów) wartości współczynnika przenikania ciepła k_p . Takie postępowanie zwiększa dokładność, a zarazem pewność, przeprowadzanej weryfikacji w omawianym zakresie. Przykład postępowania przedstawiono na rysunku 8, przykładowy wzór zawiera algorytm 4.1.3.2.7.

Jeżeli wartości $\alpha_{1,p}$ oraz $\alpha_{2,p}$ nie zawierają się w odpowiednich określonych przedziałach wartości obliczonych w projektowaniu, to dokonuje się weryfikacji modeli określających liczby Nusselta w zależności od liczb kryterialnych. Określa się postacie funkcji z wybranych adekwatnych modeli, po czym z użyciem stosownych metod regresji oszacowuje się nowe wartości określonych parametrów (współczynników) wybranych modeli. Należy tu podkreślić, że pomiarów określonych wielkości, wynikających z branych pod rozwagę modeli, dokonuje się w określonych warunkach.



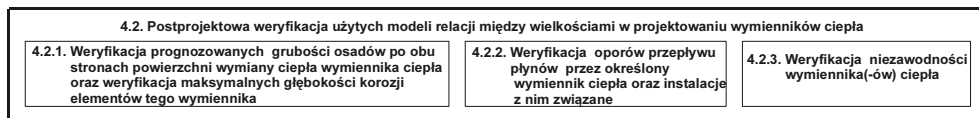
Rys. 7. Algorytm badań na modelu skraplacza podjętych w celu weryfikacji wartości współczynnika przejmowania ciepła α_2
Fig. 7. Algorithm for investigations carried out on the condenser model in order to verify the value of the heat transfer coefficient α_2



Rys. 8. Algorytm badań na modelu skraplacza podjętych w celu weryfikacji wartości współczynnika przejmowania ciepła $\bar{\alpha}_1$

Fig. 8. Algorithm for investigations carried out on the condenser model in order to verify the value of the heat transfer coefficient $\bar{\alpha}_1$

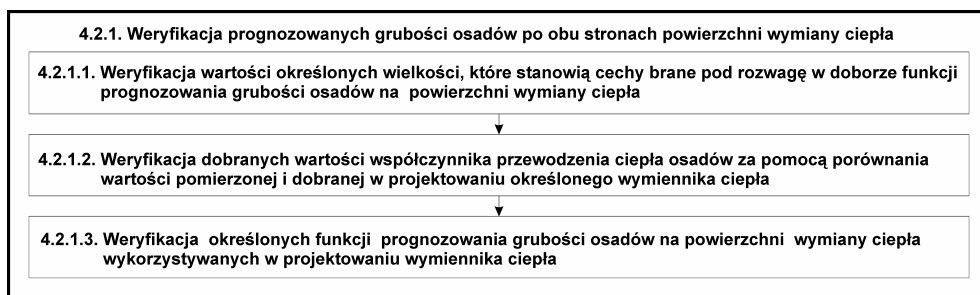
Działania postprojektowej weryfikacji modeli relacji między wielkościami, użytych w projektowaniu określonego wymiennika ciepła, dotyczą sprawdzenia wartości określonych wielkości projektowych, które następuje w wyniku długotrwałej kontroli funkcjonowania wymiennika ciepła podczas jego eksploatacji w technicznym systemie energetycznym. Należy w tym miejscu podkreślić, o konieczności tworzenia baz danych pomiarów cieplno-przepływowych podczas funkcjonowania wymienników ciepła w technicznym systemie energetycznym. Główne działania podejmowanej weryfikacji wyróżniono na rysunku 9.



Rys. 9. Schemat działań postprojektowej weryfikacji użytych modeli relacji między wielkościami w projektowaniu wymienników ciepła

Fig. 9. General scheme of post-designing verification of the used mathematical models of the relations between the definite scalar quantities in designing heat exchangers

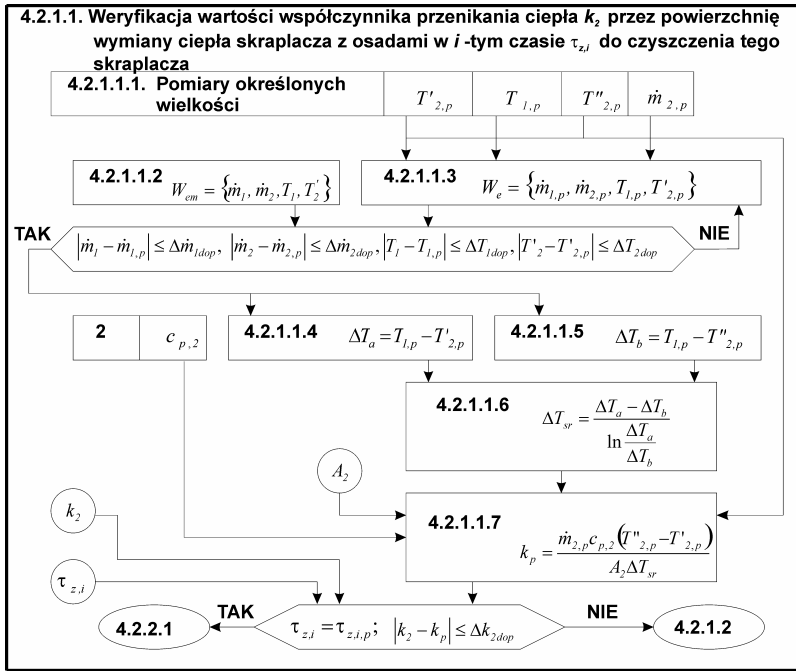
Weryfikację prognozowanych grubości osadów po obu stronach powierzchni wymiany ciepła zdekomponowano na następujące działania przedstawione na rysunku 10.



Rys. 10. Schemat działań weryfikacji prognozowanych grubości osadów po obu stronach powierzchni wymiany ciepła

Fig. 10. General scheme of verification of the forecasted thickness of fouling on the heat transfer area

W celu pośredniej weryfikacji prognozowanej grubości osadów po obu stronach powierzchni wymiany ciepła dokonuje się pomiarów określonych wielkości podczas eksploatacji określonego wymiennika ciepła (po ustaleniu zgodności wartości w zbiorach W_{em} i W_e , np. rys. 11), które umożliwiają obliczenie wartości współczynnika przenikania ciepła k_p , w czasie τ_c do planowanych czyszczeń określonego wymiennika ciepła. Następnie porównuje się otrzymaną wartość z pomiarów k_p z wartością tej wielkości k_2 wyznaczoną w projektowaniu określonego wymiennika ciepła z uwzględnieniem prognozowanej grubości osadów. Przykład postępowania ukazano na rysunku 11.



Rys. 11. Algorytm weryfikacji wartości współczynnika przenikania ciepła przez powierzchnię wymiany ciepła skraplacza z osadami w i -tym czasie do czyszczenia tego skraplacza

Fig. 11. Algorithm for verification of the value of the overall heat transmission coefficient through heat transfer area of the condenser with fouling in the i -number of time to cleaning this condenser

W wypadku, gdy nie jest spełniony warunek $|k_2 - k_p| \leq \Delta k_{2,dop}$, wówczas w pierwszej kolejności sprawdza się cechy $C_{proj,j,i} \in C_{b,j,i}$ (po ustaleniu zgodności wartości w zbiorach W_e i W_{em}), dla których dokonywano doboru funkcji $\sum_{i=1}^n \delta_{os,j,i} = \sum_{i=1}^n f(\tau_i)_{\{C_{b,j,i}\}}$ na etapie projektowania wymiennika oraz i -te przedziały czasu występowania tych cech $0 \leq \tau_i \leq \tau_{i,max}$, podczas funkcjonowania określonego wymiennika ciepła w technicznym systemie energetycznym. Przykład – rysunek 12.

W wypadku, gdy następuje zgodność cech $C_{proj,j,i} \in C_{b,j,i}$, wówczas wykonuje się pomiary i -tej wartości współczynnika przewodzenia ciepła osadów na wybranych zdemontowanych elementach powierzchni wymiany ciepła (rurach, płytach). Jeśli różnica wartości wynikającej z projektowania i pomierzonej tego współczynnika przekracza wartości dopuszczalne, tzn. $|\lambda_{os,i} - \lambda_{os,i,p}| \geq \Delta \lambda_{os,i,dop}$, to oszacowuje się nowe wartości określonych współczynników funkcji (liniowych) $\delta_{os,j,i} = f(\tau_i)_{\{C_{b2,i}\}}$, użytych do prognozowania średnich grubości osadów na powierzchni wymiany ciepła.

Należy wytworzyć model określonego wymiennika ciepła, który będzie zawierać następujące cechy podobieństwa elementów powierzchni wymiany ciepła (rur, płyt): cechy CI_i identyfikujące i -te elementy ich cechy jakości CJ_i i technologii CT_i wytwarzania. Następnie określa się zbiór wielkości i ich wartości, które stanowią kryteria podobieństwa warunków eksploatacyjnych określonego wymiennika ciepła.

Podczas badań ustaleniu podlega zgodność wartości wielkości pomierzonych, określających warunki przepływu określonego płynu

$$W_e = \left\{ T'_{j,p}, T''_{j,p}, \dot{m}_{j,p}, w_{j,p}, \sum b_{j,p}, \sum F_{j,p} \right\}$$

przez elementy wymiany ciepła (przez rury, pomiędzy płytami) z wartościami tych wielkości, wynikającymi z projektowania określonego wymiennika ciepła

$$W_{em} = \left\{ T'_j, T''_j, \dot{m}_j, w_j, \sum b_j, \sum F_j \right\}.$$

Wartości odpowiednich wyróżnianych wielkości w zbiorach W_e i W_{em} powinny być sobie równe albo zawierać się w przedziale wartości dopuszczalnych odnośnie do rozpatrywanych zjawisk osadzania się zanieczyszczeń na powierzchni wymiany ciepła, co wyrażono następująco:

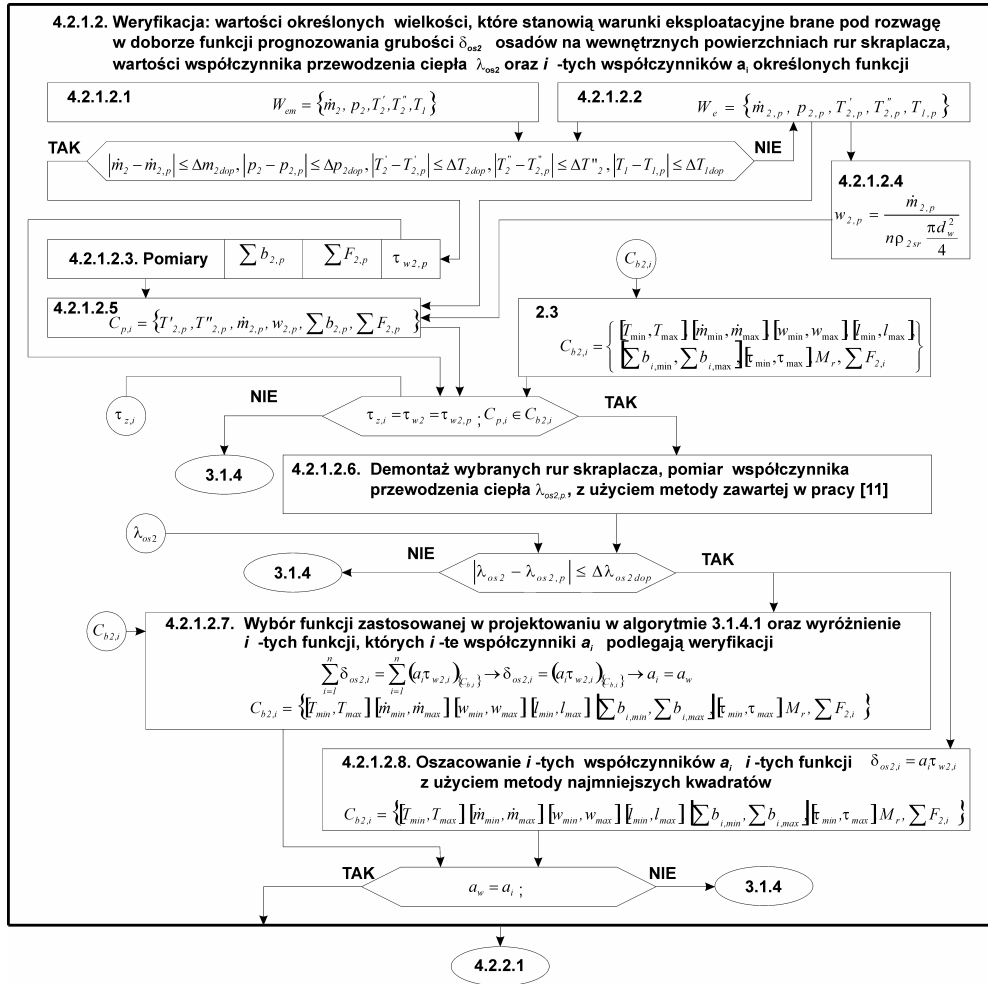
$$\left| T'_j - T'_{j,p} \right| \leq \Delta T'_{j,dop}, \quad \left| T''_j - T''_{j,p} \right| \leq \Delta T''_{j,dop}, \quad \left| \dot{m}_j - \dot{m}_{j,p} \right| \leq \Delta m_{j,dop},$$

$$\left| w_j - w_{j,p} \right| \leq \Delta w_{j,dop}, \quad \sum b_j \cong \sum b_{j,p}, \quad \sum F_j \cong \sum F_{j,p}.$$

Pomiarów średnich m -tych grubości osadów $\delta_{osi,m} = \frac{\sum_{k=1}^n \delta_{osi,k}}{n}$ dokonuje się w określonym m -tym czasie $\tau_{m,p}$. Założeniu podlegają funkcje liniowe $\delta_{os,j,i} = a_i \tau_{j,i}$, gdzie następujące indeksy oznaczają odpowiednio: j – osady na powierzchni wymiany ciepła od strony określonego płynu wymieniającego ciepło, i – odnosi się do i -tego zbioru cech $C_{b,j,i}$, względem którego dobierana była odpowiednia i -ta funkcja. Natomiast i -ty czas $\tau_{j,i}$ wyraża się poprzez następujące po sobie przedziały tego czasu odpowiednio: $\tau_{j,1} \in [0, \tau_1]$, $\tau_{j,2} \in [\tau_1, \tau_2]$, ..., $\tau_{j,n} \in [\tau_i, \tau_n]$, które wynikają z i -tego czasu występowania określonych cech $C_{b,j,i}$. Nieznane i -te współczynniki wybranego modelu funkcji wyrażane są jako a_i . W celu oszacowania wartości tych współczynników stosuje się metodę najmniejszych kwadratów dla regresji liniowej: $S = \sum_{i=1}^n [Y_i - f(a_i X_{j,i})]^2 = \min$, gdzie: $Y_i = \delta_{os,j,i,m}$, $X_{j,i} = \tau_{j,i,m}$, wprowadzono indeks m – liczbę pomiaru z n wykonanych w odpowiednim przedziale czasu, np. $\tau_{j,1} \in [0, \tau_1]$.

Z praktycznego punktu widzenia podczas weryfikacji prognozowanych grubości osadów po obu stronach powierzchni wymiany ciepła podejmuje się

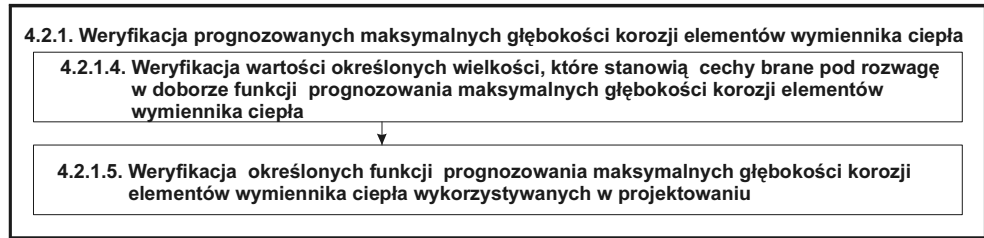
równocześnie weryfikację prognozowanych maksymalnych głębokości korozji elementów wymiennika ciepła. Postępowanie jest analogiczne jak powyżej opisane.



Rys. 12. Algorytm weryfikacji wartości określonych wielkości, które stanowią warunki eksploatacyjne brane pod rozwagę w doborze funkcji prognozowania grubości osadów na wewnętrznych powierzchniach rur skraplacza, wartości współczynnika przewodzenia ciepła oraz i -tych współczynników określonych funkcji

Fig.12. Algorithm for verification of the values of the definite scalar quantities, which constitute the exploitation conditions taken into consideration while selecting the function of forecasting the fouling thickness on the inside walls of the condenser pipes, the value of the heat conduction coefficient and i -number of these coefficients of the definite functions

Na rysunku 13 przedstawiono działania weryfikacji prognozowanych maksymalnych głębokości korozji elementów wymiennika ciepła.



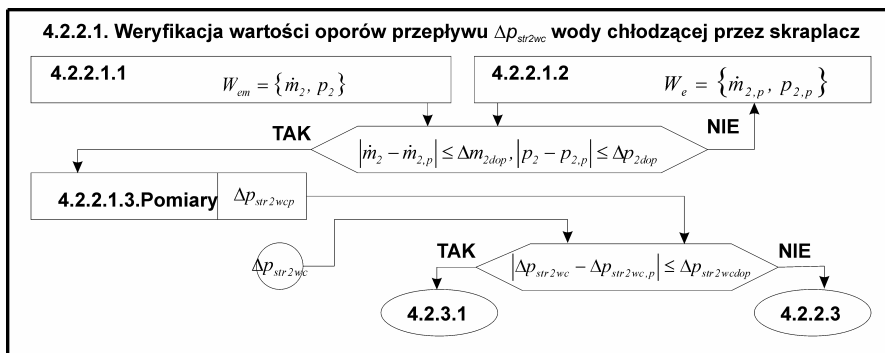
Rys. 13. Schemat działań weryfikacji prognozowanych maksymalnych głębokości korozji elementów wymiennika ciepła

Fig. 13. General scheme of verification of the forecasted maximum depths of corrosion of the elements of the heat exchanger

Weryfikacji oporów przepływu płynów przez określony wymiennik ciepła oraz instalacje z nim związane dokonuje się podczas funkcjonowania tego wymiennika w technicznym systemie energetycznym w czasie τ_c do planowanych jego czyszczeń i ustalenia zgodności wartości wielkości pomierzonych, zawartych w zbiorze W_e z wartościami projektowymi zawartymi w zbiorze W_{em} (np. rys. 14). Następnie sprawdza się, czy różnica wartości, oporów przepływu j -tego płynu przez określony wymiennik ciepła oraz instalację z nim związaną, pomiędzy wartością wynikającą z projektowania $\Delta p_{str,j,wc}$ tego wymiennika a pomierzoną $\Delta p_{str,j,wc,p}$ nie przekracza wartości dopuszczalnych $\Delta p_{str,j,wc,dop}$, co wyraża zależność $|\Delta p_{str,j,wc} - \Delta p_{str,j,wc,p}| \leq \Delta p_{str,j,wc,dop}$.

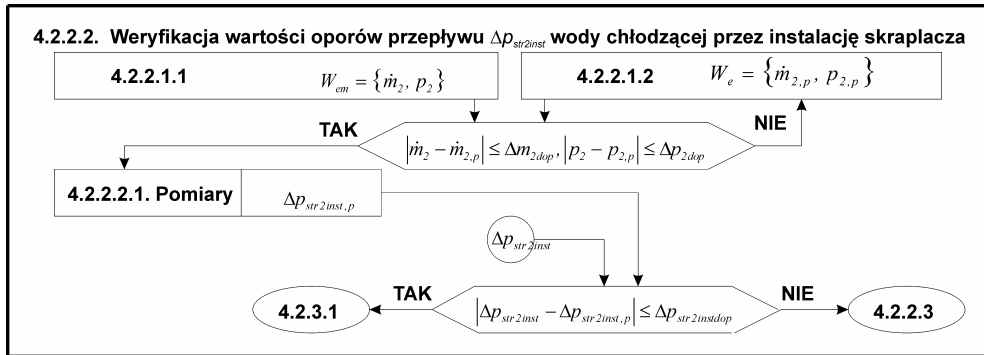
Przykłady postępowania zilustrowano na rysunkach 14 i 15.

W wypadku występujących znaczących różnic określonych wartości sprawdzeniu podlegają dobierane w projektowaniu określonego wymiennika ciepła oraz instalacji z nim związanych wartości: współczynników oporów tarcia i współczynników oporów miejscowych, użytych w modelach do oszacowania oporów przepływu płynów.



Rys. 14. Algorytm weryfikacji wartości oporów przepływu wody chłodzącej przez skraplacz

Fig. 14. Algorithm for verifying the value of the pressure drop of the flow of the cooling water through the condenser



Rys. 15. Algorytm weryfikacji oporów przepływu wody chłodzącej przez instalację skraplacza

Fig. 15. Algorithm for verifying the value of the pressure drop of the flow of the water cooling the condenser

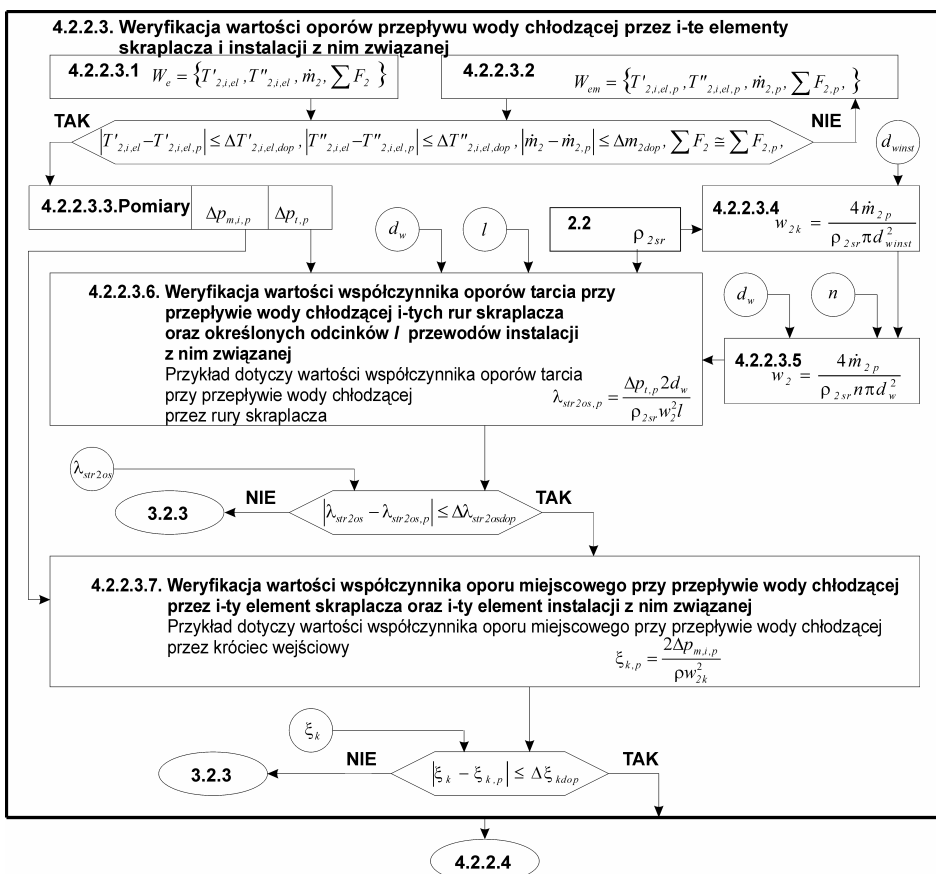
Weryfikacji dokonuje się w laboratorium na odpowiednim stanowisku pomiarowym. Zamieszczone w pracy [6] schematy stanowisk pomiarowych do badania miejscowych oporów hydraulicznych w kolankach i w trójkątach stanowią przykłady opisów takich stanowisk. Zwraca się tu uwagę, że nowo budowane stanowiska pomiarowe muszą być wyposażone w przyrządy pomiarowe adekwatne do możliwości dokonywania pomiarów wielkości zawartych w zbiorze W_e . Badania są przeprowadzane na wybranych, reprezentatywnych elementach określonej instalacji, które demontuje się (jeśli to możliwe) z instalacji funkcjonującej w technicznym systemie energetycznym w czasie remontów (napraw) i profilaktycznych wymian elementów. W wypadku, gdy demontaż określonego elementu nie jest możliwy, bada się rodzajowo takie same elementy jak zamontowane w instalacji, które posiadają te same cechy: konstrukcyjne i technologii ich wytwarzania.

Wartość współczynnika oporów tarcia λ_{str} określonego przewodu o jego długości l sprawdza się pośrednio poprzez pomiar różnicy ciśnień $\Delta p_{t,p}$ płynu przepływającego na jego wejściu i wyjściu. Badaniu podlega określony przewód, który wymontowuje się z określonej instalacji (albo wymiennika ciepła, np. rurę), jeżeli jest to możliwe. Przykład zilustrowano na rysunku 16, natomiast na rysunku 17 przedstawiono przykład weryfikacji wartości oporów miejscowych przepływu wody chłodzącej na wejściu ξ' i wyjściu ξ'' z rur skraplacza.

Następne działania weryfikujące dotyczą sprawdzenia pożądanej wartości niezawodności $R_{wc}(t_z)$ określonego wymiennika ciepła w zadanym czasie (trwałości) t_z (np. rys. 18) albo wartości niezawodności systemu wymienników ciepła o określonej strukturze, funkcjonujących w technicznym systemie energetycznym. W tym celu dokonuje się pomiarów czasu $t_{z,p}$ do uszkodzeń wymiennika(-ów) ciepła podczas ich funkcjonowania w technicznym systemie energetycznym. W przypadku, jeśli pomierzony czas $t_{z,p}$ przekracza czas trwałości t_z albo jest

jemu równy, kończy się działania weryfikacji procesu projektowania, co wyraża warunek: $t_{z,p} \geq t_z$. W wypadku, jeśli warunek ten nie jest spełniony, to występuje uszkodzenie określonego wymiennika ciepła albo systemu wymienników ciepła w czasie krótszym od czasu trwałości t_z . Dokonuje się wówczas ponownych badań eksploatacyjnych niezawodności wymienników ciepła. Badania te są dokonywane przez producentów wymienników ciepła lub są przez nich zlecane instytucjom badawczym.

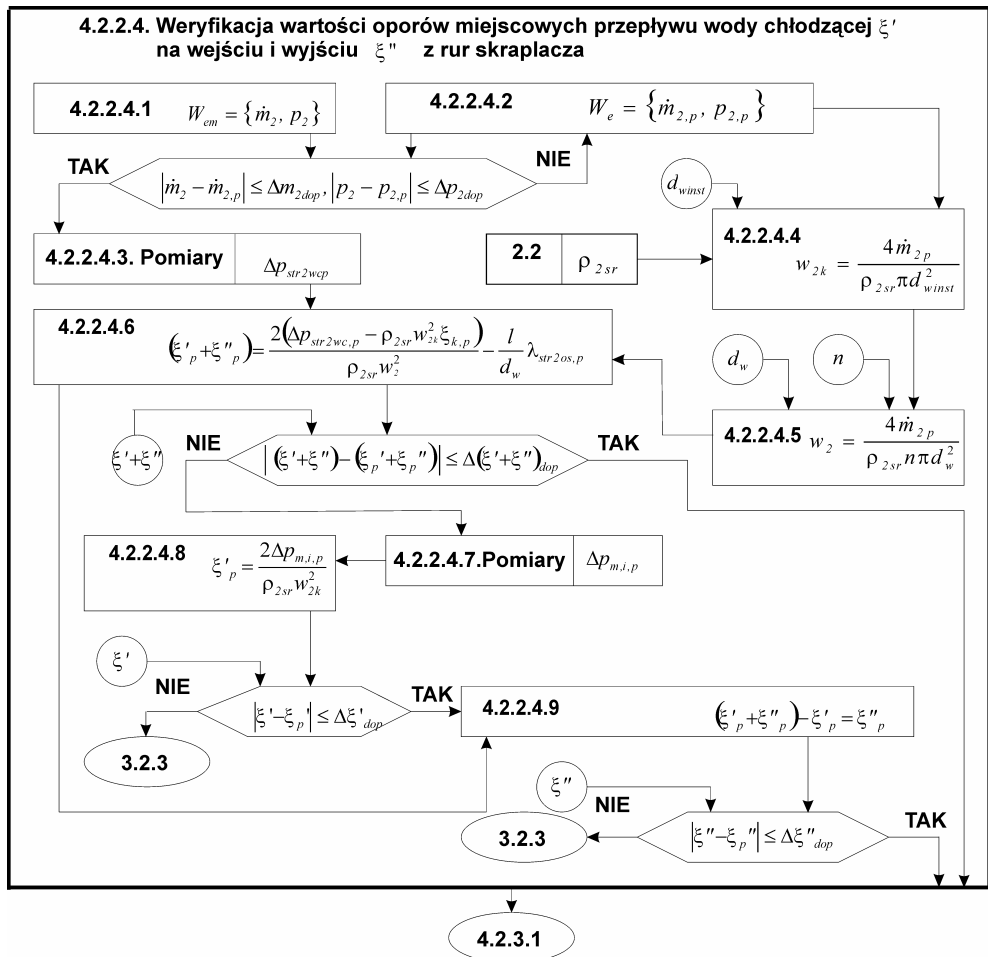
Dokładny sposób postępowania w tym celu jest zawarty w wielu pracach, m.in. [8, 9]. Schemat oszacowania funkcji niezawodności, które następnie będą wprowadzane do projektowania wymiennika(-ów) ciepła, przedstawiono na rysunku 19, w odniesieniu do parametrycznych metod oszacowania niezawodności wymienników ciepła.



Rys. 16. Algorytm weryfikacji wartości oporów przepływu wody chłodzącej przez *i*-te elementy skraplacza i instalacji z nim związanej

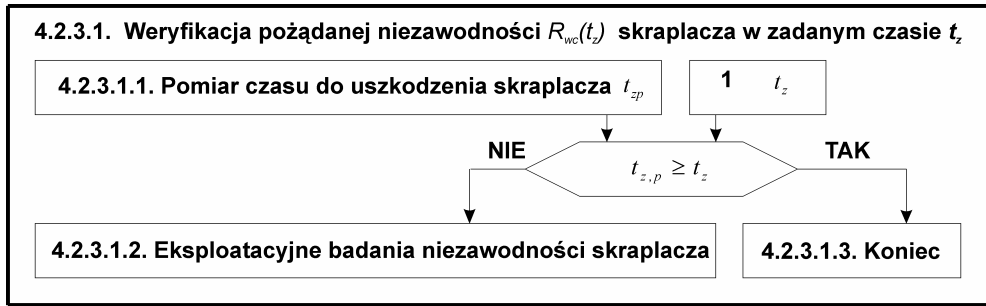
Fig. 16. Algorithm for verifying the value of the pressure drop of the flow of the water cooling the condenser through *i*-number of the elements of the condenser with the installation connected with it

Powstaje tu problem długotrwałej rejestracji wartości wielkości, charakteryzujących rodzaje uszkodzeń branych pod rozwagę w projektowaniu pożądanej niezawodności wymiennika(-ów) ciepła oraz okresowych pomiarów dotyczących oporów przepływu płynów wymieniających ciepło. Można to zlecać obsłudze technicznego systemu energetycznego, w którym określony wymiennik ciepła jest eksploatowany albo zastosować przyrządy pomiarowe, wyposażone w komputerowe rejestratory cyfrowe, które umożliwiają zapis pomiarów wartości wyróżnionych wielkości na nośnikach pamięci cyfrowej, natomiast odczyty mogą być dokonywane w czasie okresowych czyszczeń lub przeglądów technicznych tych wymiennika(-ów).

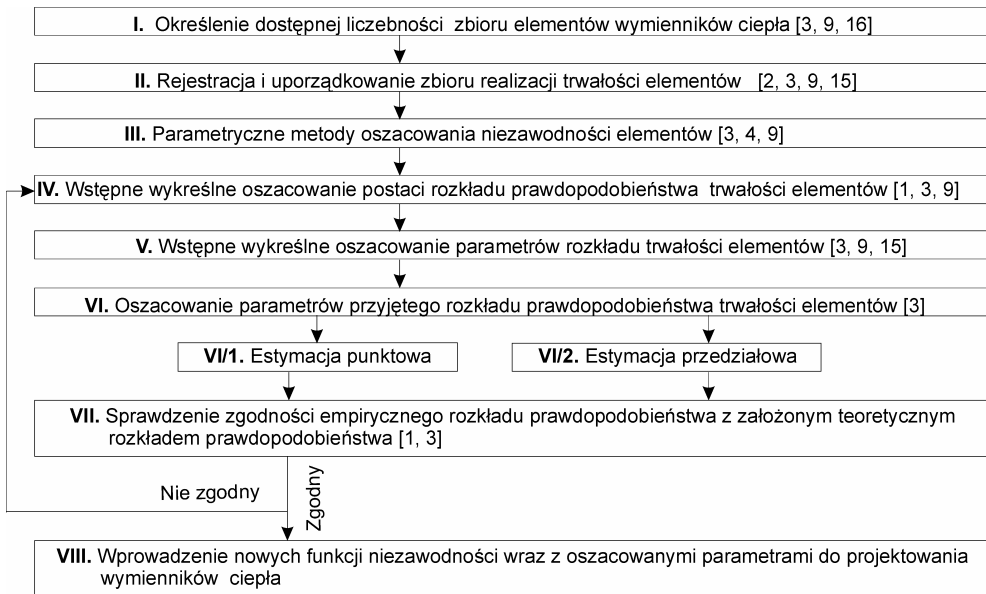


Rys. 17. Algorytm weryfikacji wartości oporów miejscowych przepływu wody chłodzącej na wejściu i wyjściu z rur skraplacza

Fig. 17. Algorithm for verifying the value of local resistances of the flow of the cooling water at the input and at the output of the condenser pipes



Rys. 18. Algorytm weryfikacji pożądanej niezawodności skraplacza w zadanym czasie
Fig. 18. Algorithm for verifying the desired reliability of the condenser in the set time



Rys. 19. Schemat oszacowania funkcji niezawodności określonych elementów
Fig. 19. General scheme of estimation of the reliability function of the definite elements

WNIOSKI

1. Nie można zaprojektować, a następnie zbudować wymienników ciepła o pożądanych niezawodnościach bez użycia opracowanej metody. Inaczej będą to przypadkowe wartości niezawodności wymienników ciepła, a konsekwencją tego mogą być określone skutki, mianowicie: niemożność funkcjonowania wymienników ciepła (w zadanym okresie), zagrożenie bezpieczeństwa technicznych systemów energetycznych i ich otoczenia oraz wynikłe straty ekonomiczne.

2. Opracowaną metodę można wykorzystywać w projektowaniu różnych rodzajów wymienników ciepła.
3. Przedstawiona metoda umożliwia wielowariantowe i racjonalne projektowanie wymienników ciepła.

Wykaz ważniejszych oznaczeń wielkości oraz symboli

- $C_{proj,i}$ – zbiór cech charakteryzujących określone i -te rozważane zjawisko (proces), wartości określonych w tym zbiorze cech są uwzględniane w projektowaniu,
- $C_{b,i}$ – zbiór cech charakteryzujących określone i -te rozważane zjawisko (proces), przedziały wartości określonych w tym zbiorze cech są wyznaczane w drodze badań laboratoryjnych,
- a_2 – współczynnik wyrównywania temperatury wody chłodzącej skraplacz [m^2/s],
- $c_{p,k}$ – średnie ciepło właściwe skroplin przy stałym ciśnieniu p [J/kgK],
- $c_{p,2}$ – średnie ciepło właściwe wody chłodzącej skraplacz, przy stałym ciśnieniu p [J/kgK],
- d_w – średnica wewnętrzna rur skraplacza [m],
- d_{winst} – średnica wewnętrzna rur instalacji wody chłodzącej skraplacz [m],
- d_z – średnica zewnętrzna rur skraplacza [m],
- Ga – liczba Galileusza,
- $i_{1,1}$ – entalpia właściwa pary wodnej na wejściu do turbiny parowej [J/kg],
- i_1 – entalpia właściwa pary wodnej na wyjściu z turbiny parowej [J/kg],
- Ja – liczba Jakoba,
- K – liczba podobieństwa przejścia fazowego pary wodnej w skropliny,
- l – długość rur skraplacza [m],
- Nu – liczba Nusselta,
- \dot{m}_1 – masowe natężenie przepływu pary wodnej na wejściu do skraplacza [kg/s],
- $\dot{m}_{1,p}$ – mierzona wartość masowego natężenia przepływu pary wodnej na wejściu do skraplacza [kg/s],
- \dot{m}_2 – masowe natężenie przepływu wody chłodzącej przez skraplacz [kg/s],
- $\dot{m}_{2,p}$ – mierzona wartość masowego natężenia przepływu wody chłodzącej przez skraplacz [kg/s],
- $N_{e,p}$ – mierzona wartość mocy efektywnej turbiny parowej [W],
- n_p – liczba pomiarów określonych wielkości,
- Pr – liczba Prandtla,
- p_1 – ciśnienie kondensacji pary wodnej w skraplaczu [Pa],
- $p_{1,p}$ – mierzona wartość ciśnienia kondensacji pary wodnej w skraplaczu [Pa],
- $p_{1,1,p}$ – mierzona wartość ciśnienia pary wodnej na wejściu do turbiny parowej [Pa],
- p_2 – ciśnienie wody chłodzącej skraplacz [Pa],
- $p_{2,p}$ – mierzona wartość ciśnienia wody chłodzącej skraplacz [Pa],
- Re – liczba Reynoldsa,
- r – ciepło (entalpia) parowania [J/kg],
- T_{sk} – średnia temperatura zewnętrznych ścianek rur skraplacza [K],
- $T_{sk,p,i}$ – mierzona i -ta wartość temperatury zewnętrznej ścianki rury skraplacza [K],
- $T_{w,p,i}$ – mierzona i -ta wartość temperatury wewnętrznej ścianki rury skraplacza [K],
- T_1 – temperatura kondensacji pary wodnej w skraplaczu [K],
- $T_{1,p}$ – mierzona wartość temperatury kondensacji pary wodnej w skraplaczu [K],
- $T_{2sr,p}$ – średnia logarytmiczna temperatura wody chłodzącej, między pomierzonymi temperaturami wejścia i wyjścia ze skraplacza [K],
- T'_2 – temperatura wody chłodzącej na wejściu do skraplacza [K],

- $T'_{2,p}$ – mierzona wartość temperatury wody chłodzącej na wejściu do skraplacza [K],
 $t_{1,1,p}$ – mierzona wartość temperatury pary wodnej na wejściu do turbiny parowej [°C],
 W_{em} – zbiór wielkości, których wartości stanowią wyniki projektowe skraplacza,
 W_e – zbiór wielkości pomiarowych wynikający ze zbioru [W_{em}],
 w_1 – prędkość przepływu poprzecznego pary wodnej względem rur skraplacza (wpływu pary wodnej do skraplacza) [m/s],
 w_2 – prędkość przepływu wody chłodzącej przez rury skraplacza [m/s],
 w_{2k} – prędkość przepływu wody chłodzącej przez króćce wejściowe do skraplacza [m/s],
 $w_{2,p}$ – mierzona wartość prędkości przepływu wody chłodzącej przez rury skraplacza [m/s],
 $\delta_{os,j}$ – prognozowana grubość osadów na powierzchni wymiany ciepła od strony j -tego płynu w skraplaczu [m],
 δ_s – grubość ścianki rury skraplacza [m],
 η_m – sprawność mechaniczna turbiny parowej,
 ι – zawartość powietrza, w mieszaninie pary wodnej i powietrza w skraplaczu [%],
 λ_s – współczynnik przewodzenia ciepła ścianki rury skraplacza [W/mK],
 λ_2 – współczynnik przewodzenia ciepła wody chłodzącej skraplacza [W/mK],
 ν_2 – kinematyczny współczynnik lepkości wody chłodzącej skraplacza, wartość dla średniej temperatury w osi (rdzeniu) przepływającej wody [m²/s],
 ν_k – kinematyczny współczynnik lepkości kroplin [m²/s],
 ρ_k – gęstość kroplin [kg/m³],
 ρ_1 – gęstość pary wodnej [kg/m³],
 ρ_{2sr} – średnia wartość gęstości wody chłodzącej skraplacza [kg/m³],
 Σb_2 – zawartości określonych mikroorganizmów w wodzie chłodzącej skraplacza,
 $\Sigma b_{2,p}$ – mierzona wartość zawartości określonych mikroorganizmów w wodzie chłodzącej skraplacza,
 ΣF_j – fizyczno-chemiczne właściwości określonego j -tego płynu przepływającego przez skraplacza,
 $\Sigma F_{j,p}$ – mierzone wartości fizyczno-chemicznych właściwości określonego j -tego płynu przepływającego przez skraplacza,
 τ_z – zadany czas funkcjonowania skraplacza w siłowni okrętowej [h].

LITERATURA

1. Benjamin J.R., Cornell A., *Rachunek prawdopodobieństwa, statystyka matematyczna i teoria decyzji dla inżynierów*, WNT, Warszawa 1977.
2. Bobrowski D., *Probabilistyka w zastosowaniach technicznych*, WNT, Warszawa 1986.
3. Czajgucki J.Z., *Niezawodność spalinowych siłowni okrętowych*, Wydawnictwo Morskie, Gdańsk 1984.
4. Firkowicz S., *Statystyczne badanie wyrobów*, WNT, Warszawa 1970.
5. Hajduk J., *Zarys pomiarów maszyn*, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Poznańskiej, Poznań 1973.
6. Kalenik M., Witowska B., *Badania miejscowych oporów hydraulicznych w kształtkach z PCV*, ACTA Scientiarum Polonorum, Architektura, 2007, nr 6(3), s. 15–24.
7. Kołodziejczyk L., Rubik M., Mańkowski S., *Pomiary w inżynierii sanitarnej*, Wydawnictwo Arkady, Warszawa 1974.
8. Łukaszewski K., *Czynniki warunkujące dokładność oszacowań funkcji niezawodności elementów na przykładzie wymiennika ciepła*, materiały XIII Międzynarodowej Szkoły Komputerowego Wspomagania Projektowania Wytwarzania i Eksploatacji, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa – Jurata 2009, s. 211–218.

9. 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.
10. Łukaszewski K., *Metoda projektowania wymienników ciepła technicznych systemów energetycznych ze względu na wymaganą niezawodność tych systemów*, rozprawa doktorska, Gdynia 2011.
11. Oleśkiewicz-Popiel C., Wojtkowiak J., *Eksperymenty w wymianie ciepła*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2004.
12. Piotrowski J., *Podstawy metrologii*, PWN, Warszawa 1977.
13. PN-EN306:2001, *Wymienniki ciepła. Metody pomiaru parametrów koniecznych do obliczania wydajności*.
14. Romer E., *Miernictwo przemysłowe*, PWN, Warszawa 1970.
15. Sztarski M., *Niezawodność i eksploatacja urządzeń elektronicznych*, WKiŁ, Warszawa 1972.
16. *Tablice minimalnej liczebności. Próbkę i wielkości przedziałów ufności (metoda reprezentacyjna)*, Zeszyty Metodologiczne – materiały pomocnicze, GUS, 1967, nr 3, Warszawa.

THE METHOD OF DESIGNING OF HEAT EXCHANGERS OF TECHNICAL POWER SYSTEMS IN VIEW OF THE REQUIRED RELIABILITY OF THESE SYSTEMS – PART 2

Summary

In this paper a multi-verifying of heat exchangers designing has been contained. Multi-verifying of heat exchangers designing is called verifying of models system in designing of heat exchangers. This verification includes: experimental current multi-verification of designs of heat exchangers, post-designing verification of mathematical models of relations between the definite scalar quantities in designing of heat exchangers. The experimental current multi-verification of designs of heat exchangers is carried out on the real technical power system or if there is a need, researches are carried out on models of heat exchangers. The post-designing verification of mathematical models of relations between the definite scalar quantities in designing of heat exchangers is carried out because of the long-term monitoring of direct measurements on heat exchangers of during its exploitation in technical energetic system.

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