

Kazimierz Brodowicz, Mariusz Markowski*

Instytut Techniki Ciepłej

*Petrochemia S.A., Płock, ul. Chemików 7

OBLICZENIA SIECI REGENERACYJNYCH WYMIENNIKÓW CIEPŁA OGRANICZAJĄCEJ EFEKT CIEPLNY OSADÓW

W pracy przedstawiono metodę obliczeń sieci wymienników regeneracyjnych, która ogranicza oddziaływanie oporów cieplnych osadów narastających w okresie eksploatacji. Metoda rozpoczyna się od obliczenia sieci metodą Pinch Point Technology, a następnie otrzymana sieć jest modyfikowana przez dwie transformacje. W transformacjach tych ważnymi elementami są opisy: wymiennika ciepła wg kryterium zminimalizowanej wrażliwości na osady oraz oddziaływania oporów powstałych w innych wymiennikach. Praca nawiązuje do uwarunkowań w przemyśle petrochemicznym. W tymże przemyśle są już eksploatowane dwie instalacje zaprojektowane zaproponowaną metodą, które potwierdziły jej skuteczność.

WYKAZ OZNACZEŃ

- A – powierzchnia wymiany ciepła [m^2]
- C – ciepło właściwe czynnika [$J/kg \cdot K$]: C_C – podgrzewanego, C_H – schładzanego
- k – współczynnik przenikania ciepła [$W/m^2 \cdot K$]: k_c – w wymienniku bez osadów, k_f – w tym samym wymienniku z maksymalnym oporem cieplnym osadów R_f^*
- m – strumień masowy czynnika [kg/s]: m_C – podgrzewanego, m_H – schładzanego
- Q – strumień wymienianego ciepła [W]: Q_C – w wymienniku bez osadów, Q_f – w tym samym wymienniku z maksymalnym oporem cieplnym osadów R_f^*
- R_f^* – wartość maksymalna oporu cieplnego osadów w wymienniku (w przybliżeniu opory narastają asymptotycznie) [$m^2 \cdot K/W$]

- T – ogólnie temperatura [°C]: T_C – czynnika podgrzewanego, T_H – schładzanego; T_{Hn} , T_{Cn} – temperatury zmienne w wymienniku n -tym: T_{Hcn} , T_{Ccn} – w wymienniku n -tym przy założeniu, że nie ma w nim osadów, T_{Hfn} , T_{Cfn} – gdy są w nim osady, T_{Hn}^* , T_{Cn}^* – w wymienniku n -tym bez osadów ale z uwzględnieniem osadów w wymiennikach poprzedzających, T_{Hfn}^* , T_{Cfn}^* – są osady zarówno w obliczanym wymienniku jak i w wymiennikach poprzedzających; temperatury wlotowe (i) oraz wylotowe (o) tworzy się po dodaniu odpowiedniego indeksu n np. T_{Ccin} , T_{Hfn} , T_{Cfon} itd.
- Z – długość bieżąca wymiennika [m]
- α – współczynnik wnikania ciepła [W/m²·K]
- β_n , β_n^* – miara całkowitych zmian w wymienniku n -tym wywołanych oporami osadów istniejących w tymże wymienniku [-]: przy braku efektów osadów wymienników poprzedzających $\beta_n = Q_{fn}/Q_{cn}$, z uwzględnieniem efektów osadów wymienników poprzedzających $\beta_n^* = Q_{fn}^*/Q_{cn}^*$
- γ – stosunek średniej logarytmicznej różnicy temperatur do średniej arytmetycznej w wymienniku [-]
- δT – ogólnie całkowity przyrost temperatury określonego czynnika w wymienniku [K]; symbol δT może oznaczać każdą temperaturę zdefiniowaną przy omawianiu symbolu T , np. wielkości δT_C , δT_H , δT_{Hcn} , δT_{Ccn} itp.
- ΔT – ogólnie różnica temperatur [K]: $\Delta T_{\min PPT}$ – minimalna różnica w metodzie Pinch Point Technology; $\Delta T_{\min n}$, $\Delta T_{\max n}$ – odpowiednio minimalna i maksymalna różnica w wymienniku n -tym z dodatkowymi indeksami $\Delta T_{\min cn}$ (bez osadów) $\Delta T_{\max fn}$ (z osadami), $\Delta T_{\min cn}^*$, $\Delta T_{\max cn}^*$ bez osadów ale z uwzględnieniem zmian wywołanych przez wymienniki poprzedzające, $\Delta T_{\min fn}^*$, $\Delta T_{\max fn}^*$ – z osadami i z uwzględnieniem wymienników poprzedzających; ΔT_{ar} – średnia arytmetyczna w wymienniku; ΔT_{\ln} – średnia logarytmiczna w wymienniku: $\Delta T_{\ln c}$ – bez osadów, $\Delta T_{\ln f}$ – z uwzględnieniem osadów
- εT – ogólnie niedobór lub nadwyżka temperatury wywołana efektami cieplnym osadów [K]: εT_C – niedobory w strumieniu podgrzewanym: εT_{Cin} – na wlocie do wymiennika n -tego (powstałe w wymiennikach poprzedzających), εT_{Cn}^* – powstałe w wymienniku n -tym wskutek zmiany temperatury na wlocie, εT_{Cfn}^* – niedobory w wymienniku n -tym spowodowane wymiennikami poprzedzającymi i osadami w wymienniku n -tym; analogiczne wielkości dla nadwyżek w strumieniu schładzanym: εT_{Hin} na wlocie εT_{Hn}^* , εT_{Hfn}^* (szczegóły na rys. 3, 6, 7).
- ϕ – miara zmian intensywności wymiany ciepła spowodowanych oporami cieplnymi osadów $\phi = k_c R_f^*$ [-].

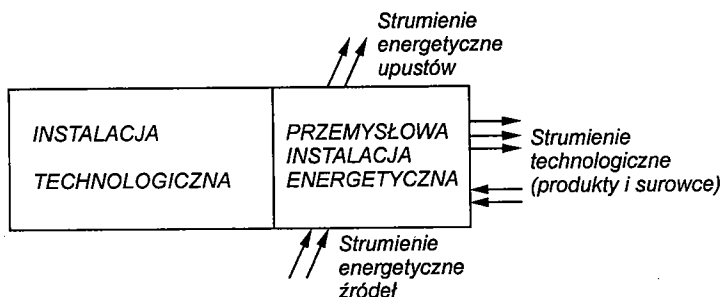
Indeksy

zestawiono je w kolejności dopisywania do symbolu

- H, C – strumienie technologiczne wymieniające ciepło w rozpatrywanym wymienniku: H – schładzany, C – podgrzewany
- c, f – brak (c) lub obecność (f) osadów w wymienniku na etapie tworzenia opisu (natomiast metoda uwzględnia, że w każdym wymienniku występują osady)
- i, o – wlot (i) i wylot (o) z wymiennika
- – podkreśla uwzględnienie oddziaływania osadów z wymienników poprzedzających w rozpatrywanym wymienniku
- n – numer rozpatrywanego wymiennika (niekiedy w wyjaśnianiu występujących zjawisk pominięto numer wymiennika, jest on dopiero ważny przy kolejnym obliczaniu wymienników z sieci).

WSTĘP

Jak wiadomo instalacja technologiczna jest systemem o znacznej integracji procesów zdolnym do przerabiania określonych surowców. Natomiast przemysłowa instalacja energetyczna jest podsystemem instalacji technologicznej zabezpieczającym wymagane przez instalację technologiczną parametry poprzez doprowadzenie, odprowadzenie i regenerację ciepła. Instalacja energetyczna składa się z wymienników ciepła, orurowania, armatury, pomp, zbiorników, systemu sterowania itp. Schemat współdziałania obu instalacji, przedstawiony na rys. 1, jest typowy dla większości instalacji technologicznych, w których procesy zachodzą w podwyższonej temperaturze. Wówczas niektóre strumienie technologiczne – zwłaszcza surowce, trzeba podgrzać, inne – półprodukty i produkty schłodzić przed ich skierowaniem do dalszej produkcji lub zbiorników magazynowych. Realizuje się to w regeneracyjnych wymiennikach ciepła uzupełnionych wymiennikami pobierającymi ciepło ze źródeł (podgrzewacze) i oddającymi ciepło do upustów (chłodnice).



Rys. 1. Schemat wyjaśniający relację między instalacją technologiczną a podporządkowaną jej instalacją energetyczną

W petrochemii, na gruncie której powstała niniejsza praca, występują znaczące efekty cieplne wywołane osadami powstałymi z węglowodorów ciekłych przepływających przez wymienniki ciepła instalacji energetycznej. Jednocześnie istnieje ustalony system eksploatacji instalacji technologicznej, która działa bez najmniejszej przerwy przez rok lub dwa, po czym w ciągu około 2 tygodni przeprowadzane są remonty, a w tym usuwanie osadów z wymienników. Następnie instalacja technologiczna jest uruchamiana i eksploatowana przerabiając stałe strumienie masowe surowców. W czasie eksploatacji sukcesywnie narastają osady i związane z nimi opory cieplne. Można jeszcze dodać, że cała instalacja energetyczna musi być w pełni podporządkowana wymogom instalacji technologicznej: utrzymać stałe temperatury, a więc nadążać z dostarczaniem większej energii napędowej związanej z nieodwracalnością procesu wymiany ciepła, na który wpływają narastające w czasie eksploatacji opory cieplne osadów. Ponadto musi działać bez najmniejszego postoju 1 rok lub 2 lata, być bezawaryjna, ograniczać do minimum obsługę. Sprostanie tym wymogom doprowadziło do zaproponowania instalacji energetycznej, która potrafi efekty cieplne osadów kompensować. Takie instalacje zostały zbudowane i są eksploatowane spełniając zadane parametry technologiczne [8]. W międzyczasie, oparta na zdobytych doświadczeniach, powstała metoda obliczania sieci [5], [6] szczegółowo tu przedstawiona.

Sieć wymienników regeneracyjnych wraz z podgrzewaczami i chłodnicami, albo w skrócie sieć, jest to myślowo wyodrębniony fragment instalacji energetycznej ograniczony do informacji o strukturze połączeń wszystkich wymienników oraz parametrów w postaci strumieni masowych i temperatur, które w nich występują.

Obliczenie sieci polega na rozwiązaniu następującego zadania. Dla znanych strumieni technologicznych co do rodzaju substancji, strumieni masowych i temperatur należy określić: strukturę połączeń regeneracyjnych wymienników ciepła, która zapewnia największy stopień regeneracji, sposób dołączeń niezbędnych podgrzewaczy zasilanych ze źródła zewnętrznego (zazwyczaj parą), sposób dołączeń chłodnic (zasilanych wodą obiegową).

1. PRZEDSTAWIENIE ZAPROPONOWANEJ METODY

Na przedstawioną metodę składają się:

- procedura obliczania sieci przez trzy iteracje i otrzymanie w ramach kolejnych iteracji trzech sieci: sieć podstawową (*SP*), sieć wirtualną (*SW*) i sieć realizowaną (*SR*).
- algorytmy wyznaczenia kolejnych sieci, a zwłaszcza algorytm obliczania najważniejszej dla metody sieci wirtualnej.

Sieć podstawową (*SP*) uzyskuje się metodą *PPT*. Sporządza się krzywe kompozycyjne (*CC*) i określa minimalną różnicę temperatur w punkcie pinch ($\Delta T_{\min PPT}$) [7]. W kształtowaniu *SP*, oprócz znanych w metodzie *PPT* warunków wprowadza się dodatkowe, wiedząc że będzie ona podstawą tworzenia sieci wirtualnej. Przyczyny ich wprowadzenia są wyjaśnione w punkcie omawiającym obliczanie sieci wirtualnej, tu ograniczono się tylko do ich wymienienia. Po pierwsze należy starać się, aby w każdym wymienniku regeneracyjnym minimalna różnica temperatur była jak najmniejsza. Po drugie ograniczać liczbę wymienników zainstalowanych na tych samych strumieniach technologicznych. Szczególnie należy przestrzegać obu z wymienionych warunków na tych strumieniach technologicznych, na których osady i ich oddziaływania są największe.

Sieć wirtualna (*SW*) powstała na podstawie następującego rozumowania. Jeżeli osady są zjawiskiem nieuniknionym, to trzeba ich obecność zaakceptować, ale jednocześnie ograniczyć efekty cieplne, jakie wywołują. Jest to możliwe poprzez zaakceptowanie *SP* jako systemu znacznie już zoptymalizowanego i jego udoskonalenie na dwa różne, ale wzajemnie uzupełniające się sposoby. Pierwszym jest zastosowanie w strukturze z *SP* wymienników regeneracyjnych o małej wrażliwości na efekty cieplne osadów, drugim to zrównoważenie niewielkich efektów cieplnych osadów, bo powstałych w wymiennikach o małej wrażliwości na osady, w dodatkowych wymiennikach kompensacyjnych: podgrzewaczach kompensacyjnych i chłodnicach kompensacyjnych. Umieszcza się je na wszystkich strumieniach technologicznych, na których w *SP* nie ma podgrzewaczy i chłodnic. Natomiast na tych strumieniach technologicznych gdzie są te wymienniki, przejmują one dodatkowo funkcje kompensacyjne, co zapewnia ich przeliczenie z uwzględnieniem zwiększonych w stosunku do *SP* strumieni wymienianego ciepła.

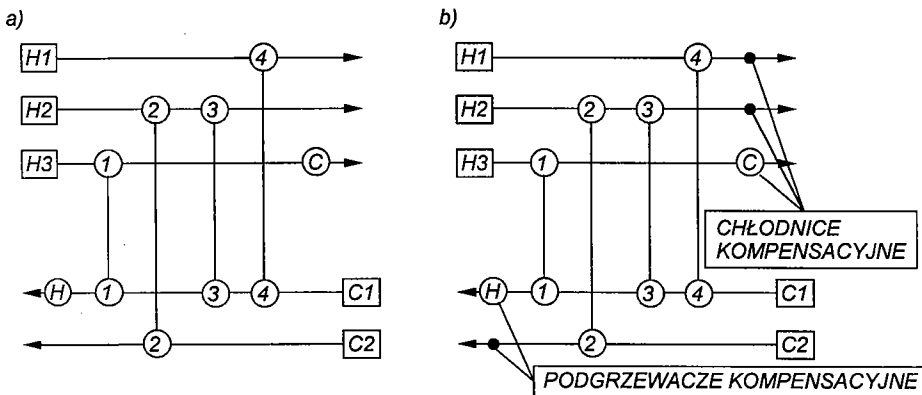
Podgrzewacze kompensacyjne zasilane są ze źródeł zewnętrznych, a więc zwiększają pobór energii. Pogarszają przez to minimalizację zapotrzebowania energii uzyskaną w *SP*. Jednakże zastosowanie wymienników o małej wrażliwości powoduje, że pogorszenie to nie jest duże. Schemat dołączeń wymienników w sieci i wymienników kompensacyjnych przedstawia rys. 2.

Algorytm obliczeń sieci wirtualnej składa się z:

- przyjęcia struktury z *SP*,
- obliczenia każdego wymiennika regeneracyjnego opartego na kryterium małej wrażliwości na osady, z uwzględnieniem oddziaływania osadów z innych wymienników,
- sposobu dołączenia wymienników kompensacyjnych (omówiony powyżej).

Sieć realizowana (*SR*) uzyskiwana jest poprzez różne uproszczenia w *SW*. Typowym uproszczeniem jest rezygnacja z wymienników kompensacyjnych na tych strumieniach technologicznych, którym proces technologiczny nie stawia zbyt wysokich wymagań. Natomiast uproszczenia szczegółowe wynikają często z zupełnie prozaicznych uwarunkowań, może to być na przykład brak miejsca na postawienie wymiennika albo wymóg zbyt skomplikowanego orurowania przy jego instalowaniu itp. Tak więc algorytmu tej transformacji nie

da się jednoznacznie zapisać, a w pewnych fragmentach jest on tworzony i jednocześnie rozwiązywany przez projektanta instalacji. Ostatecznym i decydującym wskaźnikiem poprawności przyjętych decyzji pozostaje nie omawiana tu analiza ekonomiczna przedsięwzięcia.

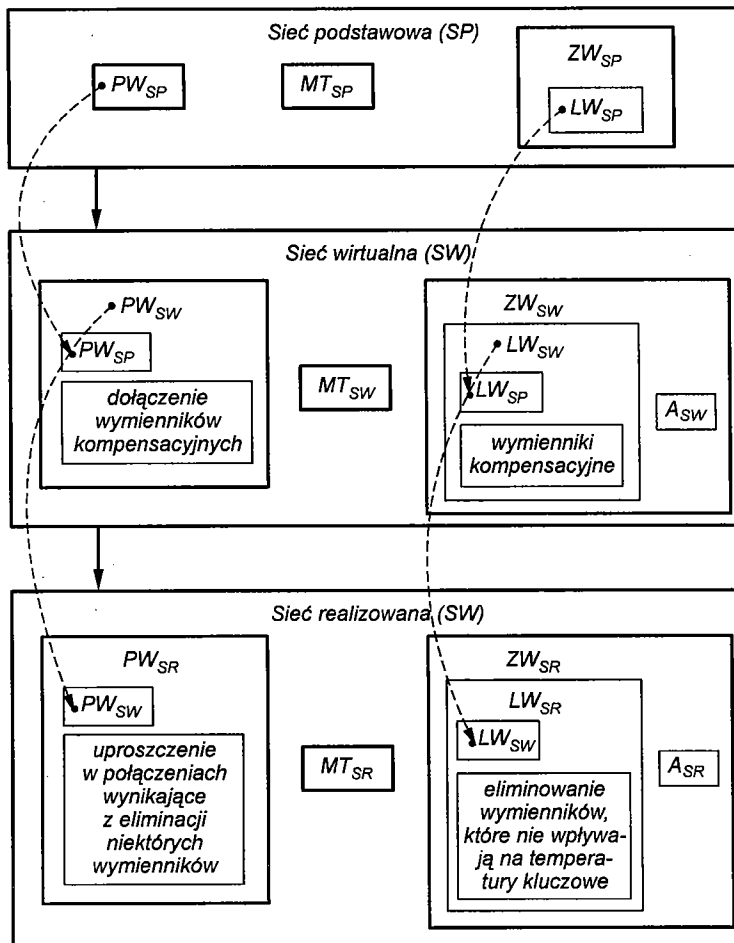


Rys. 2. Ilustracja kształtowania sieci wirtualnej; a) sieć podstawowa (*SP*) – 4 wymienniki regeneracyjne (1, 2, 3, 4) jeden podgrzewacz (*H*) i jedna chłodnica (*C*); b) sieć wirtualna (*SW*) składająca się z 4 wymienników regeneracyjnych obliczonych wg kryterium małej wrażliwości na osady i wymienników kompensacyjnych (zaznaczonych czarnymi punktami) 2 chłodnice kompensacyjne i 1 podgrzewacz kompensacyjny; na strumieniach gdzie były podgrzewacze i chłodnica w *SP* przejmują one dodatkowo funkcje kompensacyjne (co symbolicznie zaznaczono \textcircled{C} , \textcircled{H}).

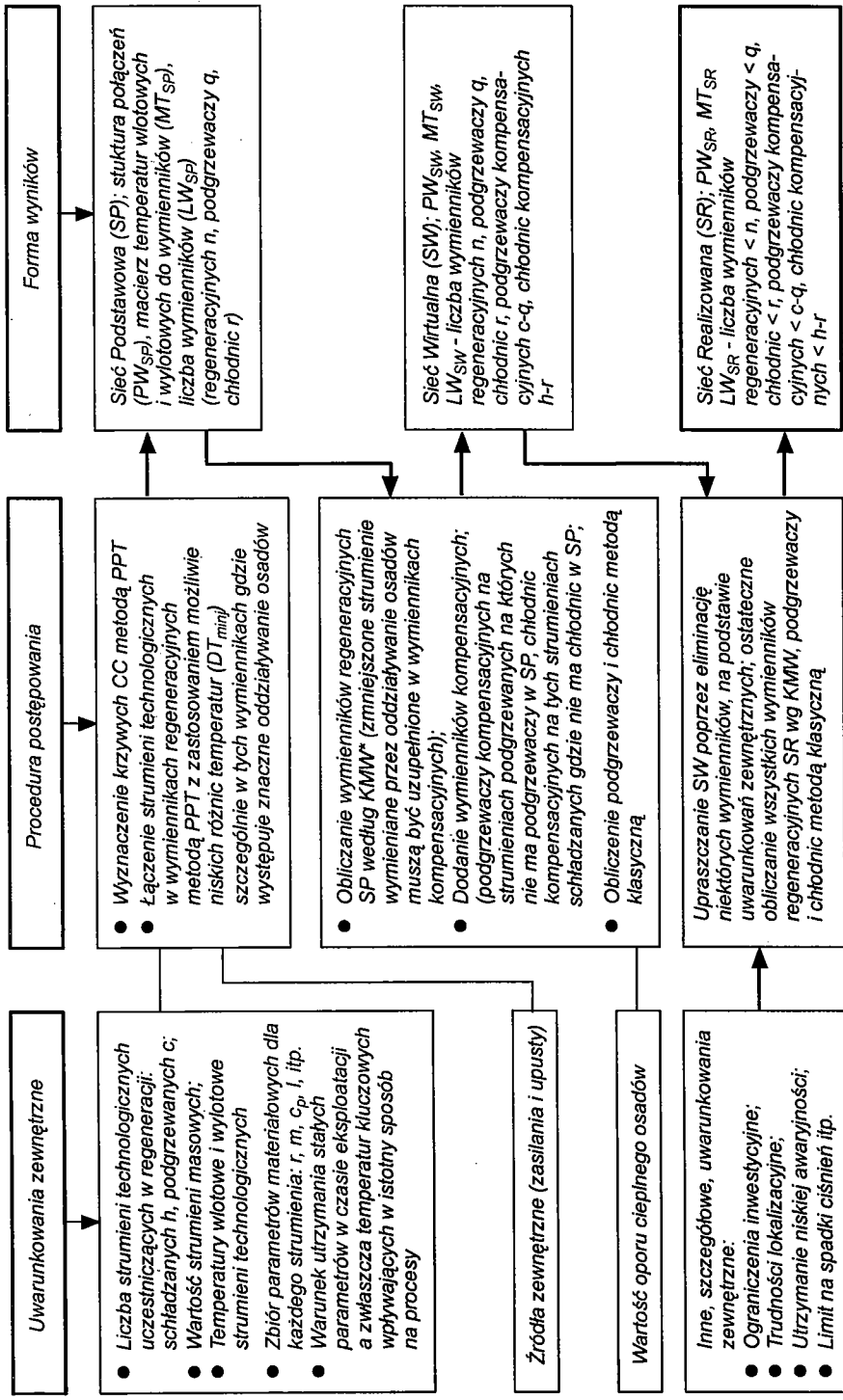
Przedstawioną metodę odzwierciedlają dwa schematy. Na schemacie 1 sieci traktowane są jako zbiory elementów: struktury sieci, macierzy temperatur i zestawu wymienników. Schemat ilustruje kolejne iteracje w rozwijaniu sieci. W tym celu wykorzystuje się elementy z poprzedniej sieci (przenoszenie tych elementów zaznaczone jest strzałką narysowaną linią kropkowaną). Przy przejściu z *SP* do *SW* rozbudowuje się sieć, przy przejściu z *SW* do *SR* – upraszcza. Schemat 2 uzupełnia schemat 1 poprzez przedstawienie algorytmów budowy kolejnych sieci i ich transformacji.

2. OBLICZANIE WYMIENNIKA REGENERACYJNEGO DO SIECI WIRTUALNEJ

W wymienniku regeneracyjnym znajdującym się w sieci można mówić o dwóch efektach oddziaływań oporów cieplnych osadów. Pierwszy wynika z oporów osadów występujących w obliczanym wymienniku i wywołuje on zmianę temperatur wylotowych z tego wymiennika [4]. Drugi spowodowany jest



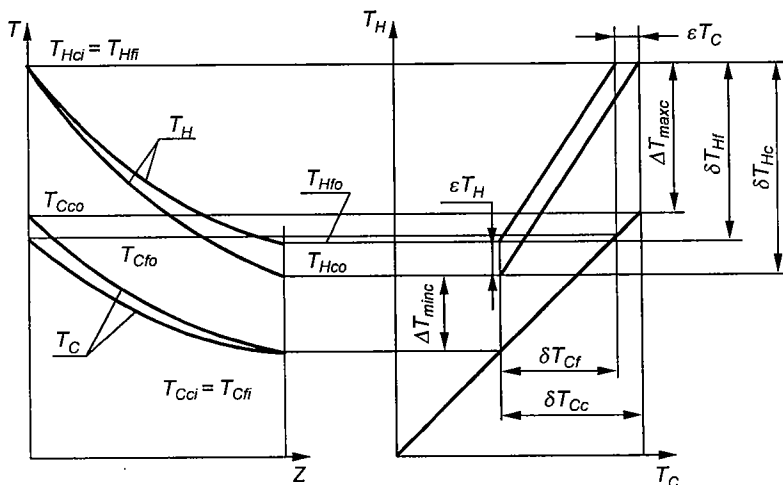
Schemat 1. Związek między poszczególnymi sieciami; sieci traktowane są jako zbiory składające się z następujących elementów: struktury połączeń wymienników (PW), macierzy temperatur wlotowych i wylotowych (z każdego wymiennika (MT), zestawu wymienników (ZW) określonego liczbą wymienników (LW) i ewentualnie macierzą powierzchni (A); elementy te opatrzone są indeksami (SP , SW , SR) określającymi, do jakiej sieci poszczególne elementy zbiorów przynależą. Liniami przerywanymi przedstawiono przenoszenie elementów zbiorów z poszczególnych sieci



Schemat 2. Algorytm postępowania przy tworzeniu kolejnych sieci. *) KMW – Kryterium Małej Wrażliwości na osady w obliczaniu wymienników regeneracyjnych

osadami występującymi w innych wymiennikach i powoduje zmianę temperatur wlotowych do obliczanego wymiennika. Te inne wymienniki nazwano tu wymiennikami poprzedzającymi, gdyż są one umieszczone na tych samych strumieniach technologicznych co wymiennik obliczany i znajdują się przed nim względem napływu czynnika. W procedurze obliczeń kolejnego wymiennika z sieci najpierw trzeba określić efekty oddziaływań wymienników poprzedzających. Dopiero bowiem po określeniu temperatur wlotowych można obliczyć wymiennik i wyznaczyć efekty oddziaływań występujących w nim osadów. Oczywiście jest, że efekty oddziaływań wymienników poprzedzających spowodowane są osadami w nich występującymi. Dlatego wyznaczenie efektów oporów cieplnych osadów, istniejących w obliczanym wymienniku, stanowi zagadnienie kluczowe dla zaproponowanej metody. Stąd omówiono je w pierwszej kolejności, a następnie przedstawiono oddziaływanie wymienników poprzedzających.

Opis efektów oporów cieplnych osadów występujących w obliczanym wymienniku w swej naturze jest niezależny od oddziaływania innych wymienników, dlatego może być wyjaśniony na przykładzie pojedynczego wymiennika (tj. niezwiązanego z siecią) co uprości zapis poprzez pominięcie indeksu n (rys. 3).



Rys. 3. Wpływ osadów występujących w wymienniku (n -tym) bez oddziaływań wymienników poprzedzających np. $n = 4$ z rys. 2b zmieniających temperatury wlotowe o: $\epsilon T_{H4} = (1 - \beta_4) \delta T_{Hc4}$, $\epsilon T_{C4} = (1 - \beta_4) \delta T_{Cc4}$

Porównując warunki wymiany ciepła w tym samym wymienniku raz bez osadów – wielkości występujące w opisie mają indeks c , a drugi raz z osadami o znanej wartości R_f^* (indeks f) można opisać oddziaływanie oporów cieplnych osadów za pomocą dwóch parametrów. Pierwszy parametr ϕ związany jest ze zmianą intensywności wymiany ciepła i opisany jest współczynnikiem przenikania, którego wartość początkowa k_c w obecności osadów zmniejsza się do wartości k_x [2], [5], [8]. Drugi parametr β określa całkowity

efekt oddziaływania osadów w postaci zmniejszenia strumienia wymianianego ciepła z Q_c do Q_f [7]. A więc

$$k_f = \frac{k_c}{1 + k_c R_f^*} = \frac{k_c}{1 + \phi}, \quad (1)$$

$$\beta = \frac{Q_f}{Q_c} = \frac{1}{1 + \phi} \frac{\Delta T_{inf}}{\Delta T_{inc}} = \frac{\delta T_{Hc} - \varepsilon T_H}{\delta T_{Hc}} = \frac{\delta T_{Cc} - \varepsilon T_c}{\delta T_{Cc}}. \quad (2)$$

Z zależności (2) wynikają związki $\varepsilon T_H = (1 - \beta)\delta T_{Hc}$; $\varepsilon T_c = (1 - \beta)\delta T_{Cc}$, po uwzględnieniu których można uzyskać zależność na ΔT_{inf} :

$$\Delta T_{inf} = \frac{[\Delta T_{maxc} + (1 - \beta)\delta T_{Cc}] - [\Delta T_{minc} + (1 - \beta)\delta T_{Hc}]}{\ln \frac{\Delta T_{maxc} + (1 - \beta)\delta T_{Cc}}{\Delta T_{minc} + (1 - \beta)\delta T_{Hc}}}. \quad (3)$$

Porównując pierwszy i trzeci wyraz z zależności (2), uzyskuje się związek między ϕ , β i odpowiednimi różnicami ΔT . Ze związku tego można wyznaczyć parametr β . Jednakże z prawej strony związku (2) parametr β występuje pod logarytmem (co wynika z równania (3)), co utrudnia efektywne jego wyznaczenie, dlatego wprowadzono zależność, definiującą jednocześnie wielkość γ , podaną graficznie na rys. 4:

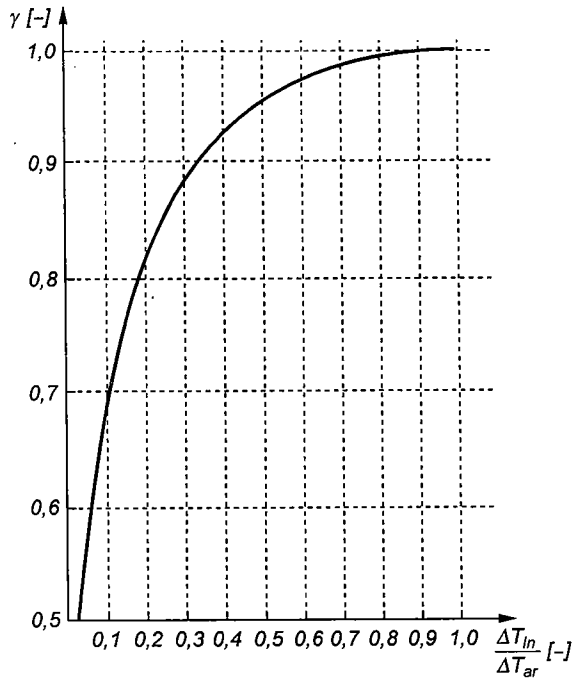
$$\Delta T_{in} = \gamma \Delta T_{ar}.$$

Ostatecznie z zależności (2) i (3) uzyskuje się:

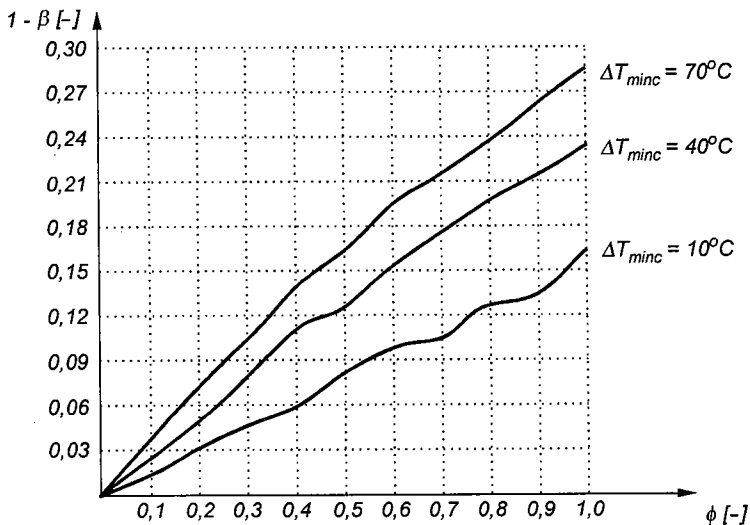
$$\beta = \frac{1 + \frac{\delta T_{Hc} + \delta T_{Cc}}{\Delta T_{minc} + \Delta T_{maxc}}}{\frac{\gamma_c}{\gamma_f} (1 + \phi) + \frac{\delta T_{Hc} + \delta T_{Cc}}{\Delta T_{minc} + \Delta T_{maxc}}}. \quad (4)$$

Ponieważ $\phi = k_c R_f^*$, a wobec braku możliwości kontrolowania wartości R_f^* , aby ϕ było małe, mały musi być współczynnik przenikania ciepła k_c [1]. W przypadku węglowodorów ciekłych można uzyskiwać k_c nawet poniżej $100 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$. Wynika to z faktu, że powstawanie osadów z węglowodorów bardzo słabo zależy od ich prędkości w wymiennikach, którą można obniżyć nawet do $0,1 \text{ m/s}$. Natomiast mała wartość ΔT_{min} przejawia się zarówno mniejszą wartością γ_c/γ_f jak i większą wartością drugiego członu w liczniku i mianowniku. Obie te przyczyny powodują, że wartości β mało różnią się od jedności. Dlatego należy zabiegać o małe wartości ΔT_{mincn} w *SP*, w każdym wymienniku regeneracyjnym, co było sygnalizowane w p. 2. Pewną uciążliwość w obliczeniach stanowi tu fakt, że o ile znana jest a priori (ściślej

z SP) wartość $\Delta T_{\min c}$, $\Delta T_{\max c}$ a przez to i γ_c , to nie znane są wartości $\Delta T_{\min f}$ oraz $\Delta T_{\max f}$ (bo nie znane są na tym etapie $\varepsilon T_H = (1 - \beta)\delta T_{Hc}$ i $\varepsilon T_C = (1 - \beta)\delta T_{Cc}$), dlatego trzeba je obliczyć iteracyjnie. Zabiegi te prowadzą do uzyskania niskich wartości na wyrażenie $(1 - \beta)$, co ilustruje rys. 5.

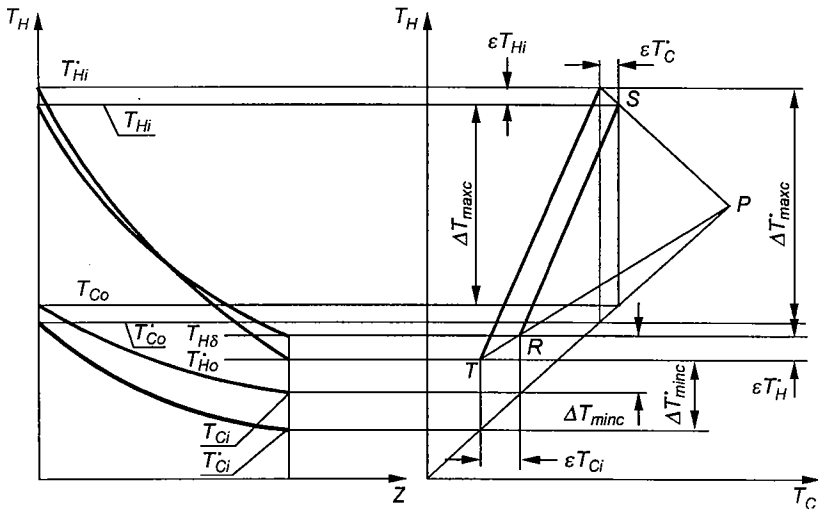


Rys. 4. Przebieg funkcji γ



Rys. 5. Przykładowe wartości liczbowe $(1 - \beta)$ uzyskane z zależności 4; przyjęto $\Delta T_{\max c} = 160^\circ C$, $\delta T_{Hc} = 200^\circ C$

Uwzględnienie efektów cieplnych osadów występujących w wymiennikach poprzedzających jest proste, jeżeli występuje tylko jeden wymiennik poprzedzający – jak np. wymiennik 2 poprzedza wymiennik 3 na strumieniu $H2$. Łatwo obliczyć nadwyżkę i niedobór temperatury z obliczeń efektów osadów (poniżej omówionych) w wymiennikach 2 i 4. Jeżeli wymienników poprzedzających jest więcej na jednym strumieniu technologicznym odpowiednie nadwyżki i niedobory (rys. 2) temperatur wejściowych na wymiennik, można bez większych trudności obliczyć na drodze iteracyjnej. Jeżeli zatem znane są temperatury w wymienniku n -tym z SP , a mianowicie: T_{Hin} , T_{Hon} , T_{Cin} , T_{Con} (rys. 6a) oraz znane są efekty oddziaływania wymienników poprzedzają-



Rys. 6. Efekty oddziaływań wymienników poprzedzających na zmiany temperatur wlotowych do wymiennika n -tego, jeżeli jest to wymiennik 3 z rys. 2b $n = 3$ to: $\varepsilon T_{H3} = \varepsilon T_{H2}$ i $\varepsilon T_{C3} = \varepsilon T_{C4}$ oraz generowane w wymienniku odpowiedzi na powyższe zakłócenia temperatur w postaci: εT_{H3} i εT_{C3} ; relacje między poszczególnymi wielkościami wyznacza podobieństwo trójkątów PRS i PTU

cych na temperatury wlotowe w wymienniku obliczanym w postaci wartości εT_{Hin} i εT_{Cin} , a przez to i temperatury wlotowe T_{Hin}^* i T_{Hon}^* to powstałe tu zadanie polega na obliczeniu wylotowych temperatur w hipotetycznym wymienniku n -tym, bez osadów w obliczanym wymienniku, ale z efektem osadów w wymiennikach poprzedzających, a więc temperatur T_{Hon}^* i T_{Con}^* . Interpretacją tego rozwiązania jest podobieństwo trójkątów PRS i PTU z rys. 6, przy czym położenie odcinka TU wyznaczają oprócz znanych (εT_{Hin} i εT_{Cin}) dwie wartości (εT_{Hn}^* i T_{Cn}^*). Łatwo można udowodnić, że wielkości te opisane są następującym układem równań dla każdego wymiennika obliczanego (opuszczono indeks n dla uproszczenia zapisu)

$$A(\varepsilon T_{Ci} - \varepsilon T_{C}^*) - \varepsilon T_{Hi} - \varepsilon T_{H}^* = 0,$$

$$B\varepsilon T_{C2}^* + C\varepsilon T_{C}^* + D = 0,$$

gdzie: $A = (m_H C_H / m_C C_C)$,

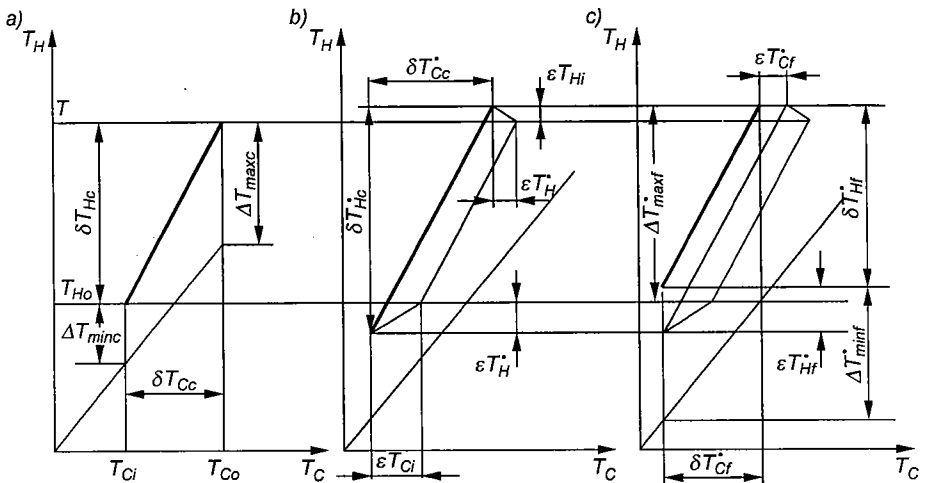
$$B = A(T_{Ci} - T_{Hi}),$$

$$C = \{ \varepsilon T_{Ci} [A(T_{Hi} - T_{Ci}) - T_{Ho}] - \varepsilon T_{Hi} (2T_{Hi} + T_{Ho} - T_{Ci}) \},$$

$$D = \varepsilon T_{Hi} [\varepsilon T_{Ci} (T_{Hi} - T_{Co}) - \varepsilon T_{Hi} (T_{Ci} - T_{Co})].$$

Reasumując, aby obliczyć wymiennik regeneracyjny z sieci:

- najpierw należy wyznaczyć oddziaływanie wymienników poprzedzających i określić zmiany (w stosunku do *SP*) temperatur wlotowych do wymiennika obliczanego,
- następnie oblicza się oddziaływanie osadów w obliczanym wymienniku, dla nowych wartości: ΔT_{mincn}^* , ΔT_{maxcn}^* , δT_{Hcn}^* , δT_{Ccn}^* . Ciąg obliczeń zilustrowany jest na rys. 7.



Rys. 7. Sekwencja obliczania wpływu osadów w kolejnym wymienniku *n*-tym, a) wymiennik z *SP* (bez uwzględnienia osadów), b) efekt oddziaływania osadów z wymienników poprzedzających (wyjaśnione na rys. 6), c) efekt oddziaływania osadów występujących w wymienniku obliczanym

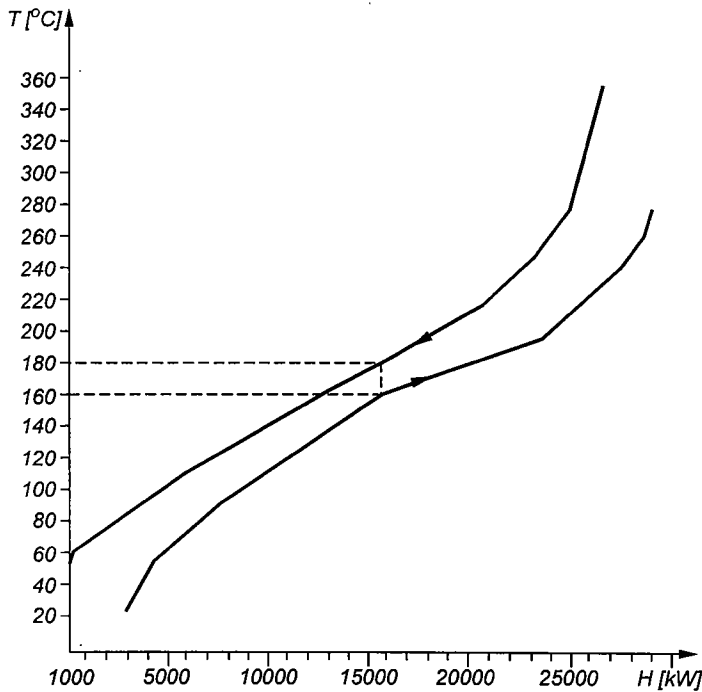
3. PRZYKŁAD OBLICZENIA SIECI ZAPROPONOWANĄ METODĄ

Strumienie technologiczne, między którymi następuje regeneracja ciepła, zestawione są w tabl. 1, a kolejne sieci na rys. 9.

Dane identyfikujące strumienie na potrzeby obliczania sieci

Nr strumienia rys. 9	Temperatury strumieni [°C]		Przepływ masowy [kg/s]	Ciepło właściwe [kJ/kg · K]	Opór ciepl. $R_f^* \cdot 10^{-3}$ [m ² · K/W]
	początkowa	końcowa			
1	300	70	3,8	2,6	1
2	220	60	20	2,5	0,5
3	250	70	12	2,5	0,25
4	280	50	9,6	2,6	0,4
5	360	110	7,4	2,7	0,3
6	20	150	22,2	1,8	0,6
7	60	240	8,3	2,4	0,9
8	160	195	65,2	2,3	0,65
9	50	260	12	2,5	0,35
10	90	280	13	2,3	0,45

Sieć podstawowa (*SP*) została opracowana na podstawie krzywych *CC* przedstawionych na rys. 8. Transformacji do sieci wirtualnej dokonano na podstawie wartości parametrów zestawionych w tabl. 2.



Rys. 8. Krzywe kompozycyjne *CC* dla podanego przykładu

Tablica 2

Parametry oddziaływania osadów w poszczególnych wymiennikach

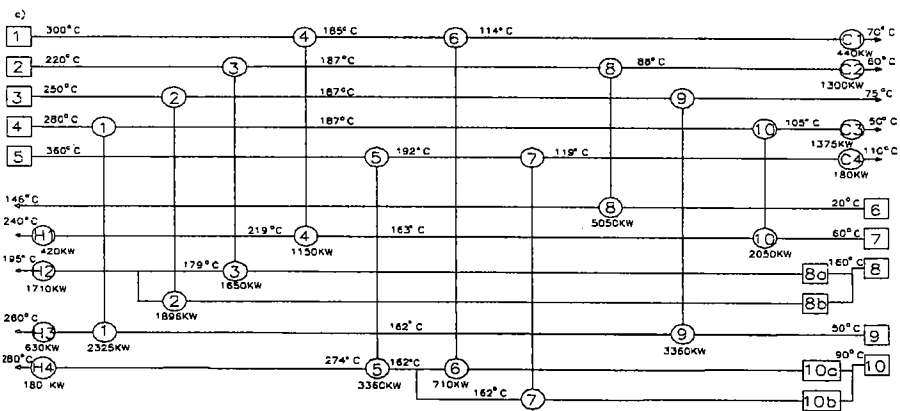
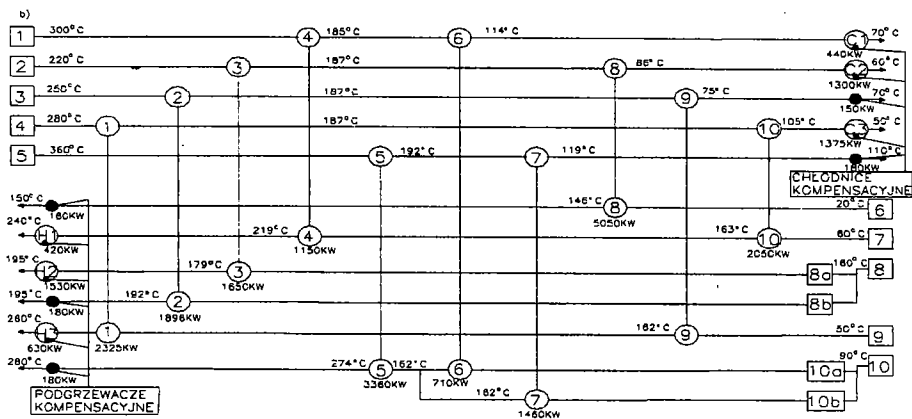
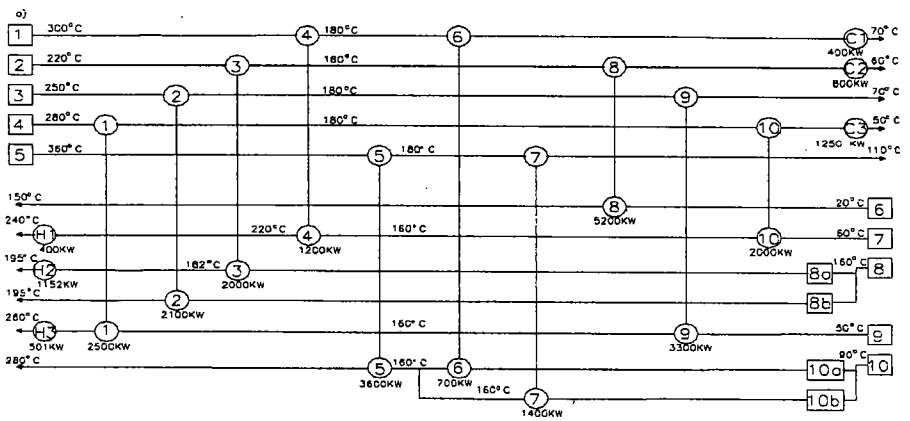
Nr wymiennika	εT_{Hin}^* [K]	εT_{Cin}^* [K]	εT_{Hn}^* [K]	εT_{Cn}^* [K]	εT_{Hfn}^* [K]	εT_{Cfn}^* [K]	ϕ [-]	β [-]
1	0	1,5	1,2	0,4	6,2	5,2	0,3	0,94
2	0	0	0	0	6,8	3,4	0,3	0,9
3	0	0	0	0	7,4	4,1	0,5	0,81
4	0	2,6	2,2	1,5	3,0	1,5	0,1	0,97
5	0	2,3	2,1	0,9	9,6	6,4	0,3	0,95
6	5,3	0	1,2	9,1	2,4	6,5	0,15	0,97
7	11,7	0	2,6	4,1	6,5	2,4	0,4	0,92
8	7,4	0	2,6	6,0	7,7	9,7	0,3	0,93
9	7,0	0	1,1	5,8	4,3	4,3	0,25	0,96
10	7,0	0	2,5	6,2	2,9	3,6	0,15	0,97

Wymienniki regeneracyjne zostały obliczone wg kryterium minimalnej wrażliwości na osady. W wyniku obliczeń uzyskano macierz powierzchni wymiany ciepła dla wymienników płaszczowo-rurowych w m²:

$$A_{SR} = [226, 182, 167, 527, 208, 338, 131, 458, 396, 600]$$

oraz temperatury wlotowe i wylotowe z każdego wymiennika naniesione na schemat 9b. Na schemacie tym wymienniki kompensacyjne, w celu podkreślenia ich obecności, zaznaczono czarnymi kółkami. Te, które są na strumieniach, na których w *SP* były podgrzewacze lub chłodnice wpisano na schemacie wewnątrz symboli oznaczających odpowiednie wymienniki, dla podkreślenia, że wymienniki te muszą przejąć dodatkowe funkcje kompensacyjne.

W sieci projektowanej (*SP*) zrezygnowano z chłodnicy kompensacyjnej na strumieniu 3 i podgrzewacza kompensacyjnego na strumieniu 6. Jednocześnie zlikwidowano na wylocie strumień 8b podłączając go do podgrzewacza *H2*. Zrezygnowano też na rys. 9c z odrębnych oznaczeń podgrzewaczy i podgrzewaczy kompensacyjnych oraz chłodnic i chłodnic kompensacyjnych, jak na rys. 9b. W sensie konstrukcyjnym są to takie same wymienniki i względem instalacji spełniają analogiczną rolę – doprowadzają lub odprowadzają ciepło. Wydaje się, że na tym końcowym etapie obliczania sieci, poprzedzającym projektowanie instalacji, mniej ważne są odrębne przyczyny, które obecność tych wymienników spowodowały. Należy jednak pamiętać, że w zakresie systemu sterowania są to różne wymienniki, zwłaszcza w początkowym okresie eksploatacji. Kiedv osady i związane z nimi opory narastaia.



Rys. 9. Zestawienie sieci z przedstawionego przykładu: a) *SP* – wymienników regeneracyjnych 10, podgrzewaczy 3, chłodnic 3, b) *SW* – wymienników regeneracyjnych 10, podgrzewaczy 3, podgrzewaczy kompensacyjnych 3, chłodnic 3, chłodnic kompensacyjnych 2, c) *SR* – wymienników regeneracyjnych 10, podgrzewaczy (razem tych z *SP* i kompensacyjnych, bo konstrukcyjnie są to takie same wymienniki, dlatego też zaznaczono je tymi samymi symbolami) 4, chłodnic (razem z przyczyn jak wyżej) 4

W przedstawionym przykładzie symbole do oznaczenia strumieni z rys. 2 użyto do oznaczenia wymienników źródeł i upustów, ale ta praktyka oznaczania tymi samymi symbolami raz strumieni, raz wymienników jest powszechnie stosowana w *PPT* i nie powinna stwarzać kłopotów. Nie mniej zwrócono na ten fakt uwagę.

4. PODSUMOWANIE

Przedstawiona metoda pozwala ograniczyć efekty cieplne osadów w regeneracyjnych sieciach wymienników ciepła. Uzyskuje się to przez odpowiednie zaprojektowanie sieci, a przy znajomości oporów cieplnych osadów w każdym z jej wymienników – odpowiednie obliczenie każdego wymiennika zabezpieczające małą jego wrażliwość na osady. Konsekwencją tego zmiany temperatur na poszczególnych wymiennikach są małe. Załączony przykład ilustruje metodę i przedstawia sieć. Cechują ją małe, a jednocześnie kontrolowane przez zaproponowaną metodę efekty cieplne osadów tak, że może ona zabezpieczać dopuszczalne przez technologię i z góry zakładane wartości odchyłek temperatur na poszczególnych wymiennikach.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Awad M.M.: Prevention of the fouling effects in heat exchanger networks. Praca doktorska, ITC, MEiL, PW, 1991.
- [2] Brodowicz K., Markowski M.: Obliczanie zbioru regeneracyjnego wymienników ciepła. Problemy badawcze energetyki cieplnej – Referaty konferencji naukowej, ITC, MEiL, PW, 1993.
- [3] Brodowicz K., Markowski M.: Metoda projektowania wymienników ciepła o małej wrażliwości na opory cieplne osadów, IX Sympozjum wymiany ciepła i masy. Komitet Termodynamiki i Spalania, Augustów, 1995.
- [4] Crittenden B.D., Kolaczkowski S.T., Hout S.A.: Modelling hydrocarbon fouling. Chem. Eng. Res. Des. 65, 171 – 179, 1987.
- [5] Dziwerek W.: Analiza wariantowych skojarzeń strumieni mediów przy wykorzystaniu techniki Pinch Point Technology dla sieci wymienników ciepła i węzłów technologicznych na przykładzie Destylacji Rurowo-Wieżowej III Mazowieckich Zakładów Rafineryjnych i Petrochemicznych w Płocku. Praca dyplomowa, ITC, MEiL, PW, 1992.
- [6] Kruk R.: Wpływ osadów na wymianę ciepła w wymiennikach płaszczowo-rurowych. Praca dyplomowa, ITC, MEiL, PW, 1991.
- [7] Linnhoff B.: User guide on process integration for efficient use of energy institution of chemical engineers, 1992.

- [8] Markowski M.: Metoda projektowania zbioru technologicznego wymienników ciepła wykorzystująca *PPT* dla uwarunkowań szczegółowych na przykładzie Petrochemii w Płocku. Rozprawa doktorska, ITC, MEiL, PW, 1995.
- [9] Piekarniak P.: Opracowanie programu numerycznego wraz z wykreśleniem krzywych wypadkowych (composite curves) dla Pinch Point Technology (optymalizacja układu wymienników ciepła). Praca dyplomowa, ITC, MEiL, PW, 1992.

CALCULATION OF REGENERATION HEAT EXCHANGERS NETWORK FOR LIMITING FOULING EFFECT IN PETROCHEMICAL INDUSTRY

Summary

The work presents method of a solution of a heat regeneration exchangers network, which limits the influence of fouling resistance arising during exploitation. The method starts from the solution of network using Pinch Point Technology and next the obtained network is modified by two transformations. In these transformations very important are descriptions of heat exchangers according to criterion of minimum sensibility on fouling and influence of resistances in other exchangers.

The work refers to conditions in petrochemical industry with including example. In petrochemical industry two instalations are operated, which are designed by using the proposed method and confirm its correctness.